สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN AUTOMATIC CONTROL TEST SET FOR WATER ABSORPTION TEST ITEM OF CABLE INSULATORS ACCORDING TO IEC 60502-2 STANDARD

T060972

ดุสิต คงจิตงาม

DUSIT KONGJITNGAM

วพ.
ว7624ก
2548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 60972
วัน,เดือน,ปี - 7 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2548

ISBN 974-15-1772-6

b 11553224
i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN AUTOMATIC CONTROL TEST SET FOR WATER ABSORPTION TEST ITEM OF CABLE INSULATORS ACCORDING TO IEC 60502-2 STANDARD

DUSIT KONGJITNGAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ISBN 974-15-1772-6

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ
นักศึกษา	นายดุสิต คงจิตงาม
รหัสประจำตัว	43061034
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการออกแบบและสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลและควบคุมปัจจัยเงื่อนไขต่างๆของการทดสอบ เช่น อุณหภูมิของน้ำ,รักษาระดับน้ำ,ควบคุมเวลา,การเก็บข้อมูลและแสดงผล ชุดทดสอบนี้สามารถทำงานได้โดยอิสระ โดยไม่ต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น จึงเป็นผลให้สามารถลดการใช้พลังงานได้ และสามารถทำการทดสอบชิ้นงานมาตรฐานได้ครั้งละ 30 ชิ้น โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วงอุณหภูมิ 50– 90 องศาเซลเซียส สามารถทำงานได้ต่อเนื่องแบบอัตโนมัติตลอดระยะเวลาทดสอบ ใช้งานสะดวก สามารถเก็บข้อมูลที่ได้ลงในหน่วยความจำ แสดงผลการทดสอบผ่านหน้าจอ LCD และสามารถถ่ายโอนข้อมูลให้แสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์เป็นกราฟฟิกและจัดพิมพ์ผลการทดสอบได้ ผลการทำงานของชุดทดสอบสามารถทำงานสอดคล้องกับผลการทดสอบที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design and Construction of an Automatic Control Test Set for Water Absorption Test Item of Cable Insulators According to IEC 60502-2 Standard
Student	Mr. Dusit Kongjitngam
Student ID.	43061034
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis presents a design and construction of cable insulating test set by using the microcontroller that is a testing of water absorption topic by following the IEC 60502-2 standard. The advantages of microcontroller are temperature and level control of water, timing control, graphical display of data and also data record. The maximum quantity of the object for testing in this research is 30 objects, and this testing is able to fix the constant temperature between 50- 90 ^{0}C in period of testing. This research is able to use in automatic mode that will be more convenince than the existing system. Furthermore the test set can be recorded the displayed the data on LCD. Moreover all of datas will be transfered and displayed the graphic on PC monitor and printed out the test data as well. The results can be shown the water absorption testing by following the IEC 60502-2 standard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

แด่...เท้าเหนือเผ้าผม
ความ...เชิดชมในชีพชนม์
ภาค...ภพภูวดล
ภูมิ...ใจดั่งทิพย์ความดี
ใจ...เที่ยงคือบรรทัด
ของ...โลกัตถจารี
แม่...สร้างบุญราศี
พ่อ..ชี้สัจธรรมนิรันดร์ ฯลฯ

ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำสั่งสอนชี้แนะแนวทางตลอดมา ทำให้มีความมานะพยายามในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง จึงเขียนบทกวีนี้มอบให้

แด่ครู...ผู้สร้างผู้ถางถาก ผู้บั่นบากสร้างสรรค์การศึกษา
ผู้ประสาทประสิทธิ์วิทยา ผู้พัฒนามนุษย์เน้นความเป็นมนุษย์
ผู้ให้ด้วยวิญญาณแห่งการให้ ให้ความรักจากใจบริสุทธิ์
ให้ความรู้เร่งเร้าเร่งก้าวรุด ให้ความยุติธรรมค้ำธาตรี
ให้ความจริงยิ่งใหญ่ให้ความคิด ให้รู้ผิดรู้ถูกทุกวิถี
ให้รู้โลกรู้ธรรมเทิดทวี ให้รู้ตีรู้โต้ความโสมม
เป็นแม่พิมพ์พ่อพระผู้ไม่แพ้ มุ่งก่อแก้สิ่งทรามให้งามสม
เป็นนักสู้นักสร้างนักสังคม มั่นอุดมคติปณิธาน
เป็นดวงมณีแห่งชีวิตวิจิตรจ้า เป็นเทียนส่องทิศาอันไพศาล
สุดดินน้ำล้ำฟ้าจักรวาล ขอกราบกรานสุนทรางค์กลางดวงใจ ฯฯ

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ผู้ซึ่งเสียสละเวลาอันมีค่าของท่านในการให้แนวทางความคิด และข้อแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์รวมถึงเอกสารความรู้ทุกอย่าง

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้อง STAFF 2 ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยในการให้กำลังใจในการทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ดุสิต คงจิตงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... X

สารบัญรูป..... XI

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... 2

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..... 2

1.5 ขอบเขตการวิจัย..... 4

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา..... 4

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี..... 6

2.1 บทนำ..... 6

2.2 สายไฟฟ้า..... 6

2.2.1 ตัวนำ..... 6

2.2.2 ฉนวน..... 6

2.3 ประเภทของสายไฟฟ้า..... 7

2.3.1 สายไฟฟ้าแรงดันสูง..... 7

2.3.1.1 สายเปลือย..... 7

2.3.1.2 สายหุ้มฉนวน..... 8

2.4 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดี..... 10

2.5 ชนิดของวัสดุฉนวนที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง..... 11

2.6 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลิเมอร์..... 11

2.6.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของสารฉนวนโพลิเมอร์..... 14

2.6.2 วัสดุที่มีความเป็นโพลิเมอร์สูง..... 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3 พีวีซี (Polyvinylchloride : PVC) 15

2.6.4 พีอี (Polyethylene : PE) 16

2.6.4.1 เอชดีพีอี 17

2.6.4.2 แอลดีพีอี 17

2.6.4.3 เอ็กซ์แอลพีอี..... 18

2.7 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE 18

2.7.1 ตัวนำ 19

2.7.2 Conductor Screen 19

2.7.3 Insulation คือ วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า 19

2.7.4 Insulation Screen 20

2.8 มาตรฐานการทดสอบ 21

2.8.1 ทดสอบ Water Avsorption ที่ระบุไว้ใน IEC 605022.71..... 21

2.8.2 ขั้นตอนในการทดสอบ Water Avsorption ตามมาตรฐาน IEC 60502 21

2.9 หลักการควบคุมอุณหภูมิ 22

2.9.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) 22

2.9.1.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน..... 24

2.9.1.2 ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล 24

2.9.1.2.1 เทอร์โมคัปเปิล 24

2.9.1.2.2 ครอบโลหะป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล 24

2.9.1.2.3 ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล 24

2.9.1.2.4 เทอร์โมเวลล์ 25

2.9.1.2.5 Extension Wire 25

2.10 ฮีตเตอร์.....25

2.11 ทฤษฎีที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำ 26

2.11.1 ก้านอิเล็กโตรด 26

2.11.2 โซลินอยด์วาล์ว 27

2.12 กระบวนการทางอุตสาหกรรม 27

2.13 ทฤษฎีที่ใช้ในการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....27

2.13.1 สถาปัตยกรรมของ 89C51RD+ 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.13.1.1 แนะนำไมโครคอนโทรลเลอร์.....27

2.13.1.2 คุณลักษณะพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51...28

2.13.1.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 28

2.13.1.4 โครงสร้างหน่วยความจำภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51..... 29

2.14 การควบคุมกระบวนการแบบต่างๆ 30

2.14.1 การควบคุมแบบปิด-เปิด 30

2.14.2 การควบคุมแบบพี 31

2.14.3 การควบคุมแบบไอ 32

2.14.4 การควบคุมแบบพีไอ 33

2.14.4.1 อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอ โดยใช้การต่อแบบขนาน 33

2.14.4.2 อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอ โดยใช้การต่อแบบอนุกรม 33

2.14.5 การควบคุมแบบพีไอดี 34

2.14.5.1 การควบคุมแบบดี 34

2.14.5.2 อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอดี 35

2.15 สรุป 36

บทที่ 3 การออกแบบ 37

3.1 การออกแบบส่วนประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 38

3.1.1 ไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.... 38

3.1.2 การรอรับข้อมูลเริ่มต้นต่างๆ จากคอมพิวเตอร์.....38

3.1.3 โปรแกรมย่อยการควบคุมอุณหภูมิ 39

3.1.4 การส่งข้อมูลของอุณหภูมิไปยังคอมพิวเตอร์ 39

3.1.5 โปรแกรมย่อยการแสดงผลทางหน้าจอ LCD 40

3.2 การออกแบบส่วนควบคุมอุณหภูมิ 40

3.2.1 ไดอะแกรมการทำงานส่วนควบคุมอุณหภูมิ 40

3.2.2 เทอร์โมคัปเปิล 40

3.2.3 วงจรขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล 41

3.2.4 ฮีตเตอร์ 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.5 วงจรควบคุมเฟสคอนโทรล 43
3.2.6 วงจรกำลังและวงจรขับเฟสคอนโทรล 45
3.3 การออกแบบการป้อนกลับแบบพีไอดี (PID) 47
3.4 การออกแบบส่วนควบคุมระดับน้ำ 50
3.4.1 ไดอะแกรมการทำงานควบคุมระดับน้ำ 50
3.4.2 ก้านอิเล็กโตรด 50
3.4.3 โซลินอยด์วาล์ว 51
3.4.4 วงจรควบคุมระดับน้ำ 51
3.5 การออกแบบหม้อต้ม 52
3.5.1 ตัวหม้อ 53
3.5.2 ฝาแก้วปิดบีกเกอร์ 53
3.5.3 ส่วนจับยึดชิ้นงาน 53
3.5.4 ฉนวนกันความร้อน 54
3.5.5 ส่วนจับยึดเทอร์โมคัปเปิล, ก้านลิเล็กโตรดและโซลินอยด์วาล์ว 54
3.5.6 พิกัดกระแสของอุปกรณ์ 55
3.6 สรุปการออกแบบ 55

บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ 56
4.1 กล่าวนำ 56
4.2 วัตถุประสงค์ 56
4.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล 56
4.3.1 หลักการและเหตุผล 56
4.3.2 หัวข้อการทดสอบ 57
4.3.3 ผลการทดสอบ 57
4.3.4 สรุปผลการทดสอบ 58
4.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิในระดับต่างๆ ตั้งแต่ 50-90 องศาเซลเซียส 59
4.4.1 หลักการและเหตุผล 59
4.4.2 หัวข้อการทดสอบ 59
4.4.3 ผลการทดสอบ 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4 สรุปผลการทดสอบ 66

4.5 ผลการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน 66

4.5.1 หลักการและเหตุผล 66

4.5.2 หัวข้อการทดสอบ 66

4.5.3 ผลการทดสอบ 66

4.5.4 สรุปผลการทดสอบ 74

4.6 ผลการทดสอบ Water Absorption ของฉนวนสายเคเบิล 74

4.6.1 หลักการและเหตุผล 74

4.6.2 หัวข้อการทดสอบ 74

4.6.3 ผลการทดสอบ 75

4.6.4 สรุปผลการทดสอบ 75

4.7 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้โดยประมาณ 75

4.8 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยประมาณ 76

4.9 ข้อควรระวังในการทดสอบ 76

บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผล 77

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง 77

5.1.1 การทดสอบเปรียบเทียบการทำงานเทอร์โมคัปเปิล 77

5.1.2 การทดสอบเปรียบเทียบการรักษาระดับอุณหภูมิที่จดสร้างและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน 78

5.1.3 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในช่วงระยะเวลา 14 วัน 78

5.1.4 การทดสอบเปรียบเทียบหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ของฉนวนสายเคเบิลชนิด XLPE ระหว่างชุดทดสอบที่จัดสร้างและชุดทดสอบมาตรฐาน 78

5.1.5 การวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า 79

5.1.6 การวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้า 79

5.2 สรุปผล 79

บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงาน 80

6.1 สรุปผลการออกแบบหม้อทดสอบ 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2 สรุปผลการควบคุมอุณหภูมิ 80
6.3 สรุปผลการควบคุมระดับน้ำ 81
6.4 สรุปผลการควบคุมเวลา 81
6.5 สรุปการเก็บข้อมูลและแสดงผล 81
6.6 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต 81

เอกสารอ้างอิง 83

ภาคผนวก 84
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดสอบฉนวนสายเคเบิลตามมาตรฐาน 85
ภาคผนวก ข. คู่มือการใช้งานชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 91
ภาคผนวก ค. ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องมือวัด เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 101
ภาคผนวก ง. Source code 104
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ 145

ประวัติผู้เขียน 151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE..... 7

2.2 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน Type ต่างๆ.....25

4.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบอุณหภูมิมาตรฐานเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบที่จัดสร้าง..... 58

4.2 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของฉนวนระหว่างชุดทดสอบและชุดทดสอบมาตรฐาน ..75

4.3 แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้โดยประมาณ.....75

4.4 แสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยประมาณ.....76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงโครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE	3
1.2	แสดงตัวอย่างฉนวนของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ	3
1.3	แสดงไดอะแกรมการทำงานของชุดทดสอบฉนวน	3
2.1	แสดงสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC)	7
2.2	แสดงสายอลูมิเนียมแกนเหล็ก	8
2.3	แสดงสายเคเบิลแบบพาร์เชียล (PIC)	8
2.4	แสดงสาย Space Aerial Cable	9
2.5	แสดงสาย Cross- Linked Polyethylene	9
2.6	แสดงภาคตัดขวางของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลิเมอร์	12
2.7	แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลเมื่อไม่มี และมีชั้น	13
2.8	แสดงโมเลกุลลูกโซ่ของพีวีซี	15
2.9	แสดงโมเลกุลลูกโซ่พีอี (PE)	17
2.10	แสดงโครงสร้างผลึกของเอชดีพีอี (HDPE)	17
2.11	แสดงโครงสร้างผลึกของแอลดีพีอี	18
2.12	แสดงโครงสร้างผลึกของเอ็กซ์แอลพีอี (XLPE)	18
2.13	แสดงส่วนต่างๆ ของสายเคเบิลแรงสูงฉนวนXLPE	19
2.14	แสดงวงจร “ซีเบ็ค โวลต์เตจ”	23
2.15	แสดงการใช้งานก้านอิเล็กโตรด	26
2.16	แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบปิด – เปิด	31
2.17	แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบพี	32
2.18	แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบไอ	33
2.19	แสดงการต่อแบบขนาน	34
2.20	แสดงการต่อแบบอนุกรม	34
2.21	แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบดี	35
2.22	แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบพีไอดี	36
3.1	แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบของชุดทดสอบ	37
3.2	แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	37
3.3	แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมการย่อยการควบคุมอุณหภูมิ	39
3.4	แสดงไดอะแกรมส่วนควบคุมอุณหภูมิ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	แสดงเทอร์โมคัปเปิล	41
3.6	แสดงวงจรขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล	41
3.7	แสดงสัญญาณแรงดันเอาท์พุทในวงจรขยายสัญญาณ	41
3.8	แสดงฮีตเตอร์รัดท่อ	42
3.9	แสดงวงจรควบคุม	43
3.10	แสดงสัญญาณเฟสซิงโครไนซ์กับเอซีไลน์	44
3.11	แสดงสัญญาณเฟสซิงโครไนซ์กับสัญญาณสามเหลี่ยม	44
3.12	แสดงสัญญาณกับเฟสแบบสามเหลี่ยมที่มีการซิงโครไนซ์	45
3.13	แสดงวงจรขับขดลวดความร้อนด้วยวิธีเฟสคอนโทรล	46
3.14	แสดงสัญญาณขับเกท	46
3.15	แสดงสัญญาณแรงดันเอาท์พุท	47
3.16	แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุม	47
3.17	แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ	47
3.18	แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ PID	48
3.19	แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดต้นแบบ	48
3.20	แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบเมื่อ Set K_m เป็น 1	49
3.21	แสดงไดอะแกรมส่วนควบคุมระดับน้ำ	50
3.22	แสดงก้านอิเล็กโตรด	50
3.23	แสดงโซลินนอยด์วาล์ว	51
3.24	แสดงวงจรควบคุมระดับน้ำ	52
3.25	แสดงโครงสร้างของหม้อทดสอบ	52
3.26	แสดงบีกเกอร์	53
3.27	แสดงฝาแก้วปิดบีกเกอร์	53
3.28	แสดงนงาน และส่วนจับยึดชิ้นงาน	54
3.29	แสดงฉนวนกันความร้อน	54
3.30	แสดงส่วนจับยึดอุปกรณ์	55
4.1	แสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก Analyzing Recorder ของเทอร์โมคัปเปิลชุดทดสอบเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชุดทดสอบมาตรฐาน	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.2 แสดงการทดสอบควบคุมอุณหภูมิค่าต่างๆของชุดทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิมาตรฐาน....59

4.3 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 50องศาเซลเซียส.... 60

4.4 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 50องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด....60

4.5 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 60องศาเซลเซียส....61

4.6 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด....61

4.7 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 70องศาเซลเซียส....62

4.8 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.... โดยใช้ Recorder ในการวัด....62

4.9 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 80องศาเซลเซียส.... 63

4.10 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด....63

4.11 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 85องศาเซลเซียส....64

4.12 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด....64

4.13 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 90องศาเซลเซียส....65

4.14 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด....65

4.15 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 1....67

4.16 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 2....67

4.17 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 3....68

4.18 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 4....68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 5	69
4.20	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 6	69
4.21	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 7	70
4.22	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 8	70
4.23	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 9	71
4.24	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 10	71
4.25	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 11	72
4.26	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 12	72
4.27	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 13	73
4.28	แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 14	73
ข.1	แสดงขาจับยึดชิ้นงานและหลอดแก้วกลวงสำหรับใส่ชิ้นงาน	92
ข.2	แสดงการประกอบส่วนจับยึดชิ้นงานเข้ากับบีกเกอร์	92
ข.3	แสดงตำแหน่งของบานพับโดย ตำแหน่งตรงกลางใช้สำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล	93
ข.4	แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล , ก้านอิเล็กโตรด และ โซลินอยด์วาล์ว	93
ข.5	แสดงหน้าจอแสดงความพร้อมการทำงานที่อุณหภูมิปัจจุบันของน้ำ	94
ข.6	แสดงแป้นคีย์บอร์ดในการตั้งค่าอุณหภูมิ และควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ	94
ข.7	แสดงหน้าจอแสดงการตั้งค่าอุณหภูมิ ในรูปแสดงการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส	94
ข.8	แสดงหน้าจอแสดงการเริ่มทำงาน	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.9	แสดงหน้าจอแสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และการเริ่มเก็บจำนวนข้อมูล	95
ข.10	แสดงหน้าจอแสดงยืนยันการหยุดทำงาน	95
ข.11	แสดงการต่อสายโอนข้อมูลระหว่างชุดทดสอบกับคอมพิวเตอร์	96
ข.12	แสดงหน้าจอแสดงการถ่ายโอนข้อมูล	96
ข.13	แสดงหน้าจอโปรแกรม ERD	97
ข.14	แสดงหน้าจอการกด connect off	97
ข.15	แสดงหน้าจอการทำงาน connect on	97
ข.16	แสดงหน้าจอการคีย์ข้อมูลที่ต้องการให้แสดงผล	98
ข.17	แสดงหน้าจอรับข้อมูล	98
ข.18	แสดงกราฟที่ได้จากการประมวลผล	98
ข.19	แสดงการนำอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ มาพักไว้ที่บานพับด้านนอก	90
ข.20	แสดงการใช้ขาเกี่ยวแก้วเกี่ยวฝาปิดแก้ว	90
ข.21	แสดงShortcut โปรแกรม Flash Pro V.1.1.lnk	100
ข.22	แสดงShortcut โปรแกรม ERD Temperature V1.0.LNK	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้านับว่ามีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ อันเนื่องมาจากความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการที่จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้บริโภคนับว่ามีส่วนสำคัญ ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบและดูแลรักษาเป็นอย่างดี เพื่อรักษาความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและปัญหาต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของความปลอดภัย ดังนั้นฉนวนไฟฟ้าจึงมีบทบาทสำคัญที่จะต้องตรวจดูคุณภาพของฉนวนก่อนนำไปใช้งานตามสภาวะต่างๆ เช่น อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือจากสภาวะการใช้งานในลักษณะต่างๆ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอันหนึ่ง ที่จะเป็นตัวบอกถึงคุณภาพของฉนวนที่ใช้ในการฉนวนสายเคเบิลก็คือการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารวัสดุแต่ละชนิด[1] และมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ฉนวนไม่สามารถรักษาสภาพของการเป็นฉนวนและเสื่อมสภาพของการเป็นฉนวนลง จนไม่สามารถคงทนต่อระดับแรงดันที่ใช้งานได้และจะเกิดการเบรกดาวน์ในที่สุด

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การนำเสนอปัญหาของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ในเรื่องของการออกแบบและสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะทำการทดสอบตามมาตรฐานของสายเคเบิลนั้นๆ ในการทดสอบหัวข้อต่างๆ ของแต่ละมาตรฐานจะมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันไป ซึ่งอาจต้องอาศัยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ ค่อนข้างมากในการทดสอบ จึงทำให้เกิดความยุ่งยากและต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์ในการทดสอบเพื่อควบคุมการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้จะมีผลกระทบต่อเครื่องมือวัดจึงทำให้ผลการทดสอบได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง รวมทั้งผู้ทดสอบนั้นยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติเฉพาะของสารวัสดุแต่ละชนิดของฉนวนสายเคเบิลที่นำมาทดสอบว่าค่าที่ทำการทดสอบอยู่นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยอะไรบ้าง จึงทำให้ไม่ทราบว่าค่าที่ได้นั้นมีความถูกต้องหรือไม่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลที่สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ และควบคุมปัจจัยต่างๆที่จำเป็นในการทดสอบได้ตลอดระยะเวลา สามารถแสดงผลการทดสอบที่ได้ออกมาในรูปแบบกราฟฟิกที่ชัดเจน ประหยัดพลังงานและลดต้นทุนการผลิตที่สูงหรือการนำเข้าอุปกรณ์การทดสอบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อแนวทางการทดสอบให้กับภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประมวลผลในการวัดอุณหภูมิ ระดับน้ำ เวลา บันทึกผลและแสดงผลการทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์หลักๆ ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการทดสอบในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 รวมทั้งศึกษาปัญหาและเทคนิคต่างๆ และการควบคุมการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน
2. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทดสอบฉนวนของฉนวนสายเคเบิล
3. เพื่อเป็นการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ
4. เพื่อสามารถพัฒนาและผลิตชุดทดสอบมาตรฐานขึ้นใช้งานได้เองภายในประเทศ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

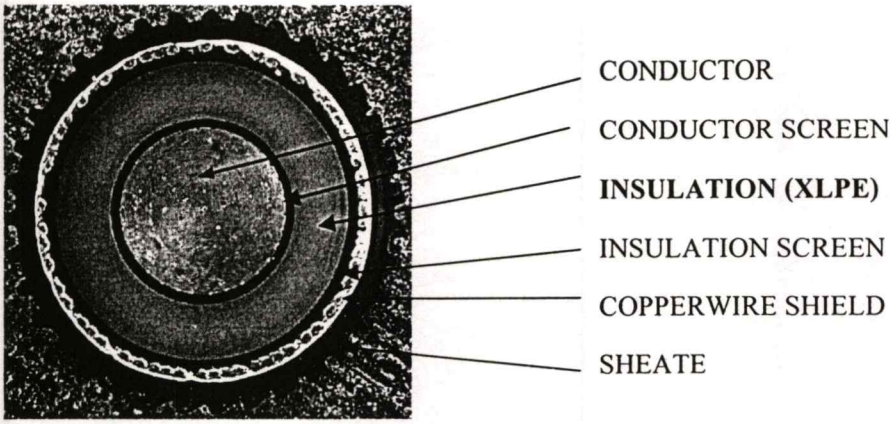
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

1. การศึกษาทฤษฎีมาตรฐานการทดสอบ Water Absorption ของฉนวนเคเบิล ที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยมีการควบคุมเงื่อนไขและอุปกรณ์ในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน
2. การศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบลักษณะต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาปัจจัยต่างๆ
3. การศึกษาทฤษฎีของไมโครคอนโทรลเลอร์และ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมปัจจัยต่างๆของการทดสอบ

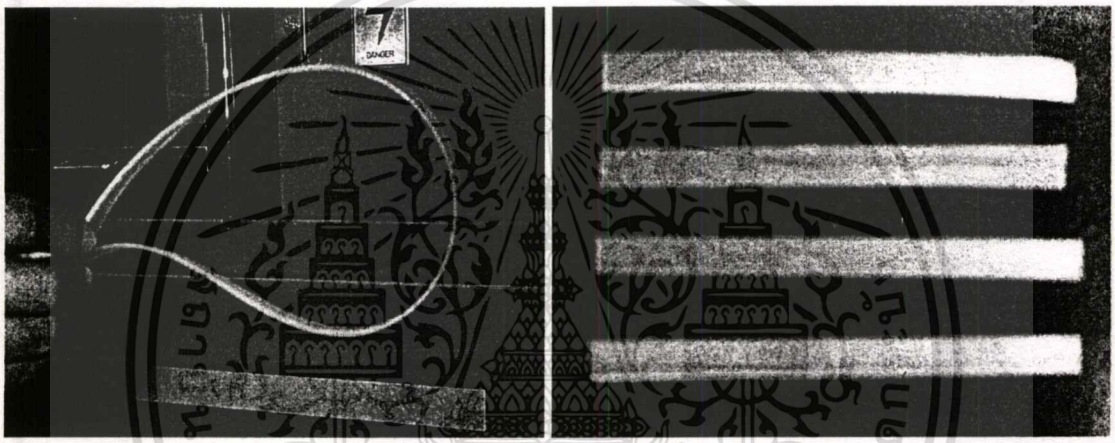
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption นั้น ได้ออกแบบและจัดสร้างตามมาตรฐาน IEC 60502-2 เป็นหลัก โดยเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฉนวน ด้วยการแช่ชิ้นฉนวนในน้ำที่มีอุณหภูมิคงที่ ไม่เกิน 90 องศาเซลเซียส และเลือกอุณหภูมิทดสอบให้น้อยกว่าอุณหภูมิสูงสุดของสายเคเบิล ขณะใช้งานเต็มพิกัด อยู่ 5 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 14 วัน โดยนำสายเคเบิลเฉพาะเนื้อฉนวน XLPE ที่ต้องการทดสอบ ดังรูปที่ 1.1 มาทำการ สไลด์ให้เป็นแผ่น มีขนาดโดยประมาณ กว้าง 4-5 มม. ยาว 80 -100 มม. หนา 0.6 - 0.9 มม. ดังรูปที่1.2 มาทำการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบ[3-4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

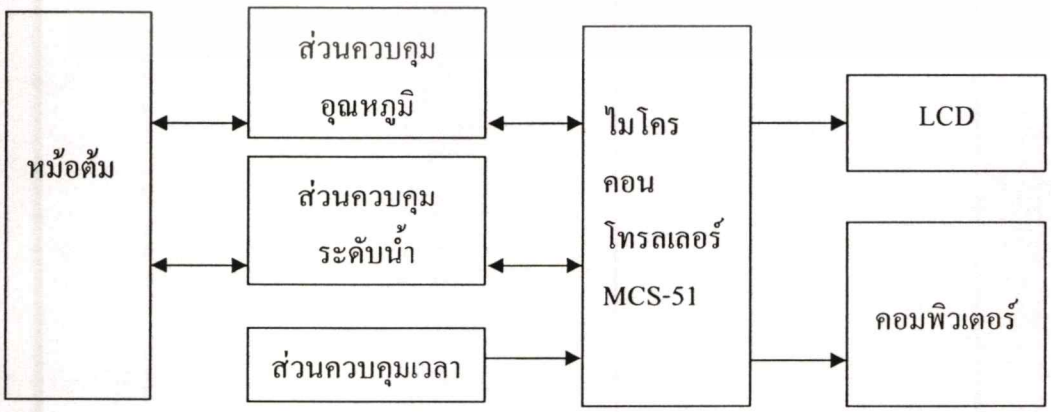


รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE



รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างฉนวนของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมปัจจัยต่างๆที่ใช้ทดสอบ ให้มีเงื่อนไขตามที่มาตรฐาน IEC 60502-2 กำหนด คือ การควบคุมอุณหภูมิ,ระดับน้ำ,ควบคุมเวลา,การเก็บผลและแสดงผล [5]



รูปที่ 1.3 แสดงไดอะแกรมการทำงานของชุดทดสอบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งขอบเขตของงานวิจัยเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีการทดสอบ Water Absorption ของฉนวนเคเบิล ที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 เพื่อใช้ในการศึกษาถึง ลักษณะการทดสอบและขั้นตอนในการทดสอบตามมาตรฐาน รวมทั้งผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน

2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบเป็นเครื่องมือทดสอบมาตรฐานโดยสามารถทำงานได้แบบอัตโนมัติ กล่าวคือ ควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ที่ 50-90 องศาเซลเซียส รักษาระดับน้ำ ควบคุมเวลา การจัดเก็บและการแสดงผล ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

3. สามารถทำการทดสอบชิ้นงานฉนวนตัวอย่างมาตรฐาน ของสายเคเบิลใต้ดินพิกัดไม่เกิน 24 kV ขนาด 1-400 ตารางมิลิเมตร ได้ครั้งละ 30 ชิ้นตัวอย่าง

4. ผลของการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบผล Water Absorption ของฉนวนเคเบิลที่ทำการทดสอบกับชุดทดสอบที่จัดสร้างกับผล Water Absorption ของฉนวนเคเบิลที่ทำการทดสอบกับชุดทดสอบมาตรฐาน ของตัวอย่างสายเคเบิลนั้นๆ โดยค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนน้อย

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

สำหรับขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยมุ่งเน้นในส่วนของฉนวนสายเคเบิล

2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบของฉนวนสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 รวมทั้งข้อกำหนดของ MEA. โดยมุ่งเน้นในหัวข้อ Water Absorption

3. ศึกษาทฤษฎีส่วนรับ-ส่งข้อมูล และการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

4. ศึกษาปัญหา แนวทางการแก้ไขและเทคนิคต่างๆ เพื่อควบคุมการทดสอบให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

5. ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ

6. ออกแบบและจัดสร้างโปรแกรมในส่วนรับ-ส่งข้อมูลและประมวลผล

7. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ

8. สรุปผลและวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1. ทราบถึงมาตรฐาน ขั้นตอนและวิธีการทดสอบของฉนวนสายเคเบิลในปัจจุบัน
2. ทราบถึงปัญหา และเทคนิคต่างๆในการทดสอบและแนวทางการแก้ไข
3. พัฒนาและสร้างชุดทดสอบ ให้มีราคาถูก และสะดวกต่อการนำไปใช้งาน และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการทดสอบให้ภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีทั่วไป

2.1 บทนำ

สายส่งไฟฟ้า (Electric Transmission Line) เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบที่สำคัญมากในด้านส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และเป็นตัวกลางที่ยอมให้กำลังไฟฟ้า (Electrical Power) หรือสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Signal) ไหลผ่านตามความยาวของสายส่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งตามที่ต้องการได้ และสามารถพบเห็นสายส่งได้โดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน และพอจะสังเกตเห็นได้ว่าสายส่งที่ใช้งานแต่ละประเภทดังกล่าวจะมีลักษณะรูปทรงทางกายภาพแตกต่างกันออกไปตามประเภทของการใช้งาน ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุสายไฟฟ้าต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสม

2.2 สายไฟฟ้า

สายไฟฟ้าจะมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน ได้แก่ ตัวนำ และฉนวน

2.2.1 ตัวนำ

ตัวนำของสายไฟฟ้าทำมาจากโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูง อาจเป็นตัวนำเดี่ยว หรือตัวนำตีเกลียว (Strand) ที่นิยมได้แก่ ทองแดง และอลูมิเนียม ซึ่งมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ทองแดง ข้อดีจะมีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าสูงมาก แข็งแรง เหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ข้อเสีย จะพบว่าจะมี น้ำหนักมาก ราคาสูง จึงไม่เหมาะกับงานแรงดันสูงที่มีระยะทางไกลๆ แต่จะมีเหมาะกับงานภายในอาคาร

อลูมิเนียม จะมีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าน้อยกว่าทองแดง แต่เมื่อเปรียบเทียบกรณีจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สภาวะเท่ากัน ซึ่งอลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบา และราคาไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับทองแดง จึงเหมาะกับงานนอกอาคารและแรงดันไฟฟ้าสูง แต่ข้อเสียจะพบว่าอลูมิเนียมเมื่อปล่อยไว้ในอากาศ จะเกิดออกไซด์เป็นฉนวนฟิล์มบางๆ ป้องกันการ สึกกร่อน แต่ทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก

2.2.2 ฉนวน

ทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรง ระหว่างตัวนำ หรือตัวนำกับส่วนที่ต่อลงดิน ในระหว่างที่ตัวนำนำกระแสไฟฟ้าจะเกิดพลังงานสูญเสียในรูปความร้อน ซึ่งจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวนซึ่งความสามารถในการทนต่อความร้อนของฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายไฟฟ้านั่นเอง การเลือกใช้ชนิดของฉนวนจะขึ้นกับอุณหภูมิใช้งาน และแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบ และสภาพแวดล้อมในการติดตั้งซึ่งวัสดุที่นิยมใช้เป็น ฉนวนมากที่สุดในขณะนี้คือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene (XLPE)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้ $(°C)$	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร $(°C)$	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	3.2-4	2.3
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.4	0.92
ความนำความร้อน $(cal/cm.\sec °c)$	3.5	8
ความทนทานต่อแรงดึง (kg/mm^2)	2.5	3

2.3 ประเภทของสายไฟฟ้า

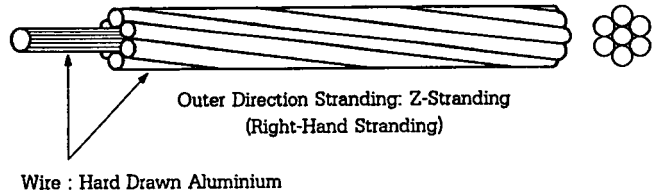
2.3.1 สายไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นตัวนำตีเกลียวมีขนาดใหญ่ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สายแบบเปลือย และสายแบบหุ้มฉนวน

2.3.1.1 สายเปลือย

สายชนิดนี้จะไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่แรงดันต่ำจะไม่ปลอดภัย นิยมใช้กับแรงดันสูง และมักทำจากสายอลูมิเนียมเพราะน้ำหนักเบา และราคาถูก แต่สายอลูมิเนียมล้วนสามารถรับแรงดึงได้ต่ำ จึงได้พัฒนาให้สามารถรับแรงดึงให้สูงขึ้น โดยเสริมแกนเหล็กหรือวัสดุอื่น สายเปลือยที่นิยมใช้ปัจจุบันได้แก่

- สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC - All Aluminum Conductor)

เป็นตัวนำอลูมิเนียมล้วนตีเกลียวเป็นชั้นๆ รับแรงดึงได้ต่ำ จึงไม่สามารถขึงสายให้มีระยะห่างมากๆ ได้ปกติความยาวช่วงเสาต้องไม่เกิน 50 เมตร ยกเว้นสายที่มีขนาด 95 ตารางมิลิเมตร ขึ้นไปโดยสามารถมีระยะช่วงเสามากถึง 100 เมตร มีลักษณะและข้อมูลทางเทคนิค ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงสายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC)

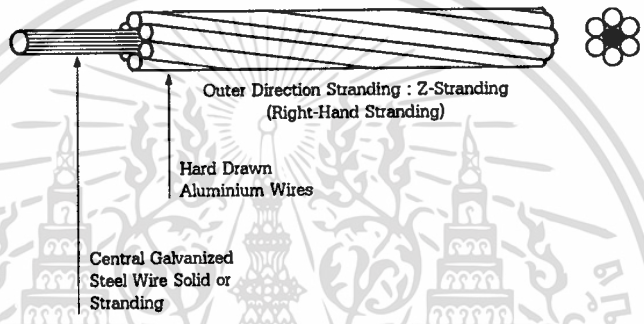
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายอลูมิเนียมผสม (AAAC - All Aluminum Alloy Conductor)

สายชนิดนี้มีส่วนผสมของอลูมิเนียม แมกนีเซียม และซิลิกอน ซึ่งมีความเหนียวและสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วน จึงสามารถขึงสายได้ห่างมากขึ้น นิยมใช้บริเวณชายทะเลเพราะสามารถทนการกัดกร่อนของไอเกลือได้ดี

- สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR - Aluminum Conductor Steel Reinforced)

เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวและมีสายเหล็กอยู่ตรงกลาง เพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น ทำให้ขยายระยะห่างช่วงเสาได้มากขึ้น แต่จะไม่ใช้สายชนิดนี้บริเวณชายทะเล เพราะจะเกิดการกัดกร่อนจากไอเกลือมีลักษณะและข้อมูลทางเทคนิค ดังรูปที่ 2.2



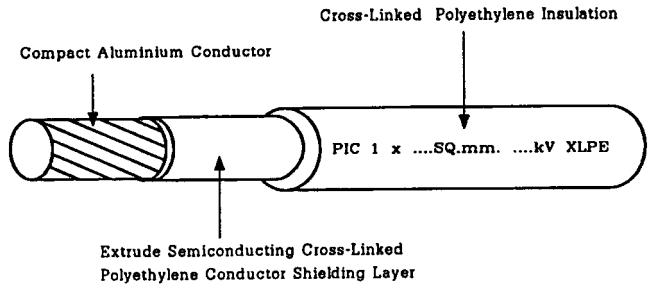
รูปที่ 2.2 แสดงสายอลูมิเนียมแกนเหล็ก

2.3.1.2 สายหุ้มฉนวน

การเดินสายแรงสูงที่ตัดผ่านบ้านพักอาศัย เพื่อความปลอดภัยจำเป็นต้องใช้สายที่มีฉนวนหุ้มซึ่งทำให้มีความเชื่อถือสูงขึ้น ที่นิยมใช้มีดังนี้

- สายเคเบิลแบบพาร์เชียล (Partial Insulated Cable :PIC)

โครงสร้างประกอบด้วยตัวนำอลูมิเนียมตีเกลียวอัดแน่น หุ้มด้วยฉนวน XLPE (Cross-Linked Polyethylene) หรือ PE (Polyethylene) แล้วแต่ความเหมาะสม 1 ชั้น ปัจจุบันนิยมใช้ฉนวน XLPE ถึงแม้มีฉนวนหุ้ม ก็ไม่สามารถแตะต้องสายได้ เพราะ ฉนวนบางมาก ซึ่งจะช่วยลดการเกิดลัดวงจร ของสายเปลือยเท่านั้น ใช้เดินในอากาศผ่านลูกถ้วยแทนสายเปลือย

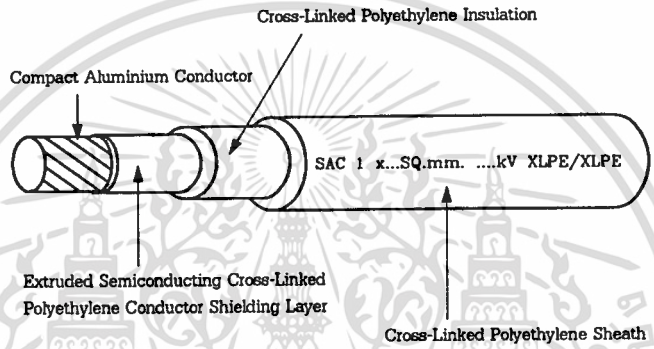


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 แสดงสายเคเบิลแบบพาร์เชียล (PIC)

- **สาย Space Aerial Cable (SAC)**

โครงสร้างประกอบด้วยตัวนำอลูมิเนียมตีเกลียวหุ้มด้วยฉนวน XLPE เช่นเดียวกับสาย PIC แต่จะมีเปลือก (Sheath) ที่ทำจาก XLPE หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่ง แต่ไม่มีชีลด์จึงไม่สามารถกั้นสนามไฟฟ้าที่ออกจากตัวนำได้ และถึงแม้จะมีเปลือกหุ้ม ก็ไม่ควรสัมผัสสายโดยตรง เพราะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง ในการใช้งาน จำเป็นต้องติดตั้งบนฉนวนไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง และต้องใช้ฉนวนที่เรียกว่าสเปเซอร์ (Spacer) ที่เหมาะสมกับแรงดันเป็นตัวรองรับ และเพื่อจำกัดระยะห่างระหว่างสาย แม้ว่าจะสามารถวางไว้ใกล้กันได้มากกว่าสาย PIC แต่ต้องไม่เกินค่าจำกัดค่าหนึ่ง และต้องใช้ (Messenger Wire) เป็นตัวรับน้ำหนัก และช่วยดึงสายไว้ด้วย Messenger Wire จะต่อลงดินทำหน้าที่เป็นสาย Overhead Ground Wire ด้วย



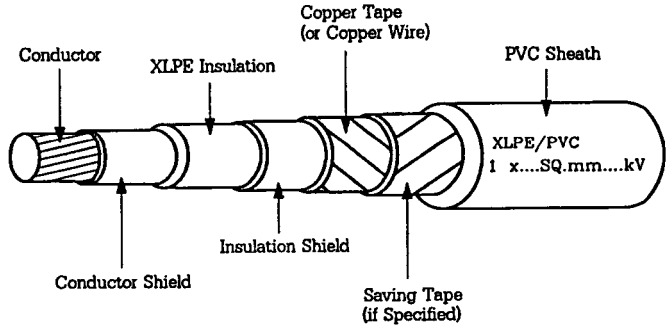
รูปที่ 2.4 แสดงสาย Space Aerial Cable

- **สาย Preassembly Aerial Cable**

สายชนิดนี้จัดเป็นสาย Fully Insulated มีโครงสร้างคล้ายสาย XLPE และสามารถวางใกล้กันได้ จึงใช้สายชนิดนี้ในบริเวณที่มีระยะห่างจากตัวอาคารจำกัดหรือผ่านบริเวณที่มีคนอาศัย

- **สาย Cross-linked Polyethylene (XLPE)**

สายชนิดนี้จัดเป็นสาย fully insulated มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงสาย Cross-Linked Polyethylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวนำ (Conductor) ส่วนใหญ่เป็นทองแดงตีเกลียว ซึ่งอาจจัดอยู่ในรูปแบบของ Copper Concentric Strand

- ชีลด์ของตัวนำ (Conductor Shield) ทำด้วยสารกึ่งตัวนำ มีหน้าที่ช่วยให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับฉนวนกระจายอย่างสม่ำเสมอในแนวรัศมี ช่วยลดการเกิดเบรคดาวน์ได้

- ฉนวน (Insulation) เป็นชั้นที่ห่อหุ้มชีลด์อีกทีหนึ่ง ทำด้วยฉนวน XLPE

- ชีลด์ของฉนวน (Insulation Shield) เป็นชั้นของเทปสารกึ่งตัวนำพันทับชั้นของฉนวน จากนั้นก็หุ้มด้วยชั้นของเทปทองแดงอีกทีหนึ่ง ชีลด์ของฉนวนนี้ทำหน้าที่จำกัดสนามไฟฟ้า ให้อยู่เฉพาะภายในสายเคเบิล เป็นการป้องกันการ รบกวนระบบสื่อสาร นอกจากนี้การต่อชีลด์ลงดิน จะช่วยลดอันตราย จากการสัมผัสถูกสายเคเบิลด้วย และทำให้เกิดการกระจายของแรงดันอย่างสม่ำเสมอเวลาใช้งาน

- เปลือกนอก (Jacket) อาจเป็น Polyvinyl Chloride หรือ Polyethylene ก็ได้แล้วแต่ลักษณะงาน ถ้าเป็นงานกลางแจ้ง มักใช้ Polyvinyl Chloride เพราะเฉื่อยต่อการติดไฟ ขณะที่ Polyethylene มักใช้งานเดินลอย เนื่องจากทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศสายชนิดนี้สามารถเดินลอยในอากาศหรือฝังดินก็ได้แต่นิยมฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานสามารถทนต่อความชื้นได้ดี

2.4 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดี

วัสดุฉนวนที่ดีจะพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

- คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีของวัสดุฉนวน จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง เพื่อทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง ใช้วัสดุน้อย ประหยัด มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว(Tracking) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน หรือการเสื่อมสภาพของฉนวน

- คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความทนต่อแรงกลสูงเนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง ตัวอย่าง เช่น ลูกถ้วยฉนวนยึดสายไฟขึงในอากาศ เป็นต้น ตลอดจนแรงระเบิดจากความดันของก๊าซภายใน

- คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกันขณะเกิดผิดพร่องก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมากมาย ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อนเหล่านี้ได้ ช่วยระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

- มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ไม่เป็นพิษแม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้

- คุณสมบัติของฉนวนที่ดีต้องทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมันทนต่อโอโซนไม่ดูดซึมความชื้น ทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ชนิดของวัสดุฉนวนที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง

สารฉนวนไฟฟ้าอาจแบ่งออกตามสถานะได้เป็น 3 ชนิด คือ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงฉนวนแข็งเท่านั้น

ฉนวนไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดให้มั่นคง หรือรับแรงอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างหรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนก๊าซ และฉนวนเหลวใช้ทำหน้าที่การฉนวนทางไฟฟ้าได้ดี และเพียงพอแต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบทำหน้าที่ยึด รับแรงกล ตัวอย่างง่ายๆ เช่นสายไฟขึงในอากาศใช้อากาศทำหน้าเป็นฉนวน แต่สายไฟจะลอยหรือยึดอยู่ในอากาศได้อย่างไร จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยทำหน้าที่ยึดสายไฟให้มั่นคงห่างจากดิน และสายไฟอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน หรือเคเบิลอัดก๊าซ หรืออัดน้ำมันก็ตามต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวยึดตัวนำ หรือในหม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวหรือก๊าซเป็นฉนวน แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งเพื่อยึดขดลวดต่าง ๆ และแกนเหล็กให้มั่นคง ให้มีระยะห่างตามกำหนดออกแบบ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าการฉนวนแข็งเป็นฉนวนที่สำคัญยิ่งในระบบ และอุปกรณ์ไฟฟ้า ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ ดังนี้

- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Electrical Strength)
- เพอร์มิทติวิตี้ (ε)
- แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเลคตริก ($\tan \delta$)
- ความคงทนต่อแรงกล
- ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี , ความร้อน

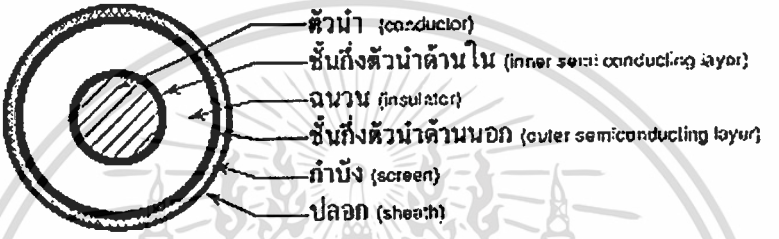
ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีพลังงานสูญเปล่าในไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดจากฟองก๊าซและความชื้น ไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง ทนต่อปฏิกิริยาได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งใช้กันอยู่ทั่วไปอาจได้มาจากสารอินทรีย์ เช่น กระดาษ ผ้า ยาง เป็นต้น หรือสารอนินทรีย์ เช่น ไมก้า แก้ว เซรามิกส์ หรือสารสังเคราะห์ เช่น พลาสติก และโพลิเมอร์ แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงฉนวนสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลิเมอร์เท่านั้น

2.6 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลิเมอร์

สายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าระดับแรงดันสูง ในปัจจุบันนิยมใช้สารชนิดโพลิเมอร์เป็นฉนวน เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตง่ายไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก เนื่องจากโครงสร้างของสายเคเบิลชนิดนี้ไม่ยุ่งยากจึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ และนอกจากนั้นฉนวนชนิดนี้ยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นฉนวนที่ดีอีกด้วยกล่าวคือ มีค่าสนามไฟฟ้าเสียสภาพฉับพลัน (Breakdown Field

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Strength) สูง เช่น ฉนวนโพลิเอทธิลีน (PE) มีค่าสนามไฟฟ้าเสียสภาพฉับพลันสูงถึง 700 กิโลโวลต์/มิลลิเมตร (Intrinsic Breakdown) และนอกจากนั้นยังมีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำมาก เช่นของพีอี $\tan\delta = 2\times10^{-4}$ [6] ด้วยเหตุนี้สารชนิดโพลิเมอร์จึงเป็นสารที่มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนสายเคเบิลที่ดีในทางปฏิบัติค่าสนามไฟฟ้าเสียสภาพฉับพลันของพีอีที่วัดได้จากการทดลอง ไม่สามารถนำไปใช้เป็นคำกล่าวอ้างกับฉนวนสายเคเบิลได้ เนื่องจากเมื่อสายเคเบิลถูกใช้งานภายใต้ภาระแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลานาน ๆ ค่าสนามไฟฟ้าเสียสภาพฉับพลันลดลงอย่างมาก ปัจจุบันฉนวนสายเคเบิลจะถูกออกแบบให้ใช้งานที่สนามไฟฟ้าเพียง 2 ถึง 5 กิโลโวลต์/มิลลิเมตรเท่านั้น [1] จะเห็นได้ว่าเป็นค่าประมาณเพียง 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.6 แสดงภาคตัดขวางของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลิเมอร์

จากรูปที่ 2.6 แสดงภาคตัดขวางของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลิเมอร์แบบแกนเดี่ยว [13] ซึ่งมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้คือ

ตัวนำ : ทำจากอลูมิเนียมหรือทองแดงตีเกลียว เพื่อให้มีความอ่อนตัว ทำหน้าที่เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้า

ฉนวน : เป็นสารโพลิเมอร์ ทำหน้าที่ฉนวนกั้นศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับดิน (Ground)

กำบัง : ทำจากทองแดง และจะต่อลงดิน ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวสร้างให้เกิดสนามสมมาตรรูปทรงกระบอก (Cylindrical symmetrical field) และเป็นทางเดินกลับของกระแสไฟฟ้า ในกรณีที่เกิดการลัดวงจร ดังนั้นจึงต้องมีพื้นที่หน้าตัดรวมใหญ่เพียงพอที่จะนำ กระแสลัดวงจรในเวลาอันสั้นได้

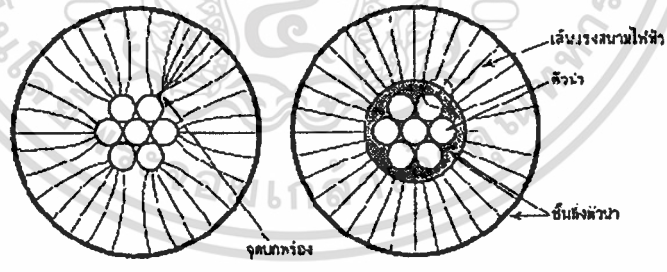
ปลอก : อาจทำจาก พีวีซี (PVC = Polyvinylchloride) หรือ พีอี หรือโลหะก็ได้ ทำหน้าที่ป้องกันสายเคเบิลจากแรงกระทำทางกลภายนอกและป้องกันการซึมของน้ำที่จะเข้าไปทำอันตรายต่อฉนวนสายเคเบิล

ชั้นกึ่งตัวนำด้านใน และชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก : ในสายเคเบิลใต้ดินแบบเก่า จะใช้ผงกราไฟต์และเทปตัวนำพันรอบ ๆ ในชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก แต่ในเทคนิคของสายเคเบิลใต้ดิน แบบใหม่ จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับฉนวนผสมด้วยผงกราไฟต์หรือผงถ่าน ซึ่งทำให้ส่วนนี้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น ชั้นกึ่งตัวนำทั้งสองทำหน้าที่ให้เกิดสนามสมมาตรรูปทรงกระบอก เพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากความไม่เรียบของผิวตัวนำ และของกำบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า สาเหตุของการเกิดเบรกดาวน์ในสายเคเบิล คือความเครียดทางไฟฟ้า อันเกิดมาจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายสนามไฟฟ้า และในกรณีของสายเคเบิลใต้ดิน องค์ประกอบต่างๆของโครงสร้างถูกจัดวางเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าสมมาตรรูปทรงกระบอกภายในชั้นฉนวน โดยจัดโครงสร้างของตัวนำ ชั้นฉนวน และกำบังอยู่ในรูปทรงกระบอกร่วมศูนย์ (Concentric Cylinder) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติไม่อาจหลีกเลี่ยงความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าของทรงกระบอก อันเกิดเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพขององค์ประกอบต่างๆ ได้ ตัวอย่างของความไม่สมบูรณ์ได้แก่ ผิวของตัวนำซึ่งไม่เป็นทรงกระบอกที่เรียบจริง เพราะเกิดจากการตีเกลียวของตัวนำหลาย ๆ เส้น หรือแม้แต่ผิวของตัวนำแต่ละเส้นอาจจะมีปลายแหลม (Protrusion) เกิดขึ้นมาได้ อันเนื่องมาจากขบวนการผลิตตัวนำหรือผิวหน้าของกำบัง (Screen) ก็อาจจะเกิดความไม่สมบูรณ์ได้เช่นกันซึ่งความไม่สมบูรณ์เหล่านี้เราอาจจะเรียกรวม ๆ กันได้ว่าเป็นความผิดพลาดทางเรขาคณิตของโครงสร้างซึ่งจะนำไปสู่ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายสนามไฟฟ้า

ดังนั้นในเทคนิคของสายเคเบิลใต้ดิน จะใช้วัสดุฉนวนผสมด้วยผงถ่านหรือกราไฟต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้ามาหุ้มตัวนำที่ตีเกลียวแล้วก่อน เพื่อขจัดความผิดพลาดทางเรขาคณิตของตัวนำ ซึ่งจะเรียกโครงสร้างชั้นนี้ว่าชั้นกึ่งตัวนำด้านใน ในทำนองเดียวกันก่อนที่จะหุ้มกำบังกับชั้นของฉนวน ก็จะมีการหุ้มด้วยชั้นกึ่งตัวนำอีกชั้นหนึ่งก่อนโดยเรียกโครงสร้างชั้นนี้ว่า ชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก ดังรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบตัวนำ หลังจากหุ้มตัวนำที่มีความผิดพลาดทางเรขาคณิตด้วยชั้นกึ่งตัวนำแล้ว



รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลเมื่อไม่มี และมีชั้นกึ่งตัวนำ

เทคนิคของการผลิตสายเคเบิลแบบโพลิเมอร์ที่มีชั้นกึ่งตัวนำอยู่ทั้ง 2 ด้านของฉนวนเรียกว่า Triple Extrusion ซึ่งหมายถึง การฉีดสารหุ้มตัวนำพร้อมกันทั้ง 3 ชั้นคือ ชั้นกึ่งตัวนำด้านในฉนวน และชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก

ผลดีอีกข้อหนึ่งของการใช้ชั้นกึ่งตัวนำที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกับฉนวนผสมผงถ่ายคือ การป้องกันช่องว่างที่จะเกิดขึ้นระหว่างตัวนำกับฉนวน และกำบังกับฉนวนดังรูปที่ 2.7 สาเหตุของการเกิดช่องว่างคือ เมื่อมีกระแสไหลในสายตัวนำจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ถ้าชั้นกึ่งตัวนำเป็นวัสดุต่างชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับแทนความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นกึ่งตัวนำกับฉนวนช่องว่างหรือช่องอากาศที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องจาก ค่าเพอร์มิทติวิตี้สัมพัทธ์ต่ำกว่าฉนวน จึงทำให้มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติและจะทำให้เกิดการคายประจุบางส่วน (Partial Dischargeหรือ PD) ในช่องว่างนั้น แต่เมื่อชั้นกึ่งตัวนำเป็นฉนวนชนิดเดียวกับแนว จึงมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากันจึงไม่ทำให้เกิดช่องว่าง และไม่เกิดการคายประจุบางส่วนขึ้น

2.6.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของสารฉนวนโพลิเมอร์

สารฉนวนโพลิเมอร์ คือ ฉนวนของสายเคเบิลที่ทำจากสารประเภทพลาสติก เช่น พีวีซี และพีอี ชนิดต่าง ๆ โครงสร้างทางโมเลกุลของสารเหล่านี้ซับซ้อน และโครงสร้างโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารแต่ละชนิด จะใช้แบบจำลองอย่างง่ายในการอธิบายให้เข้าใจถึงคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของสารเหล่านี้เท่านั้น

2.6.2 วัสดุที่มีความเป็นโพลิเมอร์สูง

วัสดุฉนวนชนิดเป็นโพลิเมอร์สูง จะประกอบไปด้วยโมเลกุลแบบมาโคร (Macromolecule) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โมเลกุลลูกโซ่ (Chain Molecule) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมหลายร้อยกลุ่มเป็นอย่างน้อย รูปแบบของการเรียงตัวแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

แบบที่ 1 แบบหนึ่งมิติ (One-Dimension) การเรียงตัวเป็นไปเฉพาะตามแนวยาวเท่านั้น การเรียงตัวของกลุ่มอะตอมเป็นโมเลกุลลูกโซ่แบบนี้ มีชื่อเรียกวัสดุชนิดนี้ว่าเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสต์ (Thermoplast) หรือ เทอร์โมอิลาสต์ (Thermoelast) สาเหตุเนื่องจากโมเลกุลลูกโซ่ที่เกิดขึ้นไม่สามารถเรียงตัวกันได้ยาวตลอด จะมีส่วนที่ผิดรูปออกไปเล็กน้อย โมเลกุลเหล่านี้จึงสามารถเคลื่อนตัวได้เล็กน้อยเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก เช่น พลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้วัสดุชนิดนี้อ่อนตัวลงได้ และกลับเข้าสู่สภาพเดิมได้ในขณะเดียวกันมันจะสามารถเปลี่ยนรูปได้ง่ายตามแรงกล ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จึงสามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยวิธีการฉีด (Extrusion)

แบบที่ 2 แบบสองมิติ (Two-Dimension) เป็นการเรียงตัวในลักษณะที่ทำให้เกิดเป็นพื้นที่ของโมเลกุลมาโคร

แบบที่ 3 แบบสามมิติ (Three-Dimension) การเรียงตัวของกลุ่มอะตอม ทำให้เกิดเป็นกลุ่มโมเลกุลในทุกทิศทางโดยโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ข้างเคียงจะเชื่อมต่อกันด้วยกรรมวิธีทางเคมี ซึ่งเราเรียกว่าการต่อโมเลกุล (Intermolecular) หรือการเชื่อมต่อแบบไขว้ (Cross Linking) เมื่อการเชื่อมต่อแบบไขว้ในวัสดุใด ๆ มีความหนาแน่นน้อยวัสดุนั้นเรียกว่า วัสดุชนิดอิลาสโทเมอร์(Elastomer) และถ้าวัสดุใดมีโครงสร้างของการการเชื่อมต่อแบบไขว้ที่มีความหนาแน่นมาก วัสดุนั้นเรียกว่า วัสดุชนิดดูโรพลาสต์ (Duroplast) วัสดุชนิดนี้เมื่อได้รับความร้อนที่สูงมากจะเสียคุณสมบัติทางกลโดยสิ้นเชิง และไม่สามารถกลับเป็นรูปเดิมได้ ดังนั้นการขึ้นรูปของวัสดุชนิดนี้จึงสามารถทำได้ด้วยวิธีการอัด (Press) หรือวิธีการหล่อเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการ (Process) ของการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมนี้เรียกว่า โพลิรีแอกชั่น (Polyreaction) สามารถแยกขบวนการได้เป็น 3 ขบวนการ คือ

- โพลิเมอไรเซชั่น (Polymerisation) เป็นขบนการเรียงตัวที่เกิดจากกลุ่มอะตอมที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) กลุ่มเดียวกันหรือชนิดที่เหมือนกัน ซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้มีคุณสมบัติการเรียงตัวในยาวเท่านั้น ถ้าขบวนการการเรียงตัวเกิดจากโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดเรียกว่า โมโนโพลิเมอร์ไรเซชั่น (Monopolymerisation) ถ้าการเรียงตัวเกิดจากโมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเรียกว่า โคโพลิเมอไรเซชั่น (Copolymerisation)

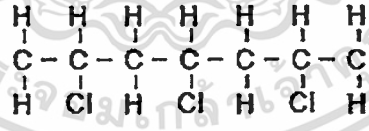
- โพลิคอนเดนเซชั่น (Polycondensation) เป็นขบวนการที่ตรงกันข้ามกับขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชั่น กล่าวคือ เป็นการเรียงตัวของโมโนเมอร์ที่ไม่เหมือนกัน โดยมากขบวนการเรียงตัวชนิดนี้จะก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างกลุ่มอะตอมได้ จึงไม่เหมาะจะใช้เป็นวัสดุฉนวนในระดับแรงดันสูง

- โพลิแอดดิชั่น (Polyaddition) เป็นขบวนการการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมสารประกอบกับอะตอมไฮโดรเจน

ในงานวิจัยนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างของวัสดุฉนวนโพลิเมอร์ที่สำคัญที่ใช้เป็นฉนวนสายเคเบิลเท่านั้น

2.6.3 พีวีซี (Polyvinylchloride : PVC)

พีวีซีเกิดขึ้นจากขบวนการเรียงตัวของโมโนเมอร์แบบโพลิเมอร์ไรเซชั่น และเรียงตัวในแบบหนึ่งมิติ ดังนั้น พีวีซี จึงจัดเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสต์ มีโครงสร้างพื้นฐานทางเคมี เป็นโมเลกุลลูกโซ่ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และคลอรีน (Cl) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงโมเลกุลลูกโซ่ของพีวีซี

จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของพีวีซี จะเห็นได้ว่าด้านบนของลูกโซ่ ประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนอย่างเดียว ในขณะที่ด้านล่างของลูกโซ่จะประกอบด้วยอะตอมไฮโดรเจน และคลอรีนสลับกันไป ความแตกต่างกันอย่างมากในขนาดของอะตอมไฮโดรเจนด้านบนและอะตอมคลอรีนในด้านล่างจะทำให้เกิดไดโพล (Dipole) ขึ้นในโมเลกุลลูกโซ่นี้ ดังนั้น พีวีซีจึงจัดเป็น สารมีขั้ว (Polar Material)

สารมีขั้วเมื่อยู่ภายใต้ภาระแรงดันที่มีการกลับขั้วตลอดเวลา เช่น แรงดันกระแสสลับจะทำให้เกิดการกลับขั้วของไดโพล ซึ่งจะทำให้สารมีนี้ค่าตัวประกอบสูญเสีย(Dissipation Factor or Tan δ) สูงนอกจากนี้ยังมีสภาพยอม (Permittivity or ε_r) สูงมากเช่นกัน พีวีซีที่ใช้ในสายเคเบิลมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\varepsilon_r \cong 6$ และเมื่อใช้งานที่ความถี่ 50 เฮริทซ์ มี $\tan\delta$ ประมาณ 300 ถึง 500 x 10^{-4} ซึ่งนับว่าสูงมาก[7] จากสมการของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริก

$$P_D = \omega C U^2 \tan\delta \qquad (2.1)$$

โดยที่ U เป็นแรงดันไฟฟ้า $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f เป็นความถี่ และ C เป็นค่าความจุไฟฟ้ารวมของสายเคเบิล (ซึ่งแปรผันโดยตรงกับ ε_r)

จะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบสูญเสีย ($\tan\delta$) ของวัสดุฉนวนใดๆ เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนนั้นๆ จากสมการกำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริกนั้นเนื่องจาก พีวีซีมีค่า $\tan\delta$ และ ε_r ค่อนข้างสูง จึงทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียไดอิเล็กตริกในพีวีซีสูง และเนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริกแปรผันโดยตรงกับแรงดันกำลังสอง ดังนั้นพีวีซีจะถูกจำกัดให้ใช้งานได้ที่แรงดันต่ำเท่านั้น โดยทั่วไปจะจำกัดที่แรงดันสูงไม่เกิน 10 กิโลโวลต์ สนามไฟฟ้าภายในฉนวนเคเบิลชนิดพีวีซีจะอยู่ที่ค่าประมาณ 2.5 ถึง 3 กิโลโวลต์/มิลลิเมตร ซึ่งหากความยาวของสายไม่มาก (ความจุมีค่าต่ำ) อาจจะใช้งานได้ที่แรงดันสูงถึง 20 กิโลโวลต์ [6]

ในระดับแรงดัน 1 กิโลโวลต์ 3 กิโลโวลต์ และ 6 กิโลโวลต์ สายเคเบิลที่ใช้ฉนวนพีวีซี จะใช้ได้ดี มีราคาถูก และมีความเชื่อถือได้มาก อุณหภูมิใช้งานสูงสุดของสายตัวนำเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นพีวีซียังนิยมนำมาใช้เป็นปลอกของสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูง ๆ

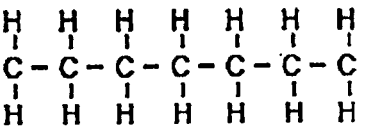
2.6.4 พีอี(Polyethylene : PE)

โพลิเอทธิลีน เกิดขึ้นจากขบวนการเรียงตัวแบบโพลิเมอไรเซชั่นของกลุ่มอะตอมโมโนเมอร์-เอทธิลีน (Ethylene, C_2H_4) โดยการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมในแนวยาว ดังรูปที่ 2.9 พีอีจัดเป็นสารประเภทโทโมพลาสต์เช่นกัน จากลักษณะโครงสร้างของพีอีเห็นได้ว่า ส่วนบนและส่วนล่างของโมเลกุลลูกโซ่เป็นอะตอมของไฮโดรเจนอย่างเดียว จึงมีความสมมาตรของลูกโซ่ จึงจัดอยู่ในสาร ไม่มีขั้ว(Non-Polar Material) ผลดังกล่าวจึงทำให้พีอีมีค่า ε_r ต่ำ ($\varepsilon_r \approx 2.3$) และค่าสูญเสีย ไดอิเล็กตริกต่ำด้วย ($\tan\delta = 1\times10^{-4}$) ซึ่งน้อยกว่าพีวีซีประมาณ 300 ถึง 500 เท่า จากผลการวิจัยเป็นลำดับมาพบว่า พีอีมีค่า $\tan\delta$ ต่ำที่สุด และมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Breakdown Field Strength) สูงมาก ดังนั้นพีอีจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากในการใช้เป็นวัสดุฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน

ลักษณะโครงสร้างที่สำคัญของพีอีที่ใช้เป็นวัสดุฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินนั้น สามารถแบ่งแยกได้อีก 3 ชนิด คือ

- เอชดีพีอี (HDPE)
- แอลดีพีอี (LDPE)
- เอ็กซ์แอลพีอี (XLPE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงโมเลกุลลูกโซ่พีอี (PE)

2.6.4.1 เอชดีพีอี (High-density polyethylene : HDPE or Linear PE)

เอชดีพีอี มีลักษณะเฉพาะคือ มีโครงสร้างเป็นโมเลกุลลูกโซ่ยาวขนาดกันโดยตลอด โดยมีแขนง (Branch) หรือการเชื่อมต่อระหว่างลูกโซ่ที่อยู่ใกล้กันน้อยมาก (เพียงประมาณ 5 จุด ต่อ 1000 อะตอมของคาร์บอน) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความหนาแน่นโมเลกุลจึงสูงและมีความถ่วงจำเพาะสูง (ประมาณ 0.95 กรัม/ลูกบาศก์เซนต์เมตร) มีความผิดพลาดของผลึกน้อยจึงมีค่า tan δ ต่ำ (สารไม่มีขั้ว) และเป็นสารเทอร์โมพลาสต์ที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูงคือ 130-135 องศาเซลเซียส จึงทำให้สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส

ข้อเสียของเอชดีพีอี คือ เนื่องจากมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูง จึงเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากไม่อ่อนตัว ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายได้ง่าย เมื่อต้องรับแรงกระทำ เช่น การโค้งงอขณะวางสาย ข้อเสียดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันไม่มีการนำเอาเอชดีพีอีมาใช้เป็นสารฉนวนเคเบิลใต้ดิน

รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างผลึกของเอชดีพีอี (HDPE)

2.6.4.2 แอลดีพีอี (Low-density polyethylene : LDPE or Branched PE)

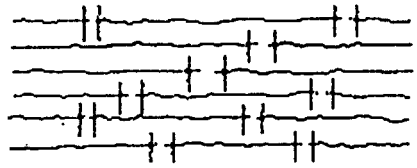
แอลดีพีอี มีลักษณะเฉพาะเพิ่มเติมจากเอชดีพีดี คือ มีแนวหรือการเชื่อมต่อของโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ใกล้กันในบริเวณใกล้เคียง กับแขนงหลักมากกว่าของเอชดีพีอี (ประมาณ 30 จุดต่อ 1000 อะตอมคาร์บอน) แต่จะไม่มีการเชื่อมต่อของโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ใกล้กัน ดังแสดงในรูป 2.11 ดังนั้นจึงทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกับเอชดีพีอี แต่ความหนาแน่นของโมเลกุลและความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า (ประมาณ 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส) จึงมีความอ่อนตัวมากกว่า และสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือเพียง 70 องศาเซลเซียส

เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นแอลดีพีอีจึงมีข้อเสียคือ เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นอุณหภูมิของสายอาจจะสูงถึงจุดหลอมเหลวของมัน ทำให้แอลดีพีอีหลอมละลายจนมีลักษณะคล้ายน้ำผึ้ง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้แอลดีพีอีไม่สามารถรับน้ำหนักของสายตัวนำที่อยู่ตรงกลางสายเคเบิลได้ ทำให้ตัวนำเลื่อนมาชิดของด้านล่าง และสายเคเบิลจะสูญเสียความสม่ำเสมอของระยะฉนวน นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60972

เกิดความผิดพลาดทางเรขาคณิตของโครงสร้างสายเคเบิล ทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะนำไปสู่การเบรคดาวน์ได้ถ้ามีการป้อนแรงดันอีกครั้งหนึ่งหลังจากการแก้ไขการลัดวงจรแล้ว

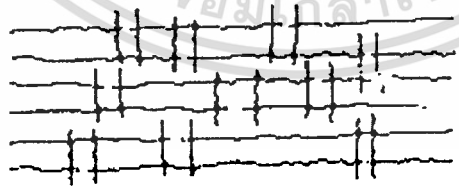


รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างผลึกของแอลดีพีอี

2.6.4.3 เอ็กซ์แอลพีอี(Cross-linked polyethylene : XLPE)

ดังแสดงในรูปที่ 2.12 การแตกแขนงของสารเอ็กซ์แอลพีอี จะมีลักษณะเหมือนกับของแอลดีพีอี (คือมีประมาณ 30 จุดต่อ 1000 อะตอมของคาร์บอน) ซึ่งทำให้สารทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของโมเลกุล ความถ่วงจำเพาะ และจุดหลอมเหลวเหมือนกัน แต่ด้วยวิธีการทางเคมีที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงโดยการไขว้ (Cross Linking) โมเลกุลลูกโซ่ที่ใกล้เคียงกันของแอลดีพีอีจะเชื่อมโยงกัน ทำให้เกิดเป็นลักษณะเป็นโครงตาข่าย ซึ่งรูปแบบของการเรียงตัวของโมเลกุลลูกโซ่ แบบสามมิติ (Three-Dimension) ดังรูปที่ 2.12 แสดงให้ดูได้เพียง 2 มิติเท่านั้น ดังนั้นแอลดีพีอีที่ผ่านขบวนการเชื่อโยงโมเลกุลลูกโซ่แบบไขว้ จึงมีชื่อว่า เอ็กซ์แอลพีอี

การเชื่อมโยงของโมเลกุลลูกโซ่นี้เป็นผลให้เอ็กซ์แอลพีอีไม่หลอมละลายแม้อุณหภูมิสูงถึง 115 องศาเซลเซียส แต่จะเปลี่ยนสถานะเป็นยางอิลาสติก เนื่องจากเอ็กซ์แอลพีอีมีการเรียงตัวเป็นแบบสามมิติ จึงจัดเป็นสารประเภทอิลาสโตเมอร์ ดังนั้นเอ็กซ์แอลพีอีเมื่อเปรียบกับแอลดีพีอีจึงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลที่ดีเท่ากัน แต่สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงในปัจจุบันเอ็กซ์แอลพีอี เป็นวัสดุฉนวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลิเมอร์

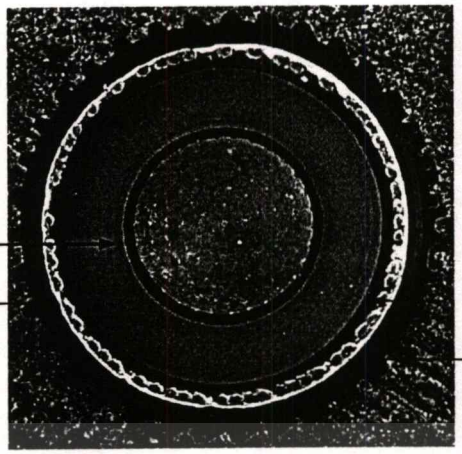


รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างผลึกของเอ็กซ์แอลพีอี (XLPE)

2.7 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE

สายเคเบิลใต้ดินที่นำมาใช้กับแรงดันต่ำ แรงดันปานกลาง และแรงดันสูง จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นแตกต่างกัน แต่ละชั้นจะมีหน้าที่พิเศษสำหรับการใช้งานเป็นของตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงส่วนต่างๆข องสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

2.7.1 ตัวนำ (Conductor)

อาจเป็นได้ทั้งทองแดงหรืออลูมิเนียม แต่โดยส่วนมากใช้ตัวนำทองแดง ตัวนำจะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดความร้อน (I^2R) ถ้ามีกระแสไหลมากๆ หรือสายมีความต้านทานสูง ก็จะเกิดความร้อนสูง ความร้อนนี้จะกระจายผ่านส่วนต่างๆ ของสายไฟฟ้าส่วนที่ห่อหุ้มตัวนำ การระบายความร้อนนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้หุ้มสายและอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ

2.7.2 Conductor Screen

เป็นวัสดุกึ่งตัวนำทำหน้าที่คล้าย Stress control คือ กระจายสนามไฟฟ้าไม่ให้หนาแน่น ณ จุดใดจุดหนึ่ง และยังทำหน้าที่ลดช่องว่างระหว่างสายตัวนำกับฉนวนอีกด้วย ในเคเบิลที่มีขนาด 10 kV ขึ้นไป ผิวสายตัวนำต้องเรียบและจับยึดกับฉนวนเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบผิวของสายตัวนำด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ระหว่างผิวสายตัวนำกับฉนวน เพื่อควบคุมเส้นแรงไฟฟ้าบนผิวสายตัวนำและไม่ให้เกิดมีโพรงอากาศใดๆ บนผิวตัวนำกับฉนวนขณะที่สายตัวนำมีการโค้งงอหรือเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากความร้อน นอกจากนั้นเหนือผิวนอกของฉนวน XLPE ระหว่าง Screen ต้องเคลือบผิวด้วย Semi conductor เพื่อป้องกันการเกิด Partial Discharge การเคลือบผิวสายตัวนำนอกและผิวนอกของฉนวน XLPE ด้วย Semiconductor จะกระทำในระหว่างกระบวนการหลอมละลาย (Extruding Process)

2.7.3 Insulation คือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า

มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น PVC, Silicone Rubber, Polyethylene and Cross-link polyethylene (XLPE) เป็นต้น ความหนาแน่นของฉนวนจะเหมาะสมกับระดับแรงดันที่ใช้ คุณสมบัติของฉนวนที่ดีควรเป็นดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- High Dielectric Strength คือมีค่าความต้านทานสูงต่อแรงดันไฟฟ้า

- Low Dielectric Constant หรือ Specific Inductive Capacitance ถ้ามีค่าต่ำจะให้เกิดค่า Capacitance ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ต่ำด้วย เนื่องจากถ้า Capacitance มีค่าสูง ค่าสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วย

- Low Power Factor เนื่องจากกระแสสลับจะทำให้เกิดค่า Leakage Current ในฉนวน เป็นผลให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนซึ่งเรียกว่า Dielectric Loss อัตราของ Dielectric Loss ต่อ Apparent Loss คือ Power Factor เนื่องจากค่า Dielectric Loss เป็นค่าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ ถ้ามีค่านี้ต่ำจะเป็นผลทำให้ Power factor ต่ำด้วยเรา จึงอาจดูค่าของ Dielectric Loss ได้จากค่า Power factor

- Moisture Resistance ต้องมีค่าสูงหรือค่าความต้านทานต่อความชื้นสูงเพราะถ้าความต้านทานต่อความชื้นต่ำ วัสดุก็จะดูดซึมความชื้นได้มาก จะเป็นผลให้คุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลงและเสื่อมสภาพในที่สุด

- High Resistance to Heat ฉนวนควรทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ เมื่อสายตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อนได้ดังกล่าวแล้วในตอนต้น ถ้าฉนวนทนความร้อนได้สูงสายไฟฟ้านั้นก็จะนำกระแสได้มากด้วย

- High Resistance to Corona Damage ดังที่ได้กล่าวแล้วในตอนต้นว่า ระหว่างสายตัวนำกับ Shield จะมีลักษณะเป็น Capacitance และจะมีความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ในกรณีที่เกิดมีช่องอากาศขึ้นในฉนวน (Void) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างผนังของช่องอากาศด้านที่อยู่ใกล้กับ Shield กับด้านที่อยู่ใกล้ตัวนำจะทำให้อากาศใน Void นั้นเกิด Corona Discharge ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียอีกด้วย ฉนวนบริเวณนั้นจะเกิดความร้อนและไหม้กลายเป็น Carbon และ Void นี้ก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งฉนวนเกิด Breakdown และใช้ไม่ได้อีกต่อไป แต่อาการแบบนี้จะเกิดขึ้นและขยายตัวไปได้ค่อนข้างช้าในระยะแรกที่ทำการติดตั้งใหม่ๆ จึงไม่เกิดสภาพเช่นนี้ ในการผลิตและการใช้งานควรมีการทดสอบค่า Corona Discharge ไม่ให้มีค่ามากจนอาจเกิดอันตรายได้ในช่วงระยะอายุการใช้งานของสายไฟฟ้า

2.7.4 Insulation Screen

เป็นชั้นบางๆ หุ้มฉนวนอีกทีหนึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Conductive Material) อาจเป็นสารจำพวก Carbon Impregnated Cloth Tape or Conducting Extruded Plastic ทำหน้าที่คล้ายกับ Conductor Screen โดยมีหน้าที่หลักอยู่ 3 ประการ คือ ลดการเกิด Discharge ระหว่างผิวของฉนวนกับ Ground ลดค่า Radio Frequency Interference และเพื่อความปลอดภัยต่อบุคคลอื่นอาจสัมผัสถูกสายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 มาตรฐานการทดสอบ

2.8.1 ทดสอบWater Absorption ที่ระบุไว้ใน IEC 605022.71

อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มใช้อุณหภูมิที่ $-5°C$ ของอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำในขณะที่ใช้งานปกติ แต่ต้องไม่เกิน $90°C$ ในการทดสอบสายเคเบิ้ลจะมี 2 ประเภทคือ

- สำหรับสายเคเบิ้ลที่มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 ตารางมิลลิเมตร ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะเป็นสายเคเบิ้ลทั้งเส้น (ลวดตัวนำ + ฉนวน) ยาว 300 มิลลิเมตร
- สำหรับสายเคเบิ้ลที่มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมากกว่า 25 ตารางเซนติเมตร ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะเป็น ฉนวนสายเคเบิ้ลที่สไลด์เป็นแผ่น ขนาด กว้าง 4-5 มิลลิเมตร ยาว 80 - 100 มิลลิเมตร หนา 0.6 - 0.9 มิลลิเมตร

เวลาที่ใช้ในการต้มสำหรับชิ้นงานแบบที่ 1

ถ้าชิ้นงานหนาน้อยกว่า	1	มิลลิเมตร	ใช้เวลา 2 สัปดาห์
ถ้าชิ้นงานหนาระหว่าง	1.1-1.5	มิลลิเมตร	ใช้เวลา 3 สัปดาห์
ถ้าชิ้นงานหนามากกว่า	1.5	มิลลิเมตร	ใช้เวลา 4 สัปดาห์

เวลาที่ใช้ในการต้มสำหรับชิ้นงานแบบที่ 2

ใช้เวลา 14 วัน ในการต้ม

2.8.2 ขั้นตอนในการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502

- **สำหรับชิ้นงานทดสอบประเภทที่** 1 ทำความสะอาดและทำชิ้นงานให้แห้งโดยนำเข้าเตาอบความดันต่ำ (ไม่เกิน 6.6 มิลลิบาร์) ที่อุณหภูมิ $70 \pm 2°C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาทำให้เย็นใน Desiccator แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเก็บค่าไว้เป็น M1

นำชิ้นงานมาพันรอบด้ามจับ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 6-8 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสายเคเบิ้ล (รวมฉนวน) แล้วดัดให้เป็นรูปตัว U และเอาปลายทั้งสองข้างสอดผ่านรูของฝาของภาชนะแก้วขึ้นมา โดยอนุญาตให้มีแค่ชิ้นงานทดสอบ 2 ชิ้นที่มีแกนเดียวกันเท่านั้นในภาชนะแก้ว 1 ใบ

ปรับตำแหน่งของชิ้นงานโดยให้ประมาณ 250 มิลลิเมตรของความยาวจุ่มอยู่ในน้ำในภาชนะแก้ว ทำการต้มชิ้นงานที่อุณหภูมิและเวลาตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของสายที่นำมาทดสอบแต่ถ้ามาตรฐานไม่ได้กำหนดก็ให้ใช้อุณหภูมิและเวลาตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานนี้

เอาชิ้นงานออกก่อนที่น้ำจะเย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง สะบัดและเช็ดหยดน้ำออกอย่างนุ่มนวลโดยกระดาษพิเศษที่ไม่มีขุยแล้วทำการชั่งน้ำหนักเก็บค่าไว้เป็น M2 ภายใน 2-3 นาทีหลังจากที่นำออกมาจากการต้ม ทำการทำความสะอาดและทำชิ้นงานให้แห้งตามเงื่อนไขที่ทำก่อนการนำไปต้ม นำมาชั่งน้ำหนักเก็บค่าไว้เป็น M3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า M1 , M2 , M3 ไปคำนวณตามสูตร

ถ้า M1 มากกว่า M3 ใช้สูตร (M2 – M3) / A

ถ้า M1 น้อยกว่า M3 ใช้สูตร (M2 – M1) / A

โดย A หมายถึงพื้นที่ผิวของชิ้นงานที่จุ่มอยู่ในน้ำ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

- **สำหรับชิ้นงานทดสอบประเภทที่ 2** ทำความสะอาดชิ้นงานและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $70 \pm 2°C$ ภายใต้สูญญากาศ (หรือความดันประมาณ 1 มิลลิบาร์) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยในการอบแต่ละครั้งชิ้นงานที่เข้าตู้อบได้จะต้องเป็นชิ้นงานที่มีวัสดุประเภทเดียวกันเท่านั้น หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกทำให้เย็นเป็นเวลา 1 ชั่วโมงใน Desiccator และนำไปชั่งน้ำหนักเก็บค่าไว้เป็น M1

ชิ้นงานจะถูกนำมาจุ่มในน้ำที่ผ่านการลดประจุแล้ว (Deionized) หรือน้ำกลั่น (Distilled) ที่อุณหภูมิและเวลาตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของสายที่นำมาทดสอบ แต่ถ้ามาตรฐานไม่ได้กำหนดก็ให้ใช้อุณหภูมิและเวลาตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานนี้

ชิ้นงานแต่ละชิ้นจะต้องถูกจุ่มอย่างสมบูรณ์ในแก้วที่ถูกติดตั้งกับเครื่องควบแน่น หรือในบีกเกอร์ที่ถูกปิดด้วยฝาแก้ว (ถ้าเครื่องควบแน่นถูกใช้ ที่ด้านบนของเครื่องจะต้องถูกปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันความสกปรกต่างๆ)

หลังจากต้มเสร็จแล้วชิ้นงานจะถูกโยกย้ายไปสู่น้ำที่ลดประจุแล้ว หรือน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้องและทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลง หลังจากนั้นนำขึ้นจากน้ำ สะบัดและเช็ดหยดน้ำออกอย่างนุ่มนวลแล้วทำการชั่งน้ำหนักเก็บค่าไว้เป็น M2

ทำการทำความสะอาดและทำชิ้นงานให้แห้งตามเงื่อนไขที่ทำก่อนการนำไปต้ม นำมาชั่งน้ำหนักเก็บค่าไว้เป็น M3

นำค่า M1 , M2 , M3 ไปคำนวณตามสูตร

ถ้า M1 มากกว่า M3 ใช้สูตร (M2 – M3) / A

ถ้า M1 น้อยกว่า M3 ใช้สูตร (M2 – M1) / A

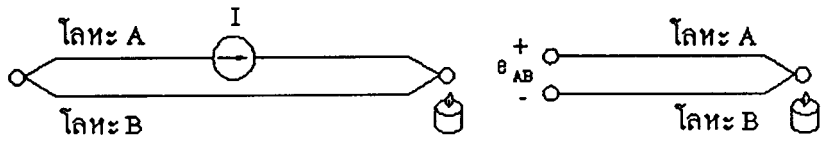
โดย A หมายถึง พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่จุ่มอยู่ในน้ำ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร[3]

2.9 หลักการควบคุมอุณหภูมิ

2.9.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

หลักการของเทอร์โมคัปเปิลมีอยู่ว่า เมื่อนำลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองนี้ โดยปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อข้างหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายด้านที่เปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า “ซีเบ็ค โวลต์เตจ” (Seebeck Voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงวงจร "ซีเบ็ค โวลต์เตจ"

ปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$e_{AB} = \alpha \Delta T \qquad (2.2)$$

เมื่อ e_{AB} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ (Seebeck Voltage)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) เป็นค่าคงที่ มีหน่วยเป็น Volt/K

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง

กฎการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Laws)

- กฎของวงจรโลหะชนิดเดียวกัน (Law of the Homogeneous Circuit) ในวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยโลหะชนิดเดียวกัน จะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ณ ปลายจุดต่อทั้งสอง กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในกรณีที่ลวดทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกันเท่านั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง

- กฎของโลหะแทรก (Law of Intermediate Metals) ในวงจรเทอร์โมคัปเปิล ถ้ามีโลหะแทรกอยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจร หากจุดต่อของปลายโลหะแทรกทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากันแล้ว โลหะแทรกนี้จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติมีอยู่เสมอ เช่น ข้อต่อ หรือสายทองแดงที่ใช้ต่อเข้ามิเตอร์

- กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of Intermediate Temperature) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลชุดใดๆ ที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน จะมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชุดนั้น

ปรากฏการณ์ของเทอร์โมคัปเปิล (Phenomena) ที่ควรทราบ

- ในเทอร์โมคัปเปิลคู่เดียวกัน อุณหภูมิที่มีผลคือ อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองเท่านั้น อุณหภูมิบนจุดต่าง ๆ ตามสายจะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

- การต่อขนานเทอร์โมคัปเปิลเข้าด้วยกัน ผลที่ได้คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ย

- การต่อเทอร์โมคัปเปิลสองชุดกลับขั้วกันเป็นการวัดผลต่างของอุณหภูมิ

- การเพิ่มเทอร์โมคัปเปิลที่จุดวัดอุณหภูมิหนึ่ง จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล แรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชุด

2.9.1.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

เทอร์โมคัปเปิลมีหลายชนิด (Type) ให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิ และลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละชนิดนี้ เกิดจากการเลือกใช้คู่ของวัสดุ (Element) ของโลหะ ที่จะนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันให้แตกต่างกัน เพราะโลหะแต่ละชนิดย่อมมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวของมันอยู่แล้ว เมื่อนำโลหะชนิดต่าง ๆ กันมาจับคู่เข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลที่ได้แตกต่างกันไป นอกจากนี้ ได้มีการทดลองผสมโลหะต่างชนิดกันเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเดิมให้ดีขึ้น หรือเพื่อใช้แทนโลหะบางชนิดที่ใช้อยู่เดิม เช่น แพลทินัม เนื่องจากมีราคาสูง ตัวอย่างโลหะผสมที่เกิดขึ้น เช่น

โครเมล (Cromel) คือ นิกเกิล 90% + โครเมียม 10%

อลูเมล (Alumel) คือ นิกเกิล 95% + อลูมิเนียม 2% + แมงกานีส 2% +ซิลิคอน 1%

คอนสแตนแตน (Constantan) คือ ทองแดง 60% + นิกเกิล 40% เป็นต้น

การใช้งานเทอร์โมคัปเปิล ควรเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับงานนั้น ๆ โดยสิ่งที่ควรพิจารณามีหลายข้อ เช่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน, ราคา, ความกัดกร่อนของสารที่เทอร์โมคัปเปิลสัมผัส, ลักษณะบรรยากาศที่เป็น Oxidizing, Reducing, Inert หรือ Vacuum เป็นต้น

2.9.1.2 ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล

2.9.1.2.1 เทอร์โมคัปเปิล คือส่วนที่นำเส้นลวด 2 เส้นมาเชื่อมต่อกันด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อเป็นจุดใช้วัดอุณหภูมิ

2.9.1.2.2 ครอบโลหะป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล (Metal Sheath) คือส่วนที่หุ้มคู่สายของเทอร์โมคัปเปิล เพื่อให้มีความเรียบร้อยและแข็งแรง ลักษณะการประกอบตัวเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับ Metal Sheath มีหลายแบบ ได้แก่

- แบบเปลือย - จุดต่อสำหรับวัดไม่มี Metal Sheath หุ้ม ,ให้ผลการวัดไวที่สุด แต่ชำรุดง่าย และอายุการใช้งานสั้น

- แบบ Ungrounded Junction - จุดต่อของคู่สายไม่เชื่อมต่อกับอยู่กับ Metal Sheath ,ทนทานที่สุด แต่ให้ผลการวัดช้า

- แบบ Grounded Junction - สายทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิลถูกเชื่อมต่อลงบน Metal Sheath ,ให้ผลการวัดไวกว่าแบบ Ungrouned Junction แต่ถ้ามีกระแสไฟฟ้ารั่วจากอุปกรณ์อื่นมาที่ Metal Sheath จะทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้

2.9.1.2.3 ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล เป็นส่วนที่ใช้กั้นระหว่างตัวเทอร์โมคัปเปิลกับ Metal Sheath ส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภท แมกนีเซียมออกไซด์ ,อะลูมิเนียมออกไซด์ หร์อเบอรีลเลียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1.2.4 เทอร์โมเวลล์ (Thermowell)ใช้เสริมความแข็งแรงให้ตัวเทอร์โมคัปเปิล และป้องกันไม่ให้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับสารที่ต้องการวัดอุณหภูมิโดยตรง

2.9.1.2.5 Extension Wire คือสายที่ใช้ในการเชื่อมต่อ หรือต่อเพิ่มจากตัวเทอร์โมคัปเปิลที่มีอยู่แล้ว

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน Type ต่าง ๆ

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		°C	°F	
B	แพลทินัม – 30% โรเดียม แพลทินัม – 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม – 13% โรเดียม แพลทินัม	- 50 ถึง 1768	- 60 ถึง 3210	-02.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม – 6% โรเดียม แพลทินัม	- 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/อะลูเมล	- 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				

2.10 ฮีตเตอร์ (Heater)

ฮีตเตอร์ เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในอุตสาหกรรม ที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อนขึ้น ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียว และทนอุณหภูมิได้สูง เช่น นิกเกิล, โครเมียม เป็นต้น

ส่วนประกอบอีกส่วนที่สำคัญคือ ฉนวน (แม็กนีเซียมออกไซด์) ซึ่งทำหน้าที่กั้นกลางอยู่ระหว่างลวดฮีตเตอร์กับปลอกโลหะ เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสรั่ว (Leak Current) จากลวดฮีตเตอร์ออกไปยังผิวโลหะ ซึ่งต้องมีคุณสมบัติมีค่าความนำไฟฟ้าต่ำแต่นำความร้อนดีมาก จุดสำคัญคือ ห้ามมีความชื้นในฉนวนเด็ดขาดเพราะจะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้อาจมีกระแสรั่วได้ ซึ่งหากมีความชื้นแก้ไขได้โดยการอบในเตาอบ

ฮีตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนี้

- ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก และโลหะต่าง ๆ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น งานบรรจุหีบห่อ งานขึ้นรูปพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฮีตเตอร์ครีบ (Finned Heater) และฮีตเตอร์ท่อกลม ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้ง ในเตาอบ

- ฮีตเตอร์จุ่ม (Immersion Heater) บางทีเรียกว่า ฮีตเตอร์ต้มน้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งาน เช่น งานต้มน้ำ – ต้มน้ำมัน งานผสมสาร

- บอบบิ้นฮีตเตอร์ (Bobbin Heater) ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีตเตอร์จุ่ม สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย

- ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง ไม่เหมาะกับวัตถุที่มีสักษณะมันวาว เนื่องจากวัตถุมันวาวจะมีคุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ ที่ติดตั้งในเตาอบ หรือเหนือคอนเวย์เยอร์ได้

- ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater) ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อ หรือถังรูปทรงกระบอก

- ฮีตเตอร์แผ่น (Strip Heater) ใช้ให้ความร้อนโดยแนบกับวัตถุโดยตรง

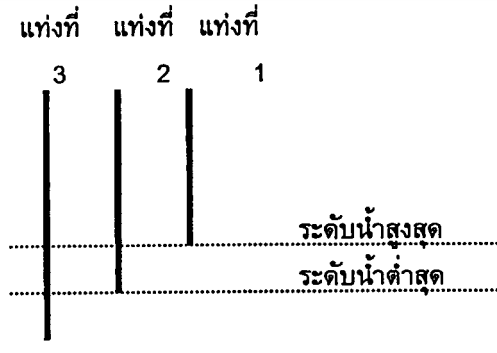
2.11 ทฤษฎีที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำ

2.11.1 ก้านอิเล็กโตรด (Electrode)

ก้านอิเล็กโตรด คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับน้ำชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นแท่งตัวนำยาว ๆ ในการใช้งานปกติจะใช้แท่งตัวนำ 3 แท่ง ซึ่งแต่ละแท่งจะมีความยาวไม่เท่ากัน ดังนี้

- แท่งที่สั้นที่สุด (แท่งที่ 1) คือ แท่งตัวนำควบคุมระดับสูงสุดของระดับน้ำ
- แท่งที่ยาวปานกลาง (แท่งที่ 2) คือ แท่งตัวนำควบคุมระดับต่ำสุดของระดับน้
- แท่งที่ยาวที่สุด (แท่งที่ 3) คือ แท่งตัวนำที่ทำหน้าที่นำไฟฟ้าร่วมของแท่งที่ 1 และแท่งที่ 2

หลักการทำงาน คือ เมื่อระดับน้ำอยู่ในช่วงปกติจะมีการนำไฟฟ้าระหว่างแท่งที่ 2 และ แท่งที่ 3 ดังนั้นถ้าหากระดับน้ำต่ำกว่าปกติ แท่งที่ 2 จะไม่นำไฟฟ้า และหากระดับน้ำสูงกว่าปกติ จะมีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นในแท่งที่ 1



รูปที่ 2.15 แสดงการใช้งานก้านอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve)

คือวาล์วที่ควบคุมการเปิด/ปิดท่อโดยใช้ไฟฟ้าในการควบคุม โดยใช้โซลินอยด์ทำหน้าที่คล้ายสวิตช์ในการสั่งงานเปิด/ปิดท่อ

โซลินอยด์เป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานจลน์ มีลักษณะเป็นขดลวดพันบนแกนทรงกระบอก ภายในแกนจะมีแกนเหล็กที่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะทำให้ขดลวดมีสภาพเสมือนเป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะทำการดึงแกนเหล็กนี้ให้เคลื่อนได้

โซลินอยด์วาล์วมีทั้งแบบที่ใช้กับไฟกระแสตรงและไฟกระแสสลับ และมีชนิดให้เลือกใช้ตามลักษณะการใช้งาน เช่น ใช้กับน้ำ, อากาศ, น้ำมัน เป็นต้น

2.12 กระบวนการทางอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม (plant) นั้นโดยทั่วไปจะประกอบด้วย กลุ่มอุปกรณ์, เครื่องมือ และเครื่องจักรต่างๆ ซึ่งถูกนำมาต่อใช้ปฏิบัติงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนวัตถุดิบให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการหรือเพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายในการผลิตที่ต้องการอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างร่วมกัน โดยมีกระบวนการ (process) ในการผลิตเป็นลำดับขั้นในการปฏิบัติงานของกลุ่มอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆ เหล่านั้น

ดังนั้นระบบการวัดคุมค่าและควบคุมกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม จึงเป็นระบบหรือกระบวนการอันประกอบด้วย โรงงาน, กระบวนการ, เครื่องจักร, อุปกรณ์ควบคุม, อุปกรณ์ตรวจจับ, และอุปกรณ์วัดต่างๆ ซึ่งถูกจัดสรรมาให้สามารถทำงานด้วยกันอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการควบคุมที่ต้องการ เช่น เพื่อรักษาเสถียรภาพของกระบวนการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เพื่อลดผลของการรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก เป็นต้น โดยทั่วไปการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมนิยมใช้หลักการควบคุมแบบอัตโนมัติ ในการออกแบบระบบควบคุมการป้อนกลับของระบบการทำงานจะคำนึงถึง ความเที่ยงตรง ถูกต้อง จึงได้มีการค้นคิดและออกแบบหลักการควบคุมแบบต่างๆ ขึ้นมามากมาย และการควบคุมแบบพีไอดี (PID control) ก็เป็นการควบคุมแบบหนึ่งซึ่งออกแบบขึ้นมาเพื่อรองรับความต้องการของระบบควบคุมกระบวนการผลิตดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

2.13 ทฤษฎีที่ใช้ในการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

2.13.1 สถาปัตยกรรมของ 89C51RD+

2.13.1.1 แนะนำไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ประเภทหนึ่ง ที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบควบคุมที่มีขนาดเล็ก โดยไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่งตัวจะประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยการทำงานหลักของระบบคอมพิวเตอร์ครบถ้วน เช่น หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU), หน่วยความจำ, พอร์ตในการติดต่อหรือควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งถ้าหากว่าเป็นการใช้งานไมโครโปรเซสเซอร์ทั่วไป ก็จะต้องใช้อุปกรณ์ภายนอกมาประกอบเพื่อทำหน้าที่เหล่านี้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นระบบคอมพิวเตอร์เพื่องานควบคุมที่สมบูรณ์ โดยบรรจุอยู่ในไอซีเพียงตัวเดียว ในบางครั้งจึงอาจเรียกไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าเป็น ระบบควบคุมไมโครคอมพิวเตอร์ชิปเดี่ยวไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์หลายรุ่นซึ่งมีสถาปัตยกรรมพื้นฐานที่เหมือนกัน เพียงแต่มีขนาดหรือจำนวนของหน่วยทำงานภายในที่ต่างกันออกไป เพื่อความเหมาะสมในงานประยุกต์ต่างๆ ตามความต้องการ

2.13.1.2 คุณลักษณะพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

- หน่วยประมวลกลางขนาด 8 บิต
- หน่วยประมวลผลสำหรับข้อมูลแบบบิต (Boolean Processor)
- ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก 64 กิโลไบต์
- ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำข้อมูลภายนอก 64 กิโลไบต์
- หน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 64 กิโลไบต์แบบ Flash (เบอร์ 89C51RD+)
- หน่วยความจำแบบ RAM ภายในจำนวน 128 ไบต์
- พอร์ตอินพุต/เอาท์พุต แบบขนานจำนวน 32 เส้น ซึ่งสามารถแยกการทำงานได้อย่างอิสระ
- วงจรสื่อสารแบบอนุกรมแบบดูเพลกซ์เต็ม (Full Duplex)
- วงจรควบคุมการขัดจังหวะ(Interrupt) จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ 6 ประเภทพร้อมกำหนดลำดับความสำคัญได้สองระดับ
- วงจรออสซิลเลเตอร์ภายใน

2.13.1.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์พื้นฐานสำหรับตระกูล MCS-51 ได้แก่เบอร์ 8051, 8031, 8751 โดยเบอร์ 8051 จัดเป็นสมาชิกตัวแรกในตระกูล ซึ่งมีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิปเป็น ROM ขนาด 4 กิโลไบต์ และหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลทั่วไปภายใน MCS-51 (RAM) เองจำนวน 128 ไบต์ มีพอร์ตขนาด 8 บิต 4 พอร์ต มีรีจิสเตอร์ในการขัดจังหวะจากภายนอกได้ 2 ชนิด สามารถรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมผ่านทางพอร์ตสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม มีวงจรออสซิเลเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาควบคุมการทำงานในตัวเอง ส่วนเบอร์ 8751 จะมีคุณสมบัติเหมือน 8051 ทุกอย่าง ต่างกันเพียงชนิดหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในตัวของเบอร์ 8751 จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EEPROM แทนที่จะเป็น ROM ส่วนเบอร์ 8031 จะเหมือนกับเบอร์ 8051 ต่างกันเพียง 8031 จะไม่มีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในตัวเท่านั้น

2.13.1.4 โครงสร้างหน่วยความจำภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-851 ทุกตัวจะแบ่งหน่วยความจำออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรม (Program memory) และ หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล (Data memory) โดยหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรม จะใช้เก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานของชิป MCS-51 บางเบอร์จะมีหน่วยความจำส่วนนี้อยู่ในตัว แต่บางเบอร์จะไม่มี ทำให้ต้องเก็บโปรแกรมไว้ในหน่วยความจำภายนอกทั้งหมด ส่วนหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล ใช้สำหรับเก็บข้อมูลระหว่างการทำงาน MCS-51 ทุกเบอร์จะมีส่วนนี้อยู่ในชิปข้อมูลจำนวนหนึ่ง แต่จะมีมากหรือน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับเบอร์ของชิป

หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรม ในไอซี MCS-51 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิป (Internal Memory) และหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายนอกชิป (External Memory) ขนาดของหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิปมีได้ตั้งแต่ 0 , 4 , 8 , 16 , 64 กิโลไบต์ ขึ้นอยู่กับเบอร์ของชิป หน่วยความจำโปรแกรมมีแอดเดรสเริ่มต้นที่ 0000H เมื่อซีพียูได้รับการรีเซตให้เริ่มต้นการทำงาน จะต้องมาเริ่มต้นที่แอดเดรส 0000H นี้เสมอ อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ของหน่วยความจำโปรแกรมไม่ว่าจะใช้งานภายในหรือภายนอกก็ตามต้องมีการสงวนพื้นที่บางตำแหน่งไว้สำหรับการบริการอินเตอร์รัปต์ 6 ประเภท ประเภทละ 8 ไบต์ ประกอบด้วย

พื้นที่สำหรับการบริการอินเตอร์รัปต์ 0 จากภายนอก กำหนดไว้ที่แอดเดรส 0003H
พื้นที่สำหรับการบริการอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 0 กำหนดไว้ที่แอดเดรส 000BH
พื้นที่สำหรับการบริการอินเตอร์รัปต์ 1 จากภายนอก กำหนดไว้ที่แอดเดรส 0013H
พื้นที่สำหรับการบริการอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 1 กำหนดไว้ที่แอดเดรส 001BH
พื้นที่สำหรับการบริการอินเตอร์รัปต์ของการสื่อสารอนุกรม กำหนดไว้ที่แอดเดรส 0023H
พื้นที่สำหรับการบริการอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 2 กำหนดไว้ที่แอดเดรส 002BH

หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลของ MCS-51 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในชิป และหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายนอก โดยหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในชิป ยังแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อยดังนี้

- ส่วนที่ใช้เก็บของมูลทั่วไป (Internal RAM) เป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลที่มีอยู่ภายใน MCS-51 หน่วยความจำส่วนนี้มีไว้สำหรับเก็บข้อมูลในขณะทำงาน แบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นรีจิสเตอร์แบงค์ เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลในการทำงานทั่วไป แบ่งออกเป็น 4 แบงค์แบงค์ละ 8 รีจิสเตอร์ คือ R0 – R7 ส่วนที่สอง เป็นหน่วยความจำที่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต และส่วนสุดท้ายคือส่วนที่สามารถเข้าถึงได้ในระดับไบต์

เอกสารนี้โปรดเคารพสิทธิ์ ห้ามใช้ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนที่ใช้เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ (Special Function Register) เป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายใน MCS-51 ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ เพื่อควบคุมการทำงานและบอกสถานะของซีพียู เนื่องจาก MCS-51 ถูกออกแบบให้ใช้สำหรับการควบคุมระบบโดยเฉพาะ จึงทำให้มีความสามารถเฉพาะตัวหลายอย่าง ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยวงจรภายในตัวที่มีเพิ่มขึ้นมาจากไมโครโปรเซสเซอร์ทั่วไป การควบคุมการทำงานของวงจรภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะกระทำผ่านรีจิสเตอร์ที่ถูกกำหนดหน้าที่ไว้แล้ว ดังนั้นหากต้องการใช้ MCS-51 ให้มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องทราบหน้าที่การทำงานของรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะแต่ละตัวให้ละเอียด รีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะทั้งหมดอยู่ในหน่วยความจำสำหรับเก็บของมูลภายในตัว บริเวณที่ใช้เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ

2.14 การควบคุมกระบวนการแบบต่างๆ

โดยทั่วไปอุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ (automatic controller) สามารถจำแนกชนิดโดยพิจารณาตามคุณสมบัติการทำงานในการควบคุมระบบและกระบวนการ ได้เป็นห้าชนิด ดังนี้ คือ

- การควบคุมแบบปิด-เปิด (On-off control) หรือ การควบคุมแบบสองตำแหน่ง (Two-position control)
- การควบคุมแบบพี (Proportional control หรือ P control)
- การควบคุมแบบไอ (Integral control หรือ I control)
- การควบคุมแบบพีไอ (Proportional-plus-Integral control หรือ PI control)
- การควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-plus-Integral-plus-Derivative control หรือ PID control)

ทั้งนี้การพิจารณาเลือกใช้ชนิดของการควบคุมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ เช่น คุณสมบัติและเงื่อนไขในการทำงานของระบบและกระบวนการนั้น รวมไปถึง ค่าใช้จ่าย ความปลอดภัย ความเที่ยงตรง น้ำหนัก หรือแม้กระทั่งขนาดของอุปกรณ์อีกด้วย

โดยส่วนใหญ่อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม มักเป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากวงจรอนาลอกอิเล็กทรอนิกส์ (analog electronic controller)

2.14.1 การควบคุมแบบปิด-เปิด

การควบคุมแบบปิด-เปิด หรือ การควบคุมสองตำแหน่งเป็นลักษณะการควบคุมพื้นฐานอย่างง่ายที่มีสภาวะการทำงานอยู่สองสภาวะ คือ จ่ายสัญญาณควบคุม (off) ให้กับกระบวนการ ซึ่งเหมือนกันกับสภาวะการทำงานของการปิด-เปิด สวิตช์ควบคุมธรรมดาทั่วไป ตัวอย่างง่ายๆ ของลักษณะการควบคุมแบบปิด-เปิดนี้ ได้แก่ การทำงานของขดลวดให้ความร้อนในเตาอบไฟฟ้าที่มีใช้กันตามบ้านเรือนทั่วไป กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในเตาอบ (y_m) มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (y_{sp}) มากๆ เป็นผลให้ค่าความ *error* , $e(t)$ มีค่าเป็นลบมากเช่นกันเทอร์โมสตัต (thermostat) ซึ่ง

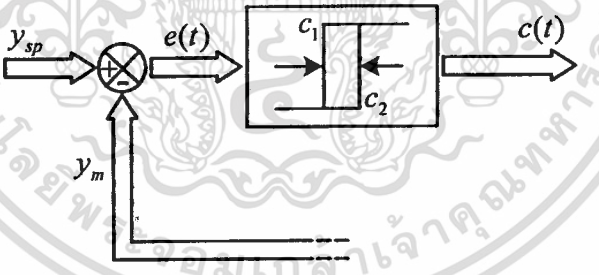
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเสมือนอุปกรณ์ควบคุมของระบบในกรณีนี้ ก็จะตัดวงจรให้ขดลวดความร้อนหยุดทำงาน (off หรือ $c(t) = 0$) อุณหภูมิในเตาอบเริ่มค่อยๆ ลดลง หรือนั่นคือ ค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ค่อยๆ เพิ่มค่าเป็นบวก ซึ่งทำให้เทอร์โมสตัตต่อวงจร (on หรือ $c(t) = 100\%$) ให้เตาอบทำงานอีกครั้ง สภาวะเช่นนี้ยังคงเป็นอยู่ตราบใดที่ $e(t)$ ยังมีค่าเป็นบวกอยู่ หลังจากนั้นเมื่อ $e(t)$ ตกลงจนเป็นศูนย์ (จุด f) แต่เทอร์โมสตัตก็ยังจะไม่ตัดวงจรอย่างทันทีทันใด จนกระทั่งค่า $e(t)$ มีค่าลดต่ำลงจนเป็นลบค่าหนึ่ง เทอร์โมสตัตก็จะตัดวงจร เตาอบหยุดทำงานอีกครั้ง เป็นวัฏจักรการทำงานเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

ดังนั้นจากคุณสมบัติในการทำงานของการควบคุมแบบปิดเปิด ทำให้สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ควบคุม $c(t)$ กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} c(t) &= C_1 \quad \text{เมื่อ} \quad e(t) \rangle 0 \\ &= C_2 \quad \text{เมื่อ} \quad e(t) \rangle 0 \end{aligned} \tag{2.3}$$

โดยที่ C_1 และ C_2 คือ ค่าคงที่ จากสมการที่ (2.3) จะเห็นว่าสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ควบคุม $c(t)$ หรือสัญญาณควบคุมกระบวนการจะมีเพียงสองสภาวะเท่านั้น คือ ค่าสูงสุด (C_1) กับ ค่าต่ำสุด (C_2) และทั่วไปค่าต่ำสุด C_2 และทั่วไปค่าต่ำสุด C_2 นั้นมักมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือมีค่าเท่ากับ $-C_1$ ผังสัญญาณของการควบคุมแบบปิด-เปิด จึงสามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบปิด - เปิด

2.14.2 การควบคุมแบบพี

การควบคุมแบบพี นี้จะให้สัญญาณควบคุม $c(t)$ ที่ออกจากอุปกรณ์ควบคุมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ของกระบวนการ ซึ่งมีผังสัญญาณแสดงการทำงานของการควบคุมดังรูปที่ 2.17 และสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$c(t) = K_p e(t) + c_B \tag{2.4}$$

เมื่อ K_p คือ อัตราขยายของการควบคุมแบบพี (proportionalgain) และ c_B คือ ค่าคงที่ของอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าค่าไบอัส (bias signal) โดยจะเป็นสัญญาณควบคุมกรณีที่ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

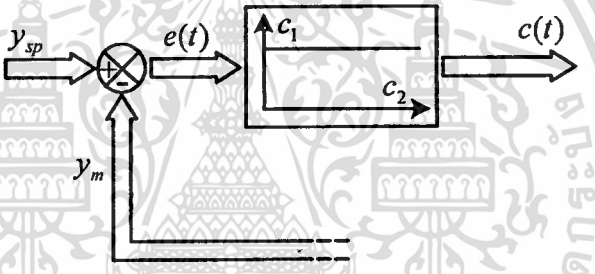
ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมมีค่าเป็นศูนย์ K_p

นอกจากนี้ค่า K_p นี้ยังเป็นส่วนกลับของช่วงการควบคุมแบบพี (proportional band, PB) โดยเขียนอธิบายได้ว่า

$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100\% \tag{2.5}$$

ซึ่งช่วงการควบคุมแบบพี หรือ PB นี้หมายถึง ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม $e(t)$ ที่ทำให้สัญญาณควบคุม $c(t)$ มีค่าสูงสุดเป็น 100 % ยกตัวอย่างเช่น ถ้าอุปกรณ์ควบคุมแบบพีตัวหนึ่ง มีค่า $PB = 50\%$ จะได้ $K_p = 100 / 50 = 2$ ดังนั้นเมื่อแทนค่า K_p ลงในสมการที่ (2.4) โดยสมมติให้ $c_B = 0$ แล้ว จะได้

แสดงให้เห็นวาในกรณีนี้ค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ต้องมีค่าเท่ากับ 50% หรือ 0.5 จึงทำให้สัญญาณควบคุม $c(t)$ มีค่าสูงสุดเป็น 100 % หรือ 1



รูปที่ 2.17 แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบพี

2.14.3 การควบคุมแบบไอ

การควบคุมแบบไอ มีคุณสมบัติในการทำงาน คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม $c(t)$ ที่ออกจากอุปกรณ์ควบคุมแบบนี้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม $e(t)$ ซึ่งเขียนอธิบายได้เป็น

$$\frac{dc(t)}{dt} = K_I e(t) \tag{2.6}$$

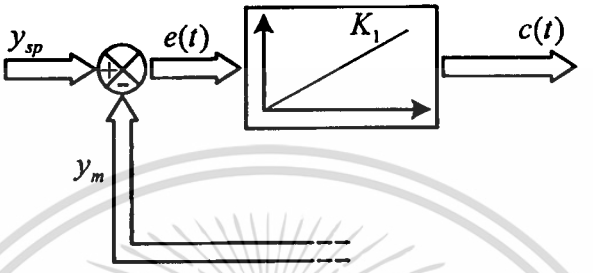
เมื่อ K_1 คือ ค่าคงที่ของการอินทิเกรต (integration constant) หลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์ควบคุมแบบไอ สามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต $e(t)$ กับเอาต์พุต $c(t)$ ของอุปกรณ์ ซึ่งจะเห็นว่าหากค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม $e(t)$ มีค่ามาก อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมจากอุปกรณ์ควบคุม $c(t)$ ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว เพื่อปรับให้ความคลาดเคลื่อนในกระบวนการลดลงรวดเร็วขึ้น หรือถ้า $e(t)$ มีค่าน้อย อัตราการเปลี่ยนแปลงของ $c(t)$ ก็จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ สอดคล้องเป็นไปตามขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$e(t)$ จนกระทั่งขนาดของ $e(t)$ มีค่าเป็นศูนย์ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ $c(t)$ จึงจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งเช่นกัน ดังนั้นผังสัญญาณแสดงคุณสมบัติในการทำงานของการควบคุมลักษณะนี้จึงแสดงได้ดังรูปที่ 2.18

จากสมการที่ (2.6) นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของการอินทิเกรตได้เป็น

$$c(t) = K_I \int e(t)dt + c_B \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.18 แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบไอ

2.14.4 การควบคุมแบบพีไอ

การควบคุมแบบพีไอ เป็นการรวมเอาคุณสมบัติเด่นในการควบคุมแบบพี และแบบไอ เข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือ

- มีผลการตอบสนองชั่วขณะ (transient response) ที่ดีสามารถเข้าสู่เป้าหมายในการควบคุมได้เร็ว ซึ่งเป็นคุณสมบัติของการควบคุมแบบพี

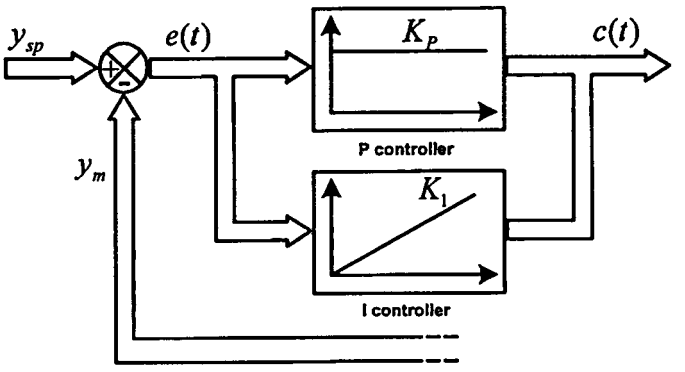
- สามารถขจัดค่าความคลาดเคลื่อน ณ สภาพสมดุลใหม่ (steady state error) ซึ่งเป็นค่าออฟเซต (offset) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลงได้ คุณสมบัติข้อนี้ได้จากการควบคุมแบบไอ

หลักการสังเคราะห์การควบคุมแบบพี และแบบไอ มาต่อทำงานร่วมกันซึ่งกระทำได้สองลักษณะ คือ ต่อแบบขนาน (Parallel PI) และต่อแบบอนุกรม (Series PI) ดังผังสัญญาณแสดงการทำงานในรูปที่ 2.19, 2.20

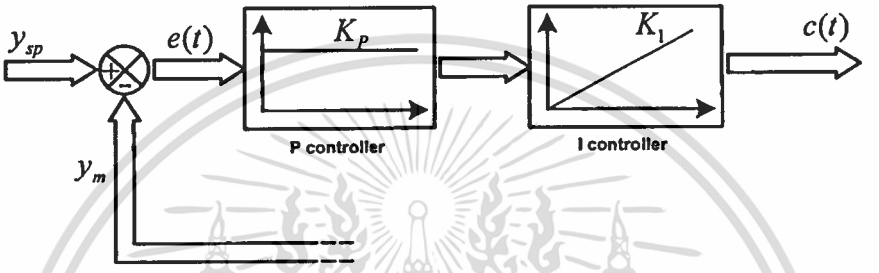
2.14.4.1 อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอ โดยใช้การต่อแบบขนาน เมื่อนำอุปกรณ์ควบคุมแบบพี และแบบไอ ซึ่งมีรายละเอียดดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้นมาต่อปฏิบัติงานร่วมกันโดยอาศัยคุณสมบัติตามหลักการพื้นฐานในผังสัญญาณดังรูปที่ 2.19

2.14.4.2 อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอ โดยใช้การต่อแบบอนุกรมโดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกัน และคุณสมบัติในการต่อแบบอนุกรมดังผังสัญญาณในรูปที่ 2.20 จะทำให้ได้อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอ อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้การต่อแบบอนุกรม (Series PI controller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงการต่อแบบขนาน



รูปที่ 2.20 แสดงการต่อแบบอนุกรม

2.14.5 การควบคุมแบบพีไอดี

2.14.5.1 การควบคุมแบบดี (Derivative control หรือ D control) จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุม $c(t)$ มีค่าแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม $e(t)$ สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

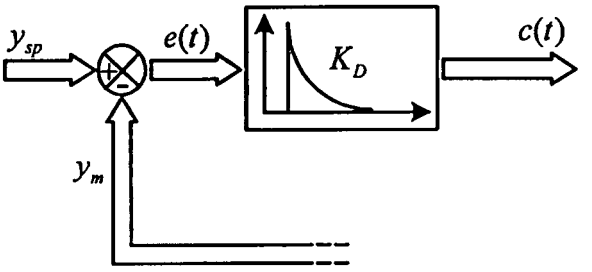
$$c(t) = K_p \frac{de(t)}{dt} \tag{2.8}$$

เมื่อ K_D คือ ค่าคงที่ของการอนุพันธ์ (differentiation constant)

จากคุณสมบัติในการควบคุมแบบดี อาจกล่าวได้ว่า การควบคุมแบบดี พยายามปรับสภาพของกระบวนการให้สามารถเข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการหรือที่เปลี่ยนไปได้รวดเร็วขึ้นกว่าการควบคุมแบบพีไอ ดังนั้นการควบคุมกระบวนการโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบดี จึงมีคุณสมบัติน่าสนใจพอสรุปได้ ดังนี้ คือ

- กระบวนการที่ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมมีค่าคงที่ จะไม่มีสัญญาณการควบคุมแบบดี เกิดขึ้น
- กระบวนการที่ค่าวัดมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จะทำให้สัญญาณการควบคุมแบบดี มีค่าสูง ถึงแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมจะมีค่าน้อยก็ตาม และสามารถสรุปเป็นผังสัญญาณแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบดี

2.14.5.2 อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอดี อุปกรณ์ควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี เกิดจากการนำเอาหลักการทำงานและคุณสมบัติของการควบคุมแบบพี แบบไอ และแบบดี เข้าด้วยกัน กล่าวคือ การควบคุมแบบพี จะขจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการส่วนการควบคุมแบบไอ ทำหน้าที่ขจัดค่าออฟเซตที่คงเหลืออยู่ในกระบวนการซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ณ สภาพสมดุลใหม่ของกระบวนการ ในขณะที่การควบคุมแบบดี จะทำหน้าที่ขจัดค่าความคลาดเคลื่อนในกระบวนการที่มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และในส่วนของการสร้างอุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอดี ก็สามารถทำได้อย่างง่ายโดยการนำเอาอุปกรณ์ควบคุมแต่ละแบบมาต่อขนานปฏิบัติงานร่วมกัน ดังผังสัญญาณในรูปที่ 2.22

สำหรับการสังเคราะห์อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอดี โดยใช้วงจรอนาลอกอิเล็กทรอนิกส์นั้น สามารถกระทำได้โดยนำวงจรควบคุมแบบพี แบบไอ และแบบดี มาต่อขนานกันตามผังสัญญาณในรูปที่ 2.22

$$V_C = K_p \cdot V_{error} + K_I \int V_{error}\, dt + K_D \frac{d(V_{error})}{dt} + V_o \qquad (2.9)$$

K_p = อัตราขยายของการควบคุมแบบพี (proportional gain) มีค่าเท่ากับ R_2 / R_1

K_I = ค่าคงที่ของการอินทิเกรต (integration constant) มีค่าเท่ากับ $1 / R_I C_I$

K_D = ค่าคงที่ของการอนุพันธ์ (differentiation constant) มีค่าเท่ากับ $R_D C_D$

V_o = ค่าประจุแรกเริ่มซึ่งเป็นค่าออฟเซตของวงจร

ฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณของอุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอดีหาได้โดยการแปลงลาปลาซสมการที่ (2.9) จะได้

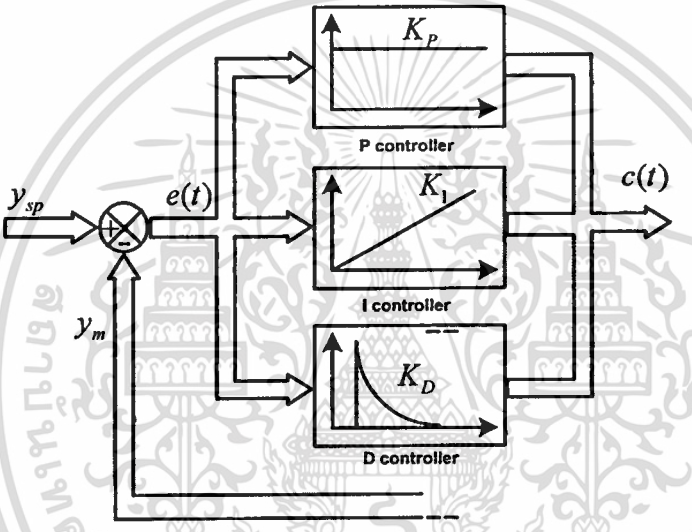
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_C = K_p \cdot V_{error} + \frac{K_I V_{error}}{s} + K_D s V_{error}$$

$$\frac{V_C}{V_{error}} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_p s + K_I}{s}$$

หรือ

$$T.F. = K_D \left[\frac{s^2 + (K_p / K_D)s + (K_I / K_D)}{s} \right] \qquad (2.10)$$



รูปที่ 2.22 แสดงผังสัญญาณของการควบคุมแบบพีไอดี

2.15 สรุป

ในบทนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับสายไฟชนิดต่างๆ พร้อมคุณสมบัติการใช้งานแต่ละชนิด และได้กล่าวถึงโครงสร้างของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตสายไฟพร้อมทั้งได้กล่าวถึงมาตรฐานการทดสอบสายไฟที่ระบุไว้ใน IEC 605022.71 และขั้นตอนในการทดสอบสายไฟให้ได้ตรงตามมาตรฐาน ซึ่งในบทนี้ยังได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการนำไปใช้ออกแบบการทดสอบสายไฟ อันได้แก่ หลักการควบคุมอุณหภูมิพร้อมมาตรฐานแบบอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และอุปกรณ์ประเภทฮีตเตอร์ที่เป็นอุปกรณ์นำความร้อนในการออกแบบ พร้อมยังได้กล่าวถึงการควบคุมกระบวนการแบบต่างๆ ในระบบการควบคุม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

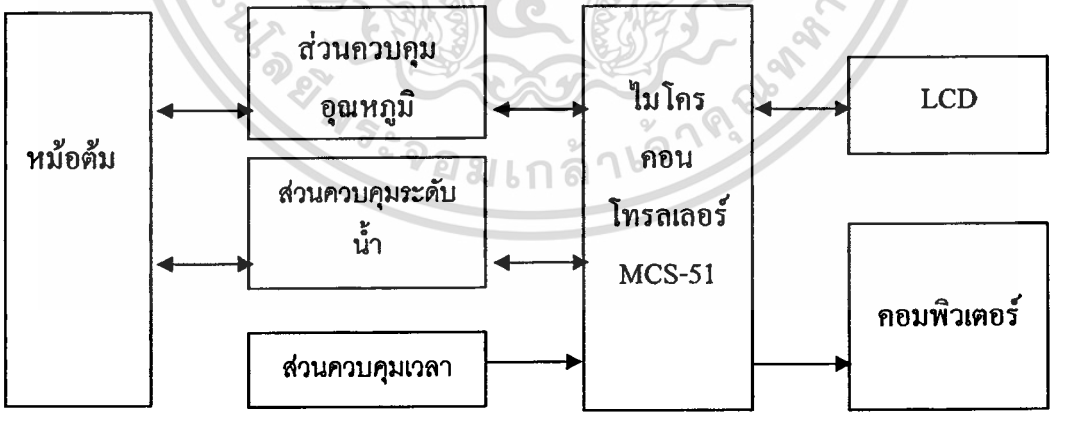
บทที่ 3

การออกแบบ

ในภาคอุตสาหกรรมด้านการผลิตสายไฟ จำเป็นต้องมีการทดสอบฉนวนของสาย ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะต้องได้รับรองมาตรฐาน ซึ่งอุปกรณ์เป็นส่วนสำคัญในการทดสอบสายไฟ ได้แก่ หม้อต้ม ซึ่งหม้อต้มที่ได้มาตรฐานที่สามารถใช้ทดสอบฉนวนของสายไฟในปัจจุบัน ก็มีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้องการด้านในการออกแบบสร้างชุดต้นแบบเพื่อจะได้หม้อต้มฉนวนสายไฟนี้ได้มาตรฐานของงานวิจัยฉบับนี้ซึ่งจะทำให้มีประโยชน์ในการลดต้นทุนและระยะเวลาและผลการการเก็บข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำ

ในงานวิจัยนี้จะมีส่วนของการออกแบบในด้านของตัวหม้อต้ม และในส่วนของการควบคุมต่างๆ โดยมีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้งาน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีทั้งในปัจจุบันและในอนาคต

หม้อต้มน้ำที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันนั้น มีระบบการเก็บข้อมูลของเงื่อนไขต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทดสอบ (เวลา, อุณหภูมิ, ระดับน้ำ) ด้วยการบันทึกข้อมูลเป็นกราฟลงบนกระดาษ ซึ่งไม่คงทนและยังจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาในส่วนของการเก็บข้อมูล ส่วนแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ และส่วนของระบบการรักษาระดับน้ำให้คงที่อยู่ตลอดเวลา โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของหม้อต้มจะแสดงออกเป็นบล็อกไดอะแกรมและสามารถดูจาก รูปที่ 3.1



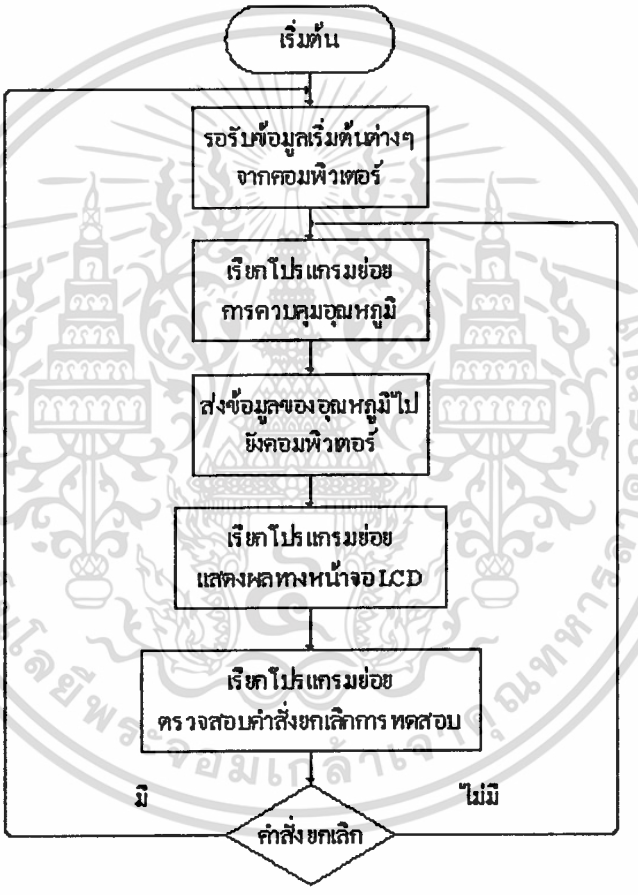
รูปที่ 3.1 แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบของชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบส่วนประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1.1 ไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้งานโปรแกรมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น ซึ่งจะต้องออกแบบให้สามารถควบคุมการทำงานทั้งหมดของหม้อต้มได้ ซึ่งก็คือ การควบคุมอุณหภูมิ , การควบคุมเวลา , การส่งข้อมูลไปแสดงผลทั้งที่หน้าจอ LCD และ การส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ พร้อมเก็บข้อมูล โดยสามารถแสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1.2 การรอรับข้อมูลเริ่มต้นต่างๆ จากคอมพิวเตอร์

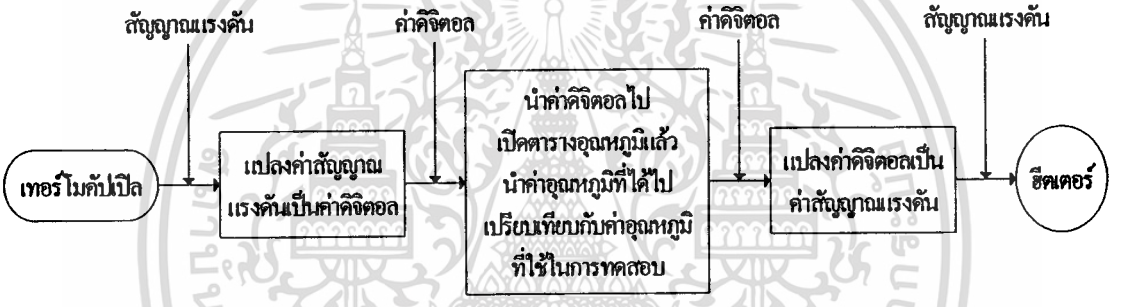
การรอรับข้อมูลเริ่มต้นต่างๆ จากคอมพิวเตอร์ ใช้การสื่อสารผ่านทางพอร์ตอนุกรมโดยข้อมูลที่รอรับได้แก่ ค่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ , ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ และ ค่าตัวเลขดิจิตอลที่ใช้ในการขับฮีตเตอร์ (เป็นค่าที่จะนำไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกเพื่อนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอนาลอกนั้นไปใช้ในการขับฮีตเตอร์ ซึ่งแรงดันจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ)

3.1.3 โปรแกรมย่อยการควบคุมอุณหภูมิ

โปรแกรมย่อยการควบคุมอุณหภูมิ ประกอบไปด้วย โปรแกรมย่อยการแปลงสัญญาณแรงดันจากเทอร์โมคัปเปิลเป็นค่าดิจิตอล, โปรแกรมย่อยการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิปัจจุบันกับค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อหาค่าดิจิตอลที่จะนำไปใช้ในการขับฮีตเตอร์ โดยค่าของอุณหภูมิปัจจุบันได้มาจาก การนำค่าดิจิตอลที่แปลงได้จากเทอร์โมคัปเปิลไปเปิดตารางที่เปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลกับค่าอุณหภูมิ, โปรแกรมย่อยการแปลงค่าดิจิตอลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิปัจจุบัน กับค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ไปเป็นสัญญาณอนาลอก โดยสามารถแสดงไดอะแกรมการทำงานได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมย่อยการควบคุมอุณหภูมิ

3.1.4 การส่งข้อมูลของอุณหภูมิไปยังคอมพิวเตอร์

การส่งข้อมูลของอุณหภูมิไปยังคอมพิวเตอร์ จะทำการส่งทุกๆ ครั้งหลังจากที่แปลงค่าสัญญาณแรงดันจากเทอร์โมคัปเปิลเป็นค่าดิจิตอลเรียบร้อยแล้วโดยค่าที่ส่งไปยังคอมพิวเตอร์นั้นจะเป็นค่าดิจิตอลขนาด 8 บิต (ซึ่งยังไม่ใช่ค่าของตัวเลขอุณหภูมิ แต่จะเป็นค่าดิจิตอลของสัญญาณแรงดันจากเทอร์โมคัปเปิล) เมื่อคอมพิวเตอร์รับค่านี้ไปก็จะนำไปเปิดตารางอุณหภูมิในคอมพิวเตอร์แล้วจึงได้ค่าอุณหภูมิออกมา เหตุผลที่ส่งค่านี้ไปเป็นเพราะว่าค่าดิจิตอลที่แปลงได้จากเทอร์โมคัปเปิลนั้นนั้นมีขนาด 8 บิต (เนื่องจากความละเอียดของไอซีแปลงสัญญาณอนาลอกดิจิตอลที่ใช้เป็น 8 บิต) สามารถทำการส่งออกไปได้ในคราวเดียวแล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งค่าของอุณหภูมิ มาจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เลย ถ้าอยากได้ค่าของทศนิยมด้วยก็จำเป็นต้องส่งค่าออกมาอย่างน้อย 16 บิต (ค่าของตัวเลขจำนวนเต็มขนาด 8 บิต และค่าของตัวเลขทศนิยมอีก 8 บิต) จะทำให้การทำงานของโปรแกรมประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ช้าลง และอาจเกิดการผิดพลาดในการส่งข้อมูลเป็นชุดๆ ผ่านทางพอร์ตอนุกรมได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

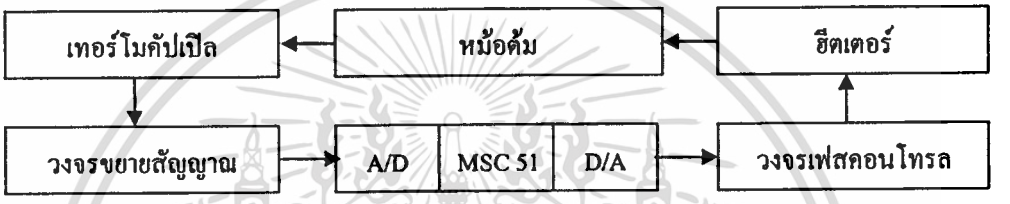
3.1.5 โปรแกรมย่อยการแสดงผลทางหน้าจอ LCD

จะทำการแสดงค่าของอุณหภูมิและเวลาออกทางหน้าจอ LCD สลับกันทุกๆ วินาที พร้อมทั้งทำการตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปรียบเทียบค่าระยะเวลาที่ได้ทำการทดสอบไปแล้วกับค่าของระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 การออกแบบส่วนควบคุมอุณหภูมิ

แบ่งออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

3.2.1 ไดอะแกรมการทำงานส่วนควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.4 แสดงไดอะแกรมส่วนควบคุมอุณหภูมิ

ในการควบคุมอุณหภูมิไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณแรงดันควบคุมการขับฮีตเตอร์แบบเฟสคอนโทรลเป็น 3 ระดับ ดังนี้

- อุณหภูมิเริ่มต้น ถึง (อุณหภูมิที่ตั้งไว้ - 20 องศาเซลเซียส) ช่วงเร่งอุณหภูมิ - เป็นช่วงที่มีแรงดันตกคร่อมฮีตเตอร์เต็มที่ (220 โวลต์)
- (อุณหภูมิที่ตั้งไว้ - 20 องศาเซลเซียส) ถึง (อุณหภูมิที่ตั้งไว้ - 2 องศาเซลเซียส) ช่วงหน่วงอุณหภูมิ - เป็นช่วงที่แรงดันตกคร่อมฮีตเตอร์ลดลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่ง
- (อุณหภูมิที่ตั้งไว้ - 2 องศาเซลเซียส) ถึง อุณหภูมิที่ตั้งไว้ ช่วงอุณหภูมิคงที่ – เป็นช่วงที่แรงดันตกคร่อมฮีตเตอร์ลดลงเหลือเพียงแค่รักษาระดับอุณหภูมิเอาไว้

3.2.2 เทอร์โมคัปเปิล

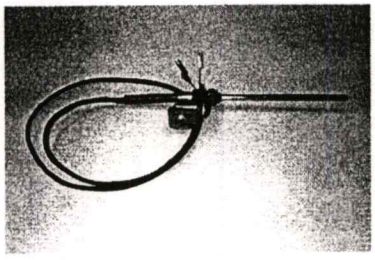
เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล type K ในการวัดอุณหภูมิ เนื่องจากมีความทนทาน, เหมาะกับงานที่ใช้งานเป็นเวลานาน, มีส่วนผสม (โครเมล/อะลูเมล) ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ, มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง และมีราคาที่ไม่แพงมากนัก

เลือกความยาวก้านวัด 13 ซม. เพื่อให้ปลายของเทอร์โมคัปเปิล(ส่วนวัดอุณหภูมิ) อยู่บริเวณตอนกลางของชิ้นงานที่ทดสอบทั้งหมด 30 ชิ้น

เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลที่มี Metal Sheath แบบ Ungrounded Junction อีกทั้งให้ตัวเทอร์โมคัปเปิลและสายของเทอร์โมคัปเปิลถูกหุ้มด้วยท่อหด เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตัวอื่นไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

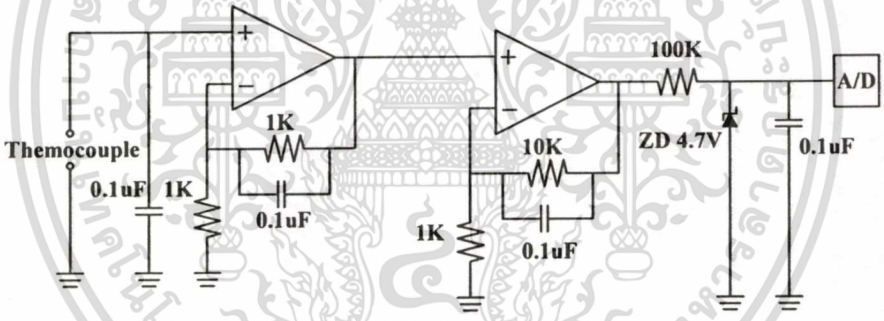
เข้าตัวเทอร์โมคัปเปิล หรือกระแสไฟฟ้าจากตัวเทอร์โมคัปเปิลรั่วออกไป ซึ่งจะส่งผลให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาดไป



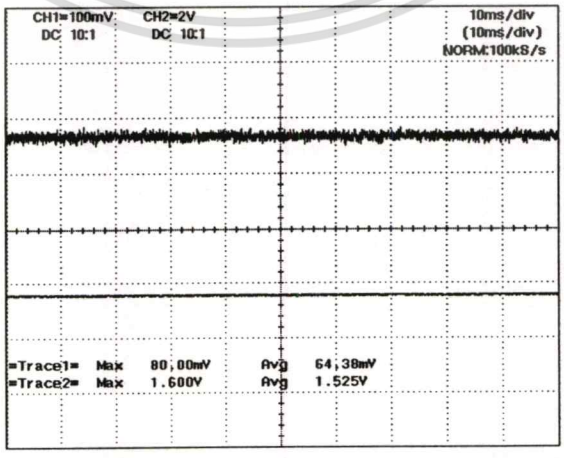
รูปที่ 3.5 แสดงเทอร์โมคัปเปิล

3.2.3 วงจรขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล

เนื่องจากแรงดันที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลจะมีปริมาณน้อยมาก (เป็นมิลลิโวลต์) อีกทั้งยังไม่ได้เปรียบเทียบจากอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ (Cold Junction Compensation) และวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณแรงดันอินพุทและเอาท์พุทในวงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ฮีตเตอร์

ในงานวิจัยนี้ใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อเพราะไม่ต้องการแช่ฮีตเตอร์ในน้ำและเพื่อความสะดวกในการซ่อมบำรุง โดยฮีตเตอร์จะรัดอยู่รอบบีกเกอร์ ซึ่งการคำนวณกำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์ แสดงได้ดังนี้

จาก $P = Q/\Delta t$ (3.1)

$= mc\Delta T/\Delta t$

$= DVc\Delta T/\Delta t$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW)

Q คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ (kJ)

m คือ มวลของน้ำ (kg)

D คือ ความหนาแน่นของน้ำ (1 kg/dm^3)

V คือ ปริมาตรของน้ำที่ใช้ (dm^3)

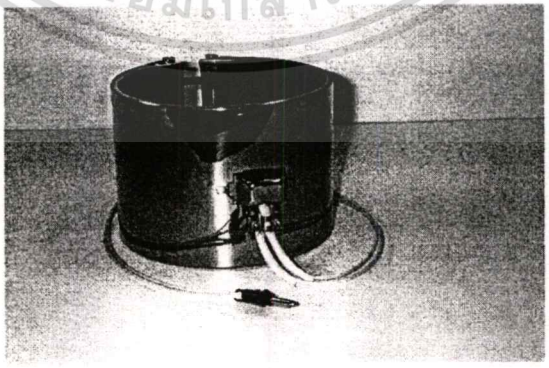
c คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ (4.18 kJ/kg-K)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ต้องการให้เพิ่มขึ้น (K, $^\circ$C)

Δt คือ ระยะเวลาที่ต้องการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงจุดที่ต้องการ (second) (กำหนดให้ = 15 นาที)

จะได้ $P = (1) \times (\pi \times 0.6^2 \times 1.7) \times (4.18) \times (90 - 30) / (15 \times 60) = 0.543$ kW

เลือกใช้ฮีตเตอร์ขนาด 600 W ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.2 ซม. สูง 10 ซม. โดยฮีตเตอร์นี้จะมีฉนวนกันความร้อนหุ้มอยู่รอบนอก เพื่อความปลอดภัยในการสัมผัสและเพื่อการรักษาอุณหภูมิที่ปลายสายไฟของฮีตเตอร์ จะเป็นแจ็คสำหรับเสียบเข้ากับเทอร์มินอลบนแผงยึดแผงวงจร เพื่อให้สามารถแยกฮีตเตอร์ออกจากแผงวงจรได้ง่าย ๆ ทำให้สะดวกในการตรวจสอบหรือซ่อมแซมอุปกรณ์

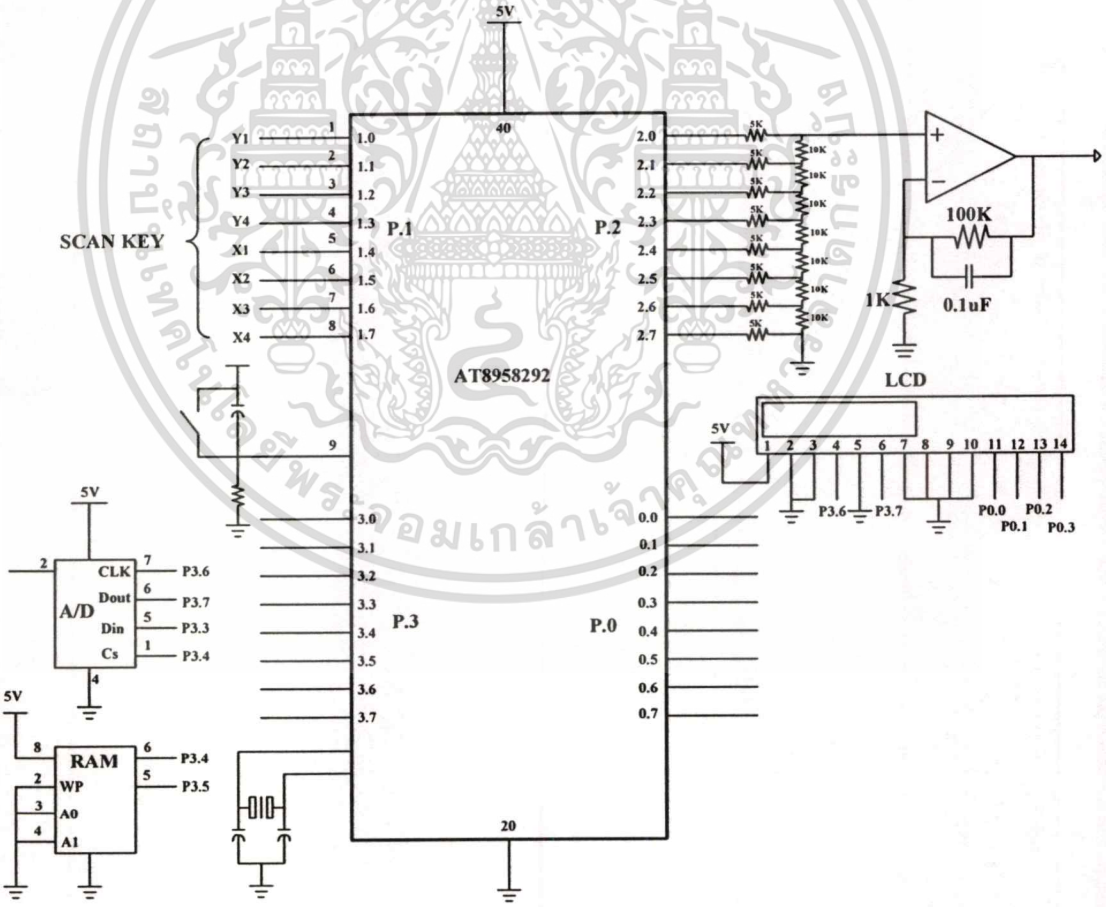


รูปที่ 3.8 แสดงฮีตเตอร์รัดท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 วงจรควบคุมเฟสคอนโทรล

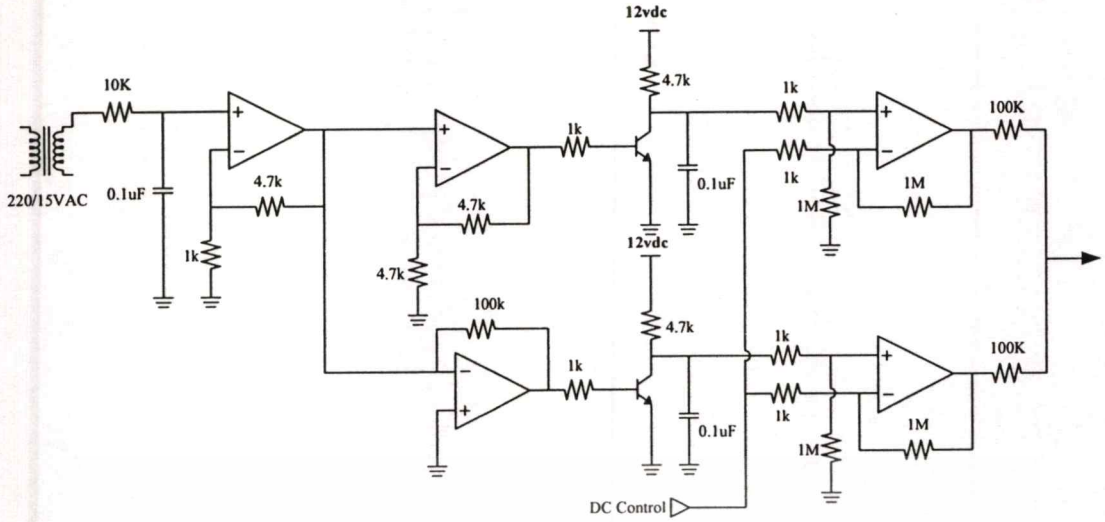
ในการควบคุมการทำงานของวงจรเฟสคอนโทรล ในการสร้างมุมจุดชนวนที่ในการสร้างจะต้องมีการซิงโครไนท์ AC Line เพราะการควบคุมจะต้องจุดชนวนตามเฟสของไฟกระแสสลับทั้ง 2 ซึ่ง ในรูปที่ 3.10 (ข) ได้ใช้ หม้อแปลงลดระดับแรงดัน ขนาด 220/15 V ใช้ในการ ซิงโครไนท์กับ AC Line โดยเอาท์พุท ที่ได้จากหม้อแปลงจะมีแรงดัน 15 V AC กระแสสลับและจากนั้นจะเข้าวงจร ซิโรคลอสซิ่ง เพื่อแปลงเป็นสัญญาณ โดยผ่านออปแอมป์ IC1 โดยสัญญาณที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.11 และจากนั้นจะนำมาผ่านวงจรกลับเฟส ได้แก่ ออปแอมป์ ที่ IC2 และ IC3 และนำสัญญาณทั้ง 2 ที่ได้มาสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม โดยต่อขนานกับคาปาซิเตอร์ ขนาด 1MF โดยเอาท์พุทจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 เมื่อได้สัญญาณสโลปทั้ง 2 ในลักษณะกลับเฟส และนำสัญญาณทั้ง 2 ไป ผ่านวงจร คอมพาราเตอร์ ซึ่งจะมีหน้าที่ในการเปรียบเทียบ แรงดันไฟตรงที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเอาท์พุทของวงจรคอมพาราเตอร์ จะเป็นมุมจุดชนวนที่ใช้ในการขับเกท โดยสามารถควบคุมผ่านแรงดันไฟตรงที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก) วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

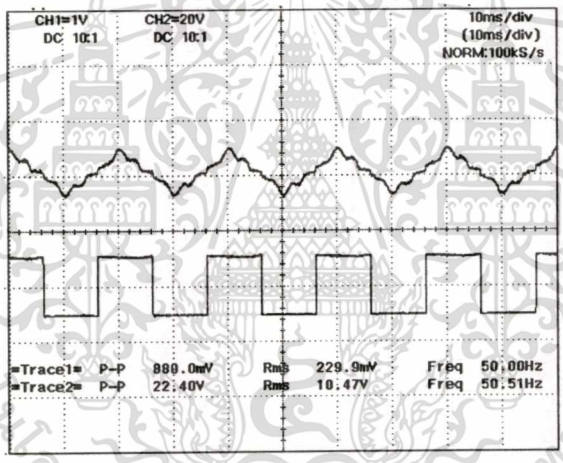
รูปที่ 3.9 แสดงวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

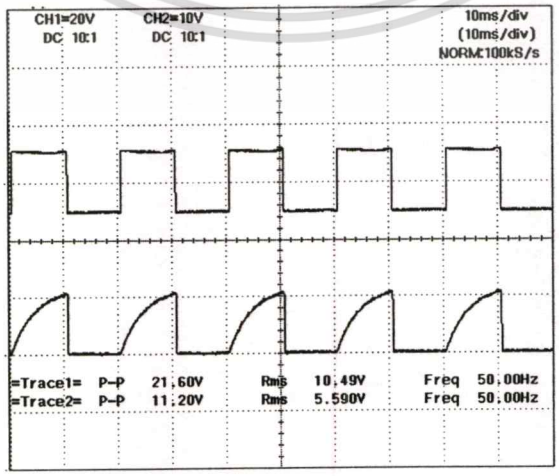


(ข) วงจรซิงโครไนซ์ เอซีไลน์

รูปที่ 3.9 (ต่อ)

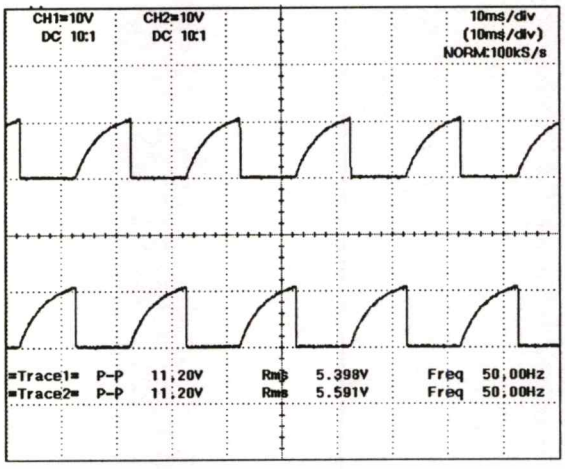


รูปที่ 3.10 แสดงสัญญาณเฟสซิงโครไนซ์กับเอซีไลน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 แสดงสัญญาณเฟสซิงโครไนซ์กับสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณกับเฟสแบบสามเหลี่ยมที่มีการซิงโครไนซ์

3.2.6 วงจรกำลังและวงจรขับเฟสคอนโทรล

ในการออกแบบวงจรกำลังของการจ่ายไฟเข้า Coil ของหม้อต้ม ได้ใช้อุปกรณ์ประเภทไตรแอคเป็นสวิทซ์ที่ใช้ในการควบคุม การจ่ายกระแสโหลด เพราะเป็นที่สะดวกและมีการควบคุมที่ง่าย ลักษณะโครงสร้างของไตรแอคจะเหมือนกับการนำเอาเอสซีอาร์ 2 ตัวมาต่อขนานกันในลักษณะกลับขั้ว ส่วนขาเกตต่อร่วมเข้าด้วยกัน ดังนั้นไตรแอคจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม ระบบไฟได้ทั้งแบบไฟตรงและไฟสลับ นั้นคือความสามารถในการนำกระแสได้ทั้งสองทิศทาง โดยการทริกที่เกตนั้นก็สามารถกระทำได้ทั้งสองทิศทาง

คุณสมบัติพื้นฐานเป็นข้อของไตรแอคซึ่งมีดังนี้

- โดยปกติ ถ้าไม่มีสัญญาณทริกที่เกต ไตรแอคจะไม่ทำงานโดย จะมีลักษณะเหมือนกับสวิตช์ที่ถูกเปิดวงจร

- ถ้าในกรณีที่ MT2 และ MT1 ถูกป้อนด้วยแรงดันบวกและลบตามลำดับไตรแอคจะถูกกระตุ้นให้ทำงานได้โดยการป้อนสัญญาณพัลส์เพียงสั้น ๆ ที่เกตของมัน โดยจะมีแรงดันตกคร่อมตัวมัน มีค่าประมาณ 1 หรือ 2 โวลต์ เท่านั้น และก็เช่นกันคือเมื่อไตรแอคเริ่มทำงานแล้วก็จะสามารถคงสภาพการทำงานอยู่เช่นนั้นต่อไปเรื่อยๆ ตราบเท่าที่ยังมีกระแสไหลผ่านตัวมันอย่างต่อเนื่อง

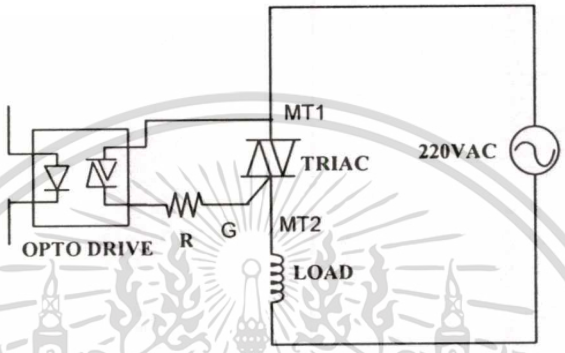
- หลังจากที่ไตรแอกคงสภาพการทำงานอยู่นั้น ทางเดียวที่จะหยุดการทำงานลงได้ ก็โดยการลดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวมันลง ให้มีค่าต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้งของมัน ในกรณีที่ใช้ไตรแอคในการจ่ายกระแสที่ไหลผ่านตัวมันลง ให้มีค่าต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้งของมัน ในกรณีที่ใช้ไตรแอคในการจ่ายกระแส AC การหยุดทำงานจะเกิดขึ้นอย่างอัตโนมัติ เมื่อแรงดันของไฟสลับเข้าใกล้จุดตัดศูนย์ที่เกิดขึ้นทุกๆ ครึ่งคลื่น นั่นคือกระแสจะลดลงเป็นศูนย์

- ไตรแอคถูกกระตุ้นให้ทำงานได้ ทั้งสัญญาณแบบบวกและลบที่ป้อนให้แก่ขาเกต โดยไม่คำนึงถึงขั้วที่ต่อยู่ที่ MT1 และ MT2

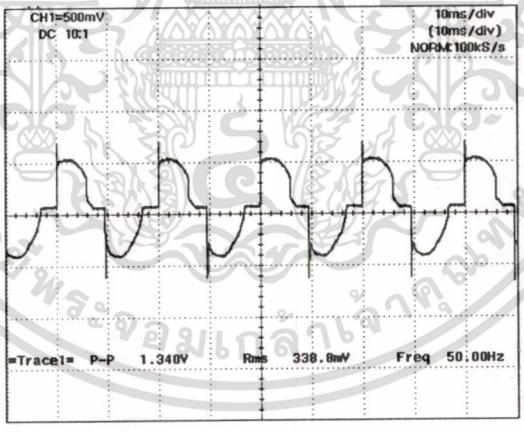
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไตรแอคสามารถทนการกระชากของกระแสได้สูง เช่นโดยปกติสำหรับไตรแอคที่ทนกระแสปกติได้ 10 แอมแปร์ (rms) สามารถทนการกระชากของกระแสในช่วงหนึ่ง คาบเวลาของไฟ 60 เฮิรตซ์ได้สูงถึง 100 แอมแปร์ เป็นต้น

จากการรูปที่ 3.14 เป็นวงจรกำลัง และวงจรขับเกทลักษณะการต่อจะอนุกรมกับโหลด โดยจะผ่านไตรแอคที่เปรียบเหมือนสวิทช์ โดยสัญญาณขับเกทของไตรแอคจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 แรงดันทางด้านอินพุทจะเป็นไฟ 220 VAC และจะมีไตรแอคเป็นอุปกรณ์ควบคุม ระดับแรงดันเอาท์พุท โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.15

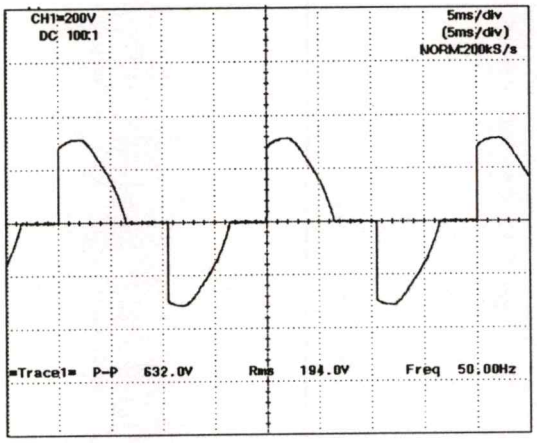


รูปที่ 3.13 แสดงวงจรขับขดลวดความร้อนด้วยวิธีเฟสคอนโทรล



รูปที่ 3.14 แสดงสัญญาณขับเกท

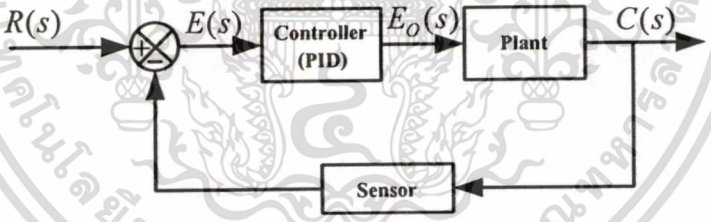
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงสัญญาณแรงดันเอาท์พุท

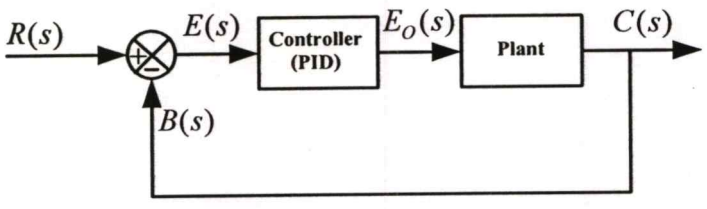
3.3 การออกแบบการป้อนกลับแบบพีไอดี(PID)

ในงานวิจัยได้เลือกการป้อนกลับของอุณหภูมิในหม้อต้มฉนวนเป็นแบบพีไอดี ซึ่งการป้อนกลับชนิดนี้จะช่วยในการลดค่า Error ได้ดี การป้อนกลับชนิดอื่น ในการออกแบบระบบควบคุมจะต้องมีบล็อกไดอะแกรมการควบคุมของระบบที่ออกแบบในการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มดังแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุม

จากบล็อกไดอะแกรมอัตราขยายของ Loop ป้อนกลับจะให้มีค่าเป็น 1 ดังนี้ บล็อกไดอะแกรมสามารถเขียนใหม่



รูปที่ 3.17 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

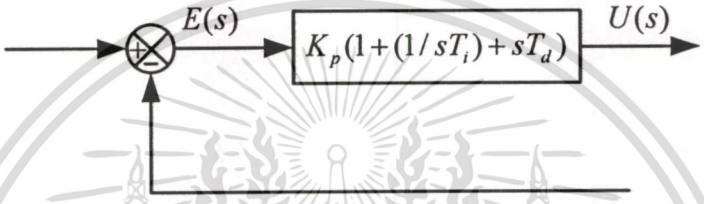
PID จะมีระบบรวมการทำงานแบบ ProPortion Control Caction , Integral Control Action และ Derivative Control Action เข้าด้วยกัน ดังนั้นสามารถเขียนสมการ

$$U(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{3.2}$$

ดังนั้นจะได้ Tranfer function

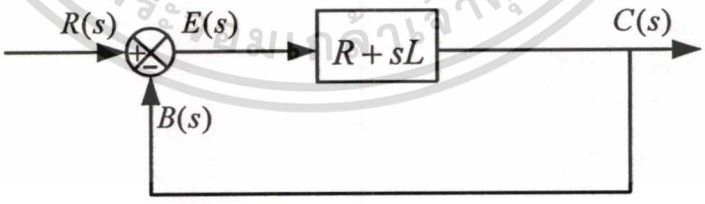
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left[1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right] \tag{3.3}$$

บล็อกไดอะแกรม



รูปที่ 3.18 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ PID

เนื่องจากชุดต้นแบบในงานวิจัย ชิ้นงานได้แก่หม้อต้ม ซึ่งความร้อนในการต้มน้ำที่เกิดขึ้นจะส่งผ่านขดลวดไฟฟ้าหรือฮีตเตอร์ โดยผ่านการควบคุมแรงดันที่จ่าย โดยปัจจัยสำคัญในการทดสอบคือควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลาซึ่งต้องมีการป้อนกลับของอุณหภูมิที่แม่นยำ ดังนั้นองค์ประกอบของ Plant ของระบบคือขดลวดความร้อน ในการออกแบบระบบควบคุมต้องมีบล็อกไดอะแกรมของชุดต้นแบบ สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 3.19

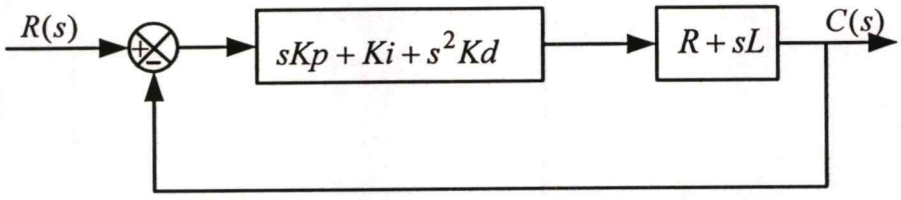


รูปที่ 3.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดต้นแบบ

จากการวิเคราะห์ระบบควบคุมแบบ PID โดยวิเคราะห์จากโปรแกรม MATLAB เมื่อป้อนสัญญาณทดสอบเป็น Unit Stop ให้แก่ ระบบทดสอบ เพื่อตรวจสอบว่ามีสถานะเป็นอย่างไร Plant ในระบบนี้ก็คือ หม้อต้มที่ถูกพันด้วยขดลวดความร้อน ในการออกแบบระบบ Ptant ที่เป็น หม้อต้มและอุปกรณ์ตัวสร้างความร้อนไม่สามารถหาค่าคงที่ K_m ออกมาได้ โดยจะกำหนดให้ค่า K_m มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 1 และเมื่อพิจารณา Transfer Tunction ของ PID Central สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 19



รูปที่ 3.20 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบเมื่อ Set K_m เป็น 1

การต่อระบบควบคุมแบบ PID เข้ากับระบบหม้อต้ม(Plant) สามารถต่อเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบลูปปิด ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งเมื่อแทนค่าสมการฟังก์ชันโอนย้ายของระบบควบคุมและของระบบงาน เมื่อทำการเขียนสมการในวงรอบเปิดก็จะได้สมการที่ 3.4 และ 3.5

$$\left|(sKp + Ki + s^2Kd)\times(R + sL)\right|_{s = j\omega_0} = 1 \tag{3.4}$$

$$\omega_{cn} = \frac{Ki}{Kp} \langle \omega_0 \tag{3.5}$$

โดยหลักการเลือกความถี่ตัดข้ามนั้นจะต้องพิจารณาจากผลตอบสนองเป็นสำคัญ เนื่องจากงานควบคุมจะเป็นลักษณะต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิจะต้องมีผลตอบสนองที่ไวพอสมควร ดังนั้น จำเป็นต้องเลือกความถี่ตัดข้ามมีค่ามาก แต่ก็ไม่อาจมากจนเกินไปเพราะอาจจะส่งผลต่ออัตราขยายสัญญาณรบกวนได้ ถ้าให้เวลาขาขึ้น(Rise time) มีค่าประมาณ 2.2 ms สามารถประมาณความถี่ตัดข้ามเท่ากับ 1000 rad/sec สำหรับการเลือกค่าความถี่หักมุมของตัวควบคุม เราต้องพิจารณาเสถียรภาพเป็นหลัก ในงานวิจัยใจเราให้ค่า $\omega_{cn} = \frac{Ki}{Kp} = 250\ rad/s$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (3.4) และ(3.5) สามารถหาค่า Kp Ki และ Kd ได้ดังนี้

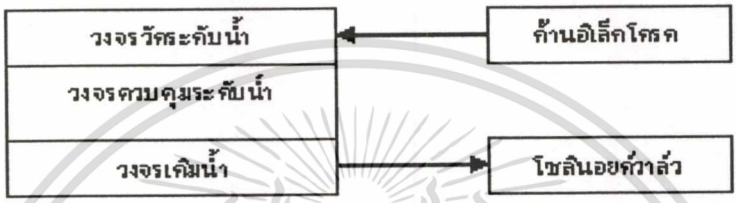
$$Kp = 2$$
$$Ki = 0$$
$$Kd = 5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบส่วนควบคุมระดับน้ำ

3.4.1 ไดอะแกรมการทำงานควบคุมระดับน้ำ

ในการออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำ จะมีส่วนการทำงานอยู่ 3 ส่วน ที่สำคัญ คือ อุปกรณ์วัดระดับน้ำ วงจรควบคุมระดับน้ำ อุปกรณ์เติมน้ำ โดยสามารถพิจารณาไดอะแกรม จากรูปที่ 3.17 โดยอุปกรณ์วัดระดับน้ำได้ใช้อิเล็กโตรดเป็นตัววัดระดับน้ำ ส่วนวงจรควบคุมระดับน้ำได้ใช้ออปแอมป์เป็นตัวเปรียบเทียบในการจ่ายไฟเข้า Coil และอุปกรณ์เติมน้ำได้ใช้โซลินอยด์วาล์วเป็นตัวจ่ายน้ำเข้าไปที่ภาชนะเมื่อพบน้ำลดลง



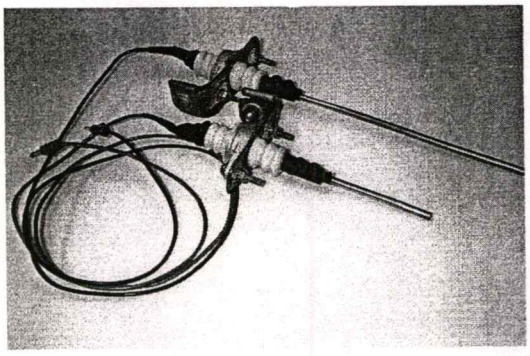
รูปที่ 3.21 แสดงไดอะแกรมส่วนควบคุมระดับน้ำ

3.4.2 ก้านอิเล็กโตรด

ประยุกต์การใช้อุปกรณ์ตรวจจับระดับของเหลวแบบก้าน Electrode 3 แท่ง โดยในที่นี้ใช้หัวชุดควบคุมและก้าน Electrode แบบทนความร้อน เพียง 2 ชุด เพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดปัญหาในการติดตั้งอุปกรณ์ลง ดังนี้

- แท่งสั้น คือ แท่งตัวนำควบคุมระดับน้ำต่ำสุด
- แท่งยาว คือ แท่งตัวนำที่ทำหน้าที่นำไฟฟ้าร่วม

หลักการทำงาน คือ ถ้าระดับน้ำลดลงจนเลยแท่งสั้นไป (ไม่มีการนำกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น) วงจรควบคุมก็จะสั่งให้เปิดวาล์วน้ำ และเมื่อน้ำสูงถึงแท่งสั้น (มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น) วงจรควบคุมก็จะสั่งให้ทำการปิดวาล์วน้ำที่ปลายสายไฟของก้านอิเล็กโตรด จะเป็นแจ็คสำหรับเสียบเข้ากับเทอร์มินอลบนแผงยึดแผงวงจร เพื่อให้สามารถแยกก้านอิเล็กโตรดออกจากแผงวงจรได้ง่าย ๆ ทำให้สะดวกในการตรวจสอบหรือซ่อมแซมอุปกรณ์

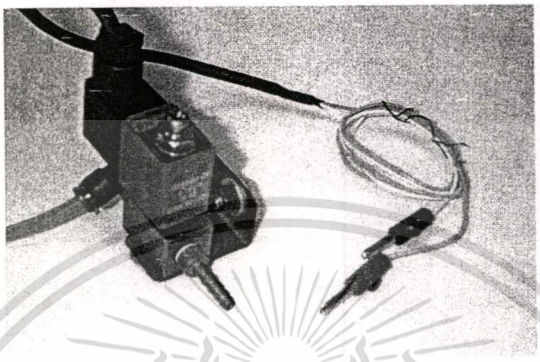


รูปที่ 3.22 แสดงก้านอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 โซลินอยด์วาล์ว

เลือกใช้โซลินอยด์วาล์วชนิดใช้กับน้ำ ซึ่งใช้กับไฟตรง ขนาด 12 โวลต์ เพราะสามารถใช้กับวงจรจ่ายไฟที่เตรียมเอาไว้ได้ ที่ปลายสายไฟของโซลินอยด์วาล์ว จะเป็นแจ็คสำหรับเสียบเข้ากับเทอร์มินอลบนแผงยึดแผงวงจร เพื่อให้สามารถแยกโซลินอยด์วาล์วออกจากแผงวงจรได้ง่าย ๆ ทำให้สะดวกในการตรวจสอบหรือซ่อมแซมอุปกรณ์

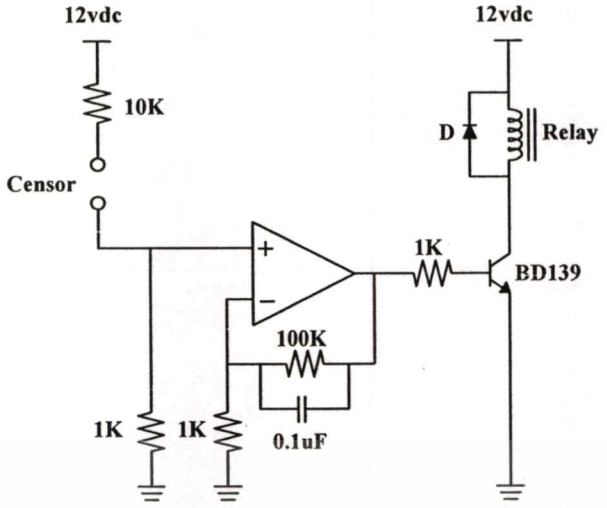


รูปที่ 3.23 แสดงโซลินอยด์วาล์ว

3.4.4 วงจรควบคุมระดับน้ำ

วงจรควบคุมระดับน้ำ ได้แยกการควบคุมออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจะใช้วงจรคอมพาราเตอร์ ในการเปรียบเทียบแรงดัน ระหว่าง 2 ขาของออปแอมป์ โดยมีหลักการทำงานดังนี้ ในการตรวจจับระดับน้ำได้ใช้ก้านอิเล็กโตรด 2 ก้าน เป็นตัวตรวจเช็ค จากวงจรจะพบว่าเมื่อมีน้ำท่วมก้านอิเล็กโตรดทั้ง 2 ก้าน จะทำให้มีกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านก้านอิเล็กโตรดทั้ง 2 จากวงจรทำให้มีแรงดัน 12 V ไหลผ่าน คอมพาราเตอร์ ซึ่งจะทำให้เอาท์พุทมีศักย์เป็นลบ จากวงจร ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN หยุดการทำงาน ซึ่งจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไปจ่ายที่คอยท์โซลินอยด์ ซึ่งคุณสมบัติการทำงานลักษณะนี้จะไม่มีการเติมน้ำเนื่องจากน้ำท่วมก้านทั้ง 2 อิเล็กโตรด ถ้าน้ำสูงท่วม แต่ก้านยาวก้านเดียว ก็จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านก้านอิเล็กโตรดทั้ง 2 แสดงว่าน้ำน้อยเกินไป วงจร คอมพาราเตอร์ เอาท์พุท จะมีศักย์เป็นบวก ทำให้ทรานซิสเตอร์ (BD136) ทำงานจ่ายไฟ 12 V จะส่งผลให้โซลินอยด์วาล์ว เปิดนำไหลผ่านเป็นเวลานานประมาณ 2 วินาที ต่อครั้ง จนน้ำท่วมก้านอิเล็กโตรดทั้ง 2 ก็จะหยุดการเติมน้ำ

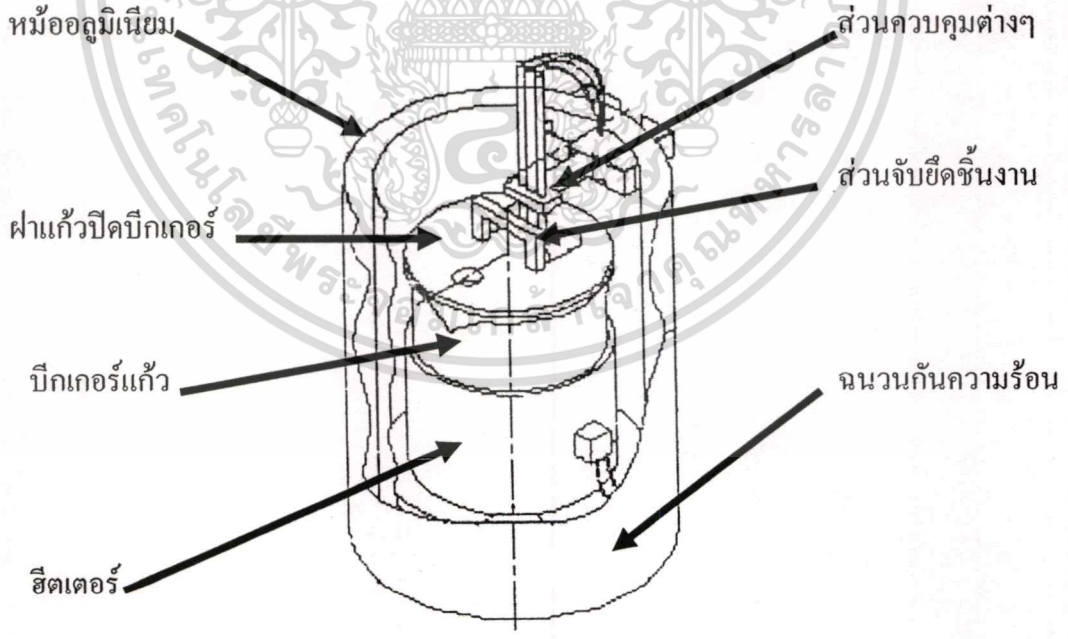
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 แสดงวงจรควบคุมระดับน้ำ

3.5 การออกแบบหม้อต้ม

ในส่วนของหม้อต้มจะประกอบไปด้วย ตัวหม้อ, ฝาแก้วปิดบีกเกอร์, ส่วนจับยึดชิ้นงาน, ฉนวนกันความร้อน และส่วนจับยึดอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

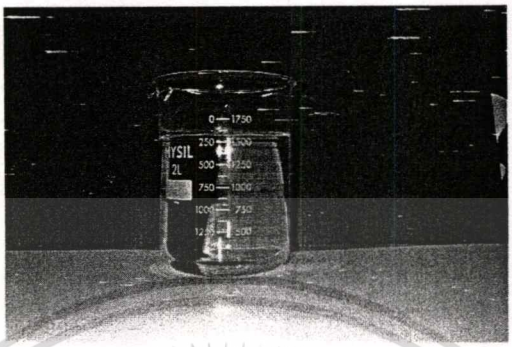


รูปที่ 3.25 แสดงโครงสร้างของหม้อทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ตัวหม้อ

ใช้บีกเกอร์แก้วทนความร้อนยี่ห้อ HYSIL เป็นภาชนะใส่น้ำในการต้ม เพราะแก้วจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยเลือกใช้บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 13 เซนติเมตร สูง 19 เซนติเมตร เนื่องจากมีขนาดพอเหมาะในการทดสอบชิ้นงานไม่เกินครั้งละ 30 ชิ้น



รูปที่ 3.26 แสดงบีกเกอร์

3.5.2 ฝาแก้วปิดบีกเกอร์

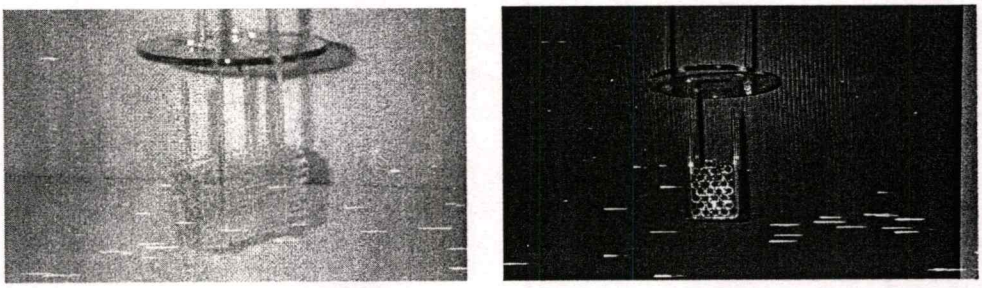
ใช้แผ่นแก้วทำเป็นฝาปิดเนื่องจากมาตรฐานกำหนดเอาไว้โดยตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 เซนติเมตร พร้อมทั้งเจาะรูสำหรับใส่ส่วนจับยึดชิ้นงาน, เทอร์โมคัปเปิล, ก้านอิเล็กโตรด และโซลินอยด์วาล์ว

รูปที่ 3.27 แสดงฝาแก้วปิดบีกเกอร์

3.5.3 ส่วนจับยึดชิ้นงาน

ใช้หลอดแก้วทนความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ในการแยกชิ้นงานไม่ให้สัมผัสกันขณะทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แสดงชิ้นงาน และส่วนจับยึดชิ้นงาน

โดยจะตัดหลอดแก้วให้มีความยาว 10 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นงานใส่ไว้ด้านในหลอดแก้ว และนำหลอดแก้วนี้มาวางไว้บนแท่งแก้วทนความร้อนที่ถูกดัดให้สามารถวางหลอดแก้วได้สูงสุด ประมาณ 30 หลอด

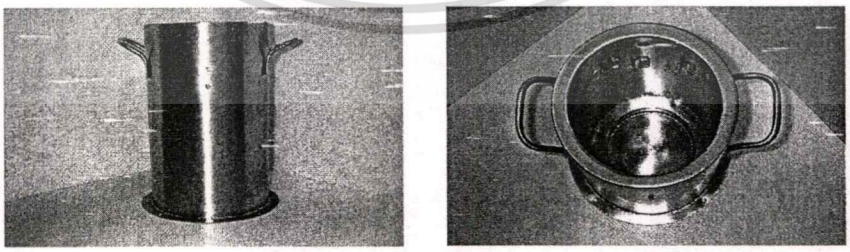
3.5.4 ฉนวนกันความร้อน

ใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อเหตุผลดังต่อไปนี้

- ช่วยในการรักษาอุณหภูมิ
- ป้องกันอันตรายจากการสัมผัสฮีตเตอร์
- เป็นตัวยึดในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล, ก้านอิเล็กโตรด และโซลินอยด์วาล์ว
- เพื่อความเรียบร้อย

สำหรับฉนวนกันความร้อนที่ใช้ มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกสูง 36 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน/ภายนอก 18, 23 เซนติเมตร ตามลำดับ เลือกใช้โครงสร้างแบบอลูมิเนียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความสวยงามกว่าแบบเหล็ก มีใยแก้วเป็นฉนวนกันความร้อน

ในการใช้งานสามารถยกบีกเกอร์เข้า/ออกได้ โดยที่ฮีตเตอร์ยังอยู่ภายในฉนวน โดยฮีตเตอร์จะถูกวางไว้สูงจากก้นฉนวนประมาณ 3 เซนติเมตร



รูปที่ 3.29 แสดงฉนวนกันความร้อน

3.5.5 ส่วนจับยึดเทอร์โมคัปเปิล, ก้านอิเล็กโตรด และโซลินอยด์วาล์ว

ส่วนนี้ใช้จับยึดเทอร์โมคัปเปิล, ก้านอิเล็กโตรด และโซลินอยด์วาล์วให้ติดอยู่กับฉนวนกันความร้อน เพื่อความสะดวกและความเป็นระเบียบในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับส่วนจับยึดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- ส่วนจับยึดอุปกรณ์ เป็นแผ่นเหล็กบางที่ถูกเจาะรู และดัดให้งอ โดยจะนำมาประกอบเข้ากับบานพับผีเสื้อของหน้าต่างมุ้งลวดและอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งจะมีทั้งหมด 4 ชุด
- ส่วนฐาน เป็นบานพับผีเสื้อของหน้าต่างมุ้งลวดอีกด้านหนึ่ง โดยจะถูกยึดให้ติดอยู่กับฉนวนกันความร้อน แบ่งเป็นด้านใน 4 ตัว (สำหรับจับยึดเวลาใช้งาน) และด้านนอก 4 ตัว (เป็นที่พักของอุปกรณ์เวลาไม่ใช้งาน)

สำหรับเวลาใช้งานจะนำส่วนจับยึดอุปกรณ์ มาประกอบ(เสียบ)เข้ากับส่วนฐาน ซึ่งการประกอบแบบนี้ สามารถแยก/ประกอบส่วนจับยึดอุปกรณ์ได้อย่างง่ายดาย

รูปที่ 3.30 แสดงส่วนจับยึดอุปกรณ์

3.5.6 พิกัดกระแสของอุปกรณ์

สำหรับโหลดที่มีในงานวิจัยแยกได้ 2 ส่วน คือ

- ฮีตเตอร์ ใช้กระแส = 600 W / 220 V = 2.73 A.
- ส่วนควบคุมอื่น ๆ ใช้กระแสประมาณ 1 A.

เพราะฉะนั้น หม้อแปลงที่ใช้ต้องมีพิกัดกระแสมากกว่า 1 A. และฟิวส์ ต้องมีพิกัดประมาณ 4 A.

3.6 สรุปการออกแบบ

จากการออกแบบต้นแบบของชุดทดสอบจะต้องคำนึงถึงมาตรฐานการทดสอบเป็นสำคัญ และในการสร้างชุดทดสอบต้นแบบจะต้องมีพื้นฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์กำลังเข้ามาเกี่ยวข้องในด้านการสร้างการควบคุมขดลวดความร้อน และในส่วนการควบคุมต่างๆ ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม ซึ่งในการออกแบบแต่ละส่วนของวงจรได้มีการเก็บผลสัญญาณทางด้านอินพุทและเอาท์พุทของวงจร เพื่อยืนยันการทำงานของวงจรที่ถูกต้อง ตั้งแต่การตรวจจับสัญญาณอุณหภูมิตลอดการสร้างสัญญาณการควบคุมเฟสคอนโทรล และในการออกแบบได้มีการเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานที่เที่ยงตรง เช่นชนิดของเทอร์โมคัปเปิล โดยการทดสอบวงจรต่างๆ ในชุดทดสอบต้นแบบและการทดสอบใช้งานจริงทำให้ผลการทดสอบอุณหภูมิค่าผิดพลาด ±2 องศาเซลเซียส ทำให้การใช้งานของเครื่องมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบ และผลการทดสอบ

4.1 กล่าวนำ

การทดสอบสำหรับวิทยานิพนธ์ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบที่แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือการทดสอบ การทำงานของชุดทดสอบต้นแบบที่จัดสร้าง เพื่อตรวจสอบการทำงานของตัวเครื่องเปรียบเทียบกับการทำงานของเครื่องมือวัดมาตรฐาน และการทดสอบการวัดค่าการดูดซึมน้ำ ของฉนวนชนิด XLPE ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 เทียบกับชุดทดสอบฉนวนเคเบิลมาตรฐานที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์ของการทดสอบคือ

1. การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลความถูกต้อง แม่นยำจากชุดทดสอบต้นแบบกับชุดทดสอบมาตรฐาน

2. การทดสอบถึงปัจจัย และเงื่อนไขที่มีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของฉนวนเคเบิลโดยแบ่งการทดสอบเป็นส่วนของการทดสอบส่วนประกอบต่างๆ ของตัวเครื่องและการทดสอบโปรแกรมการใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์

3. การทดสอบและผลการทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน IEC 60502-2 จากการทดสอบตามมาตรฐานนี้จะเป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้น

4.2 วัตถุประสงค์

4.2.1 เพื่อประยุกต์การควบคุมการทำงาน และควบคุมเงื่อนไขในการทดสอบ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2.2 เพื่อพัฒนาชุดทดสอบให้มีความสะดวก เหมาะแก่การใช้งานในการทดสอบยิ่งขึ้น

4.2.3 เพื่อให้ผู้ทดสอบเข้าใจถึงลักษณะการทดสอบการวัดค่าการดูดซึมน้ำ

4.2.4 เพื่อเปรียบเทียบผลจากชุดทดสอบที่จัดสร้างกับชุดทดสอบมาตรฐานเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด

4.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล

4.3.1 หลักการและเหตุผล

การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบ และอุปกรณ์ในการนำมาทำชุดทดสอบก่อนนำไปใช้งานจริง หรือนำไปทดสอบในขั้นตอนอื่นๆต่อไป ช่วยให้สามารถทราบค่าของอุณหภูมิที่มีผลต่อความผิดพลาด (Error Influence) นอกจากนี้ยังเป็นการตรวจสอบค่าของอุณหภูมิที่ได้ว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงพอหรือไม่

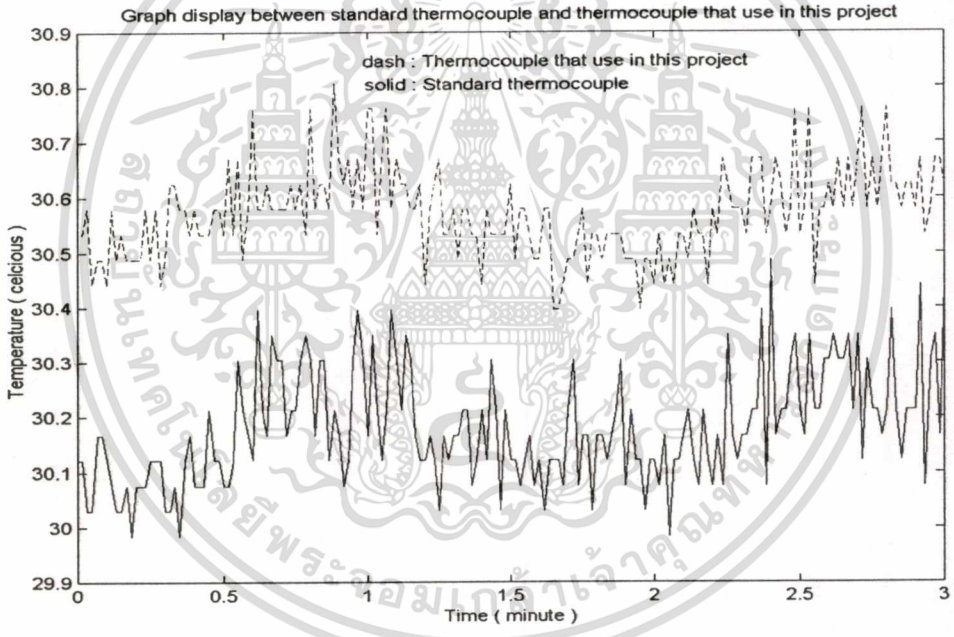
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 หัวข้อการทดสอบ

การทดสอบการทำงานตรวจจับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบ ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อดูค่าการตรวจจับอุณหภูมิ และความถูกต้องของอุณหภูมิในกรณีที่จะนำไปใช้กับชุดทดสอบที่จัดสร้าง โดยเริ่มการทดสอบจากอุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิไปครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส

4.3.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้กับชุดทดสอบกับเทอร์โมคัปเปิลของเครื่องมือวัดมาตรฐานนั้นจะเห็นว่ามีความไวในการตรวจจับอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันในด้านอัตราการขยายสัญญาณเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าเป็นช่วงการวัดอุณหภูมิทดสอบที่ ประมาณ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิจะแตกต่างกันประมาณ 0.4 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก Analyzing Recorder ของเทอร์โมคัปเปิลชุดทดสอบที่จัดสร้างเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชุดทดสอบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบอุณหภูมิมาตรฐาน เปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบที่จัดสร้าง

อุณหภูมิช่วงที่ทำการทดสอบ (^{o}C)	ค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบมาตรฐาน (^{o}C)	ค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบที่จัดสร้าง (^{o}C)	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (^{o}C)	ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ (%)
30	30.1	30.5	0.4	1.32
35	35.2	35.6	0.4	1.13
40	40.1	40.5	0.4	0.99
45	45.2	45.5	0.3	0.66
50	50.2	50.4	0.2	0.39
55	55.3	55.5	0.2	0.36
60	60.2	60.3	0.1	0.16
65	65.5	65.6	0.1	0.15
70	70.1	70.2	0.1	0.14
75	75.2	75.3	0.1	0.13
80	80.1	80.1	0	0
85	85.3	85.4	0.1	0.11
90	90.1	90.2	0.1	0.11

4.3.4 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจากตารางที่ 4.1 จะแสดงค่าอุณหภูมิของชุดทดสอบมาตรฐานเปรียบเทียบกับชุดทดสอบที่จัดสร้าง จะเห็นว่ามีค่าการตรวจจับอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน จะมีค่าแตกต่างกันพอสมควรในช่วงอุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อช่วงของอุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ช่วงประมาณ 60 องศาเซลเซียส ค่าของอุณหภูมิจะมีค่าใกล้เคียงกันแตกต่างกันไม่เกิน 0.1 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถนำเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบที่จัดสร้างมาทำการตรวจจับอุณหภูมิของการทดสอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

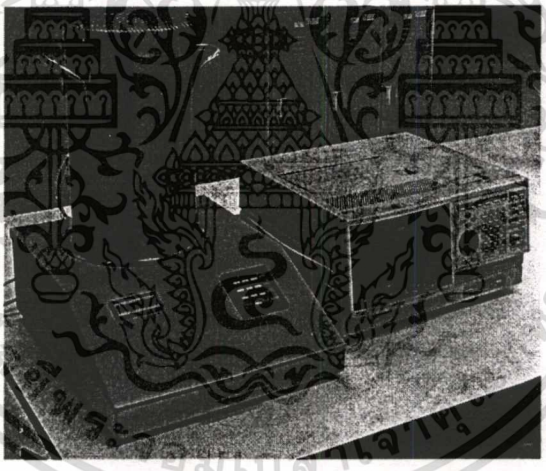
4.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิในระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ 50 – 90 องศาเซลเซียส

4.4.1 หลักการและเหตุผล

การทดสอบความถูกต้องของการควบคุมอุณหภูมิในช่วงต่างๆ ของชุดทดสอบตั้งแต่ช่วงของอุณหภูมิตั้งแต่ 50-90 องศาเซลเซียส เพื่อดูช่วงการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละช่วง ว่าสามารถทำการควบคุมได้ตามต้องการหรือไม่ โดยทำการวัดเปรียบเทียบค่าความถูกต้องระหว่างชุดทดสอบที่จัดสร้างและเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิมาตรฐาน

4.4.2 หัวข้อการทดสอบ

ทำการทดสอบโดยทำการควบคุมและวัดค่าอุณหภูมิทีละค่าตั้งแต่ 50-90 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มช่วงอุณหภูมิทีละ 10 องศาเซลเซียส ตามช่วงที่ต้องการ แล้วจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในชุดทดสอบที่จัดสร้างและควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ต้องการตามที่ต้องการทดสอบ หลังจากนั้นทำการวัดค่าของอุณหภูมิจากชุดทดสอบที่จัดสร้างเปรียบเทียบกับการวัดค่าโดยการใช้เครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิมาตรฐาน ดังรูปที่ 4.2

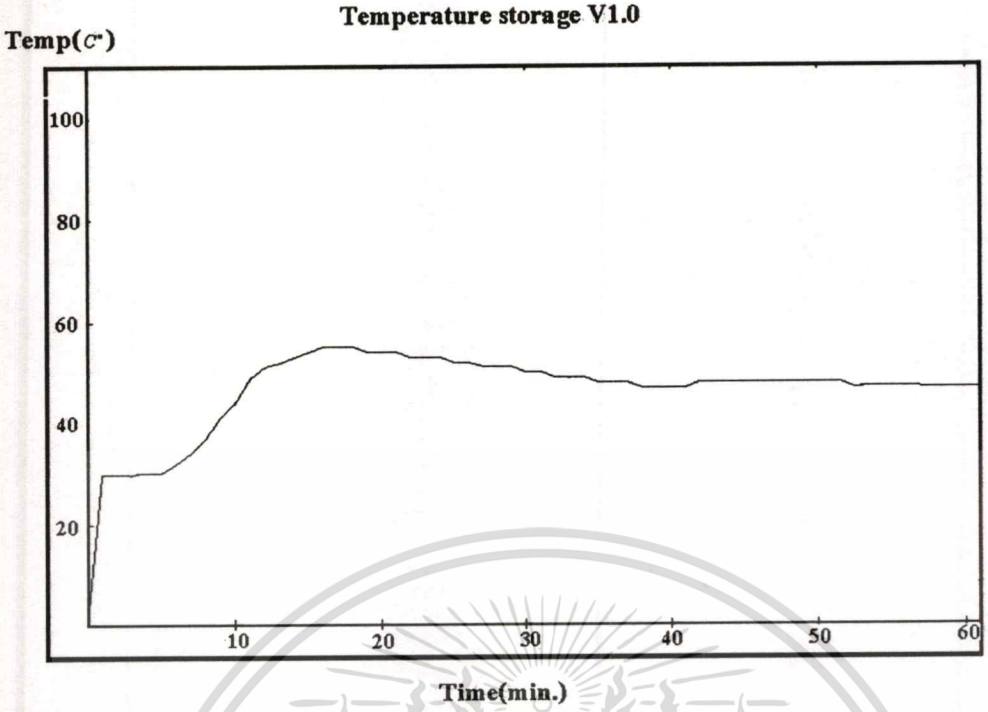


รูปที่ 4.2 แสดงการทดสอบควบคุมอุณหภูมิค่าต่างๆของชุดทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิมาตรฐาน

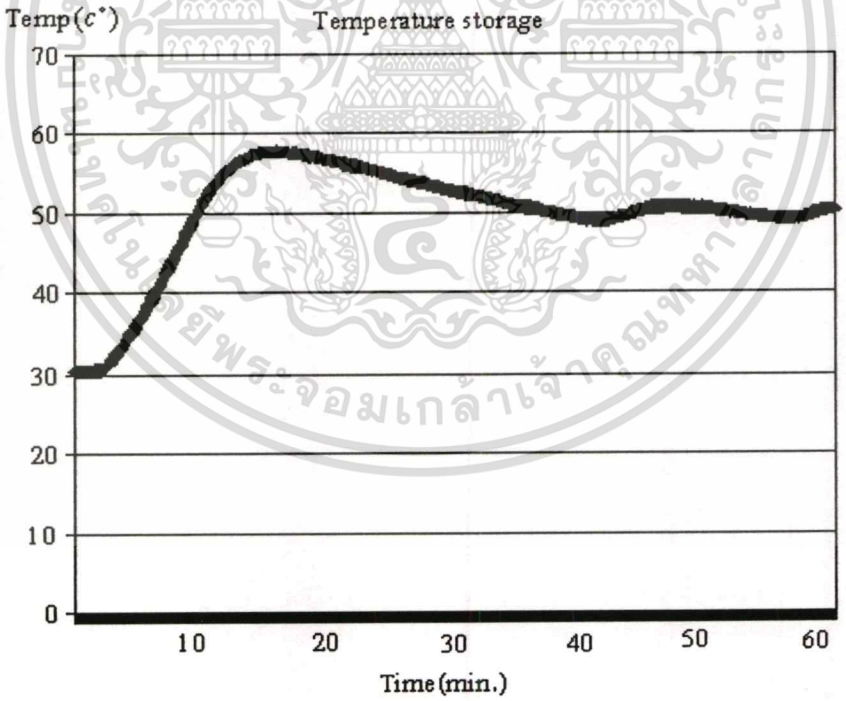
4.4.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิในระดับต่างๆ ตั้งแต่ 50- 90 องศาเซลเซียส โดยทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบจากชุดทดสอบและเครื่องมือวัดมาตรฐาน จะเห็นว่ากราฟการควบคุมอุณหภูมิที่ได้จากชุดทดสอบมีค่าที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน และมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ±2 องศาเซลเซียส ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.3-4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

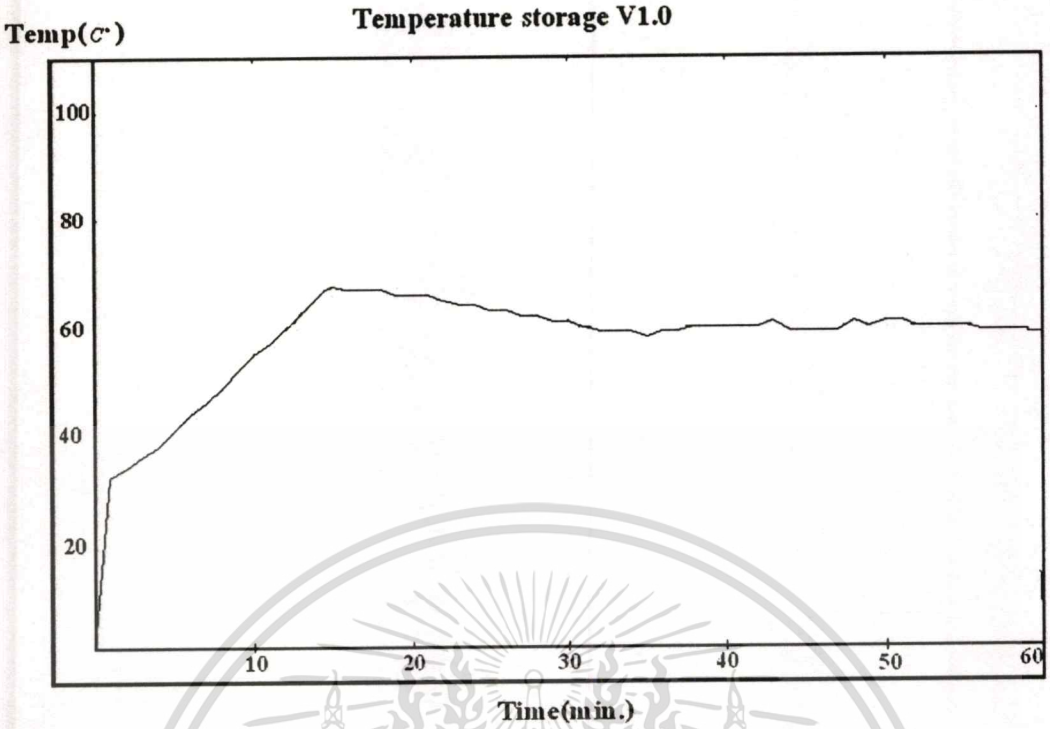


รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

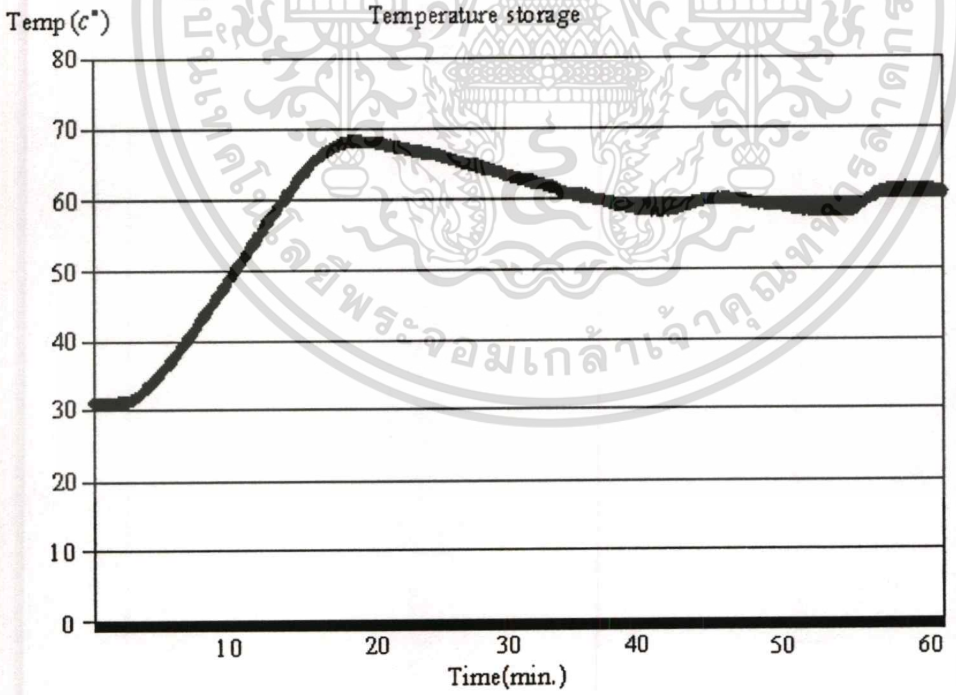


รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

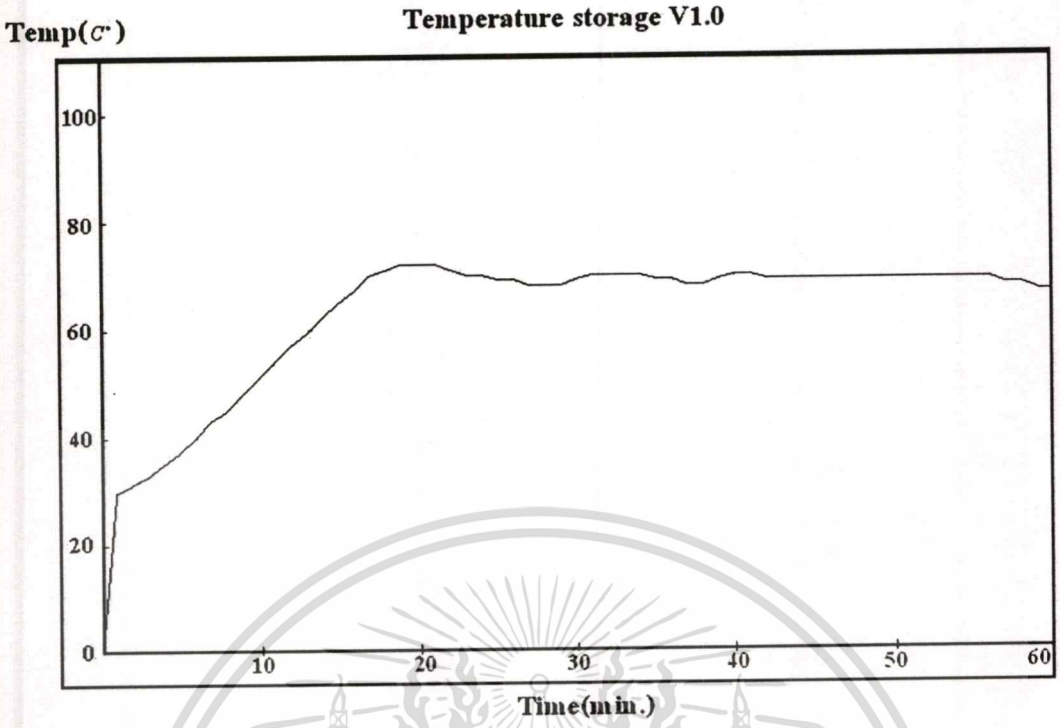


รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

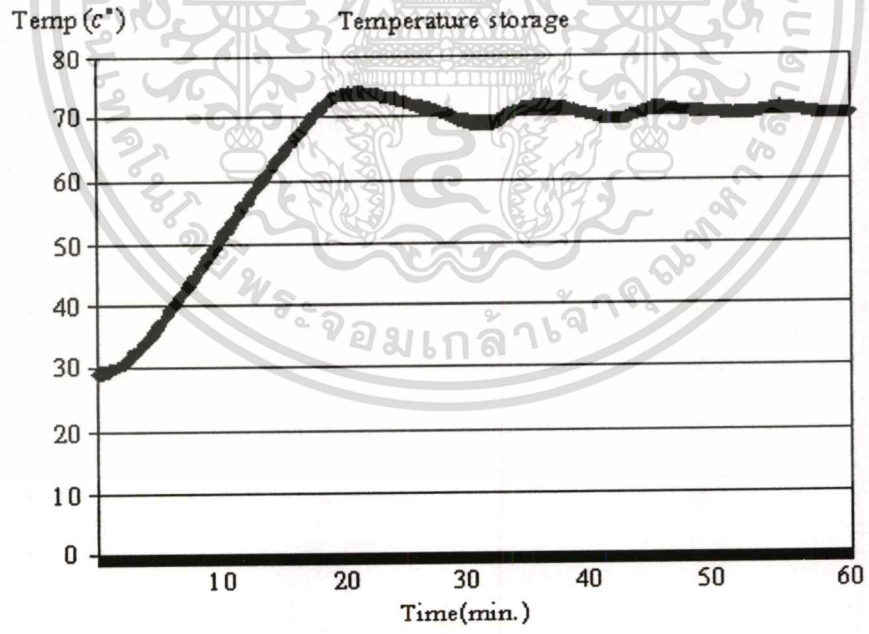


รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

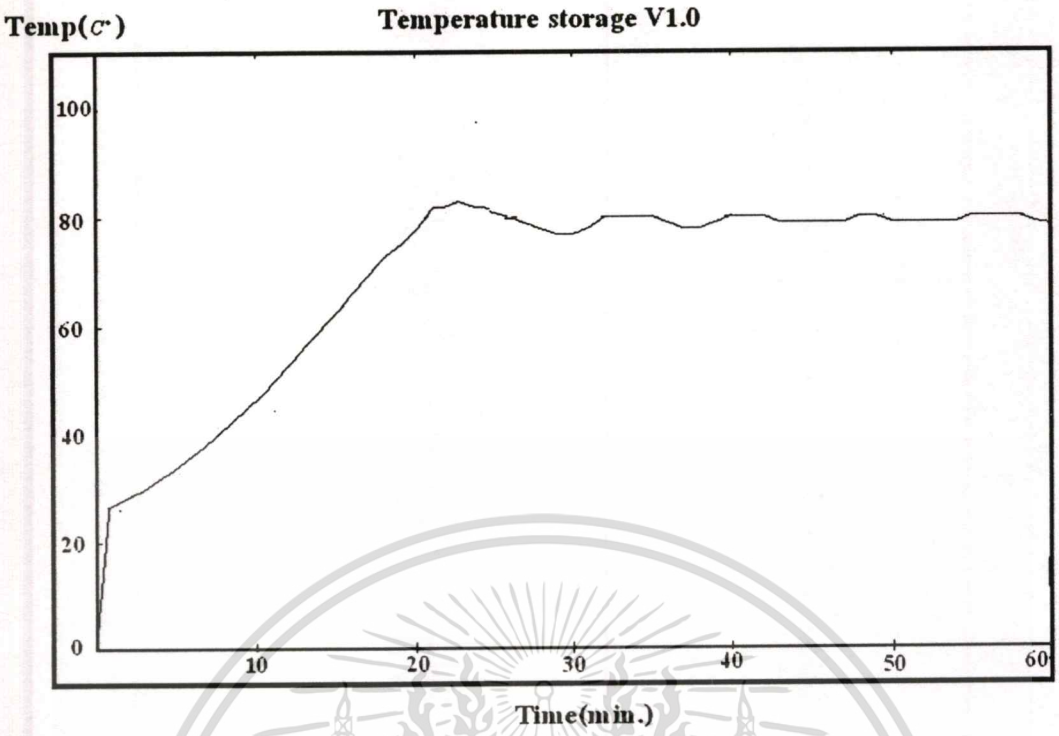


รูปที่ 4.7 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

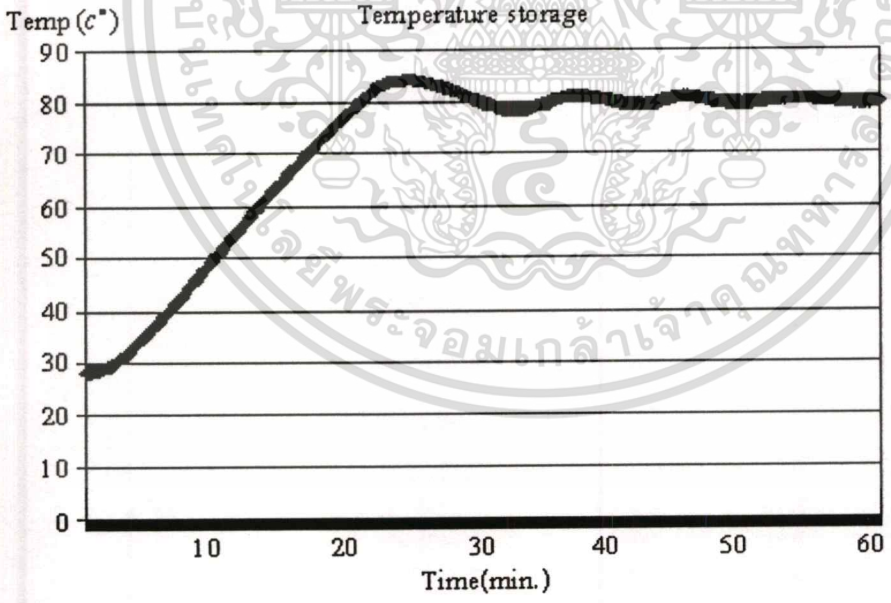


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

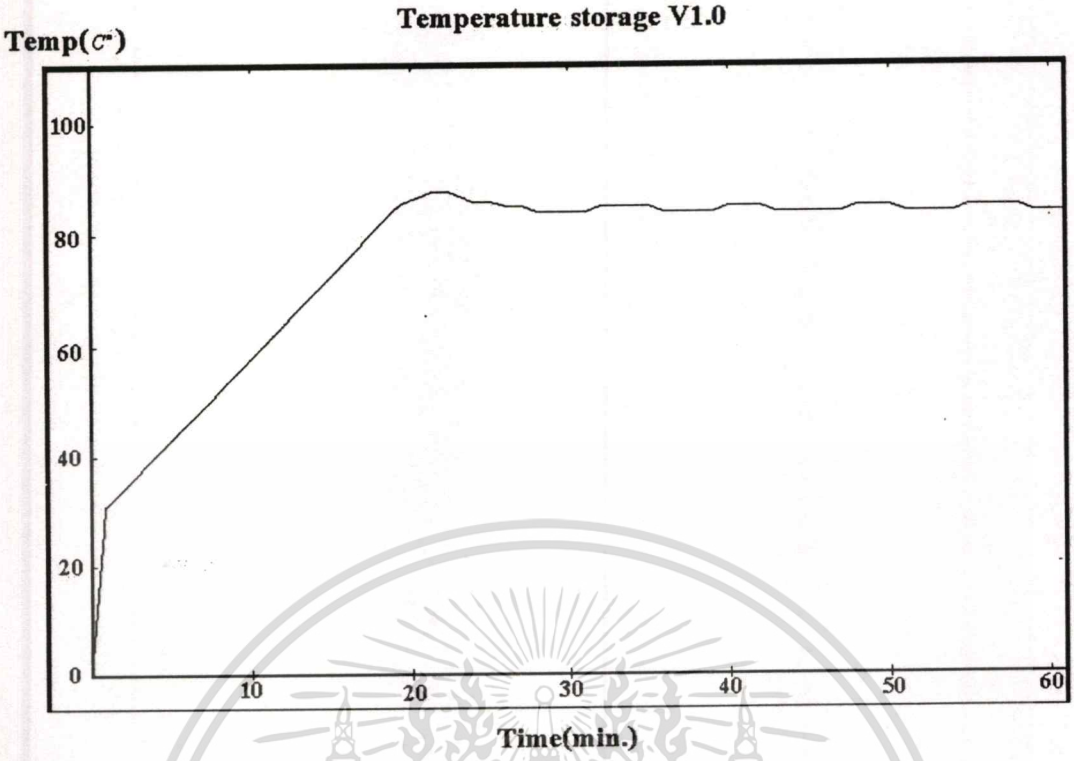


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

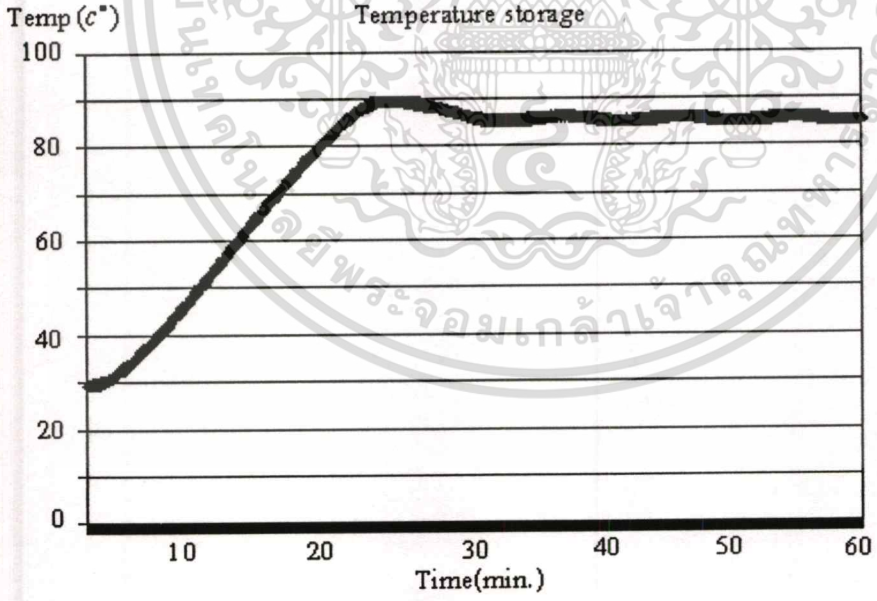


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

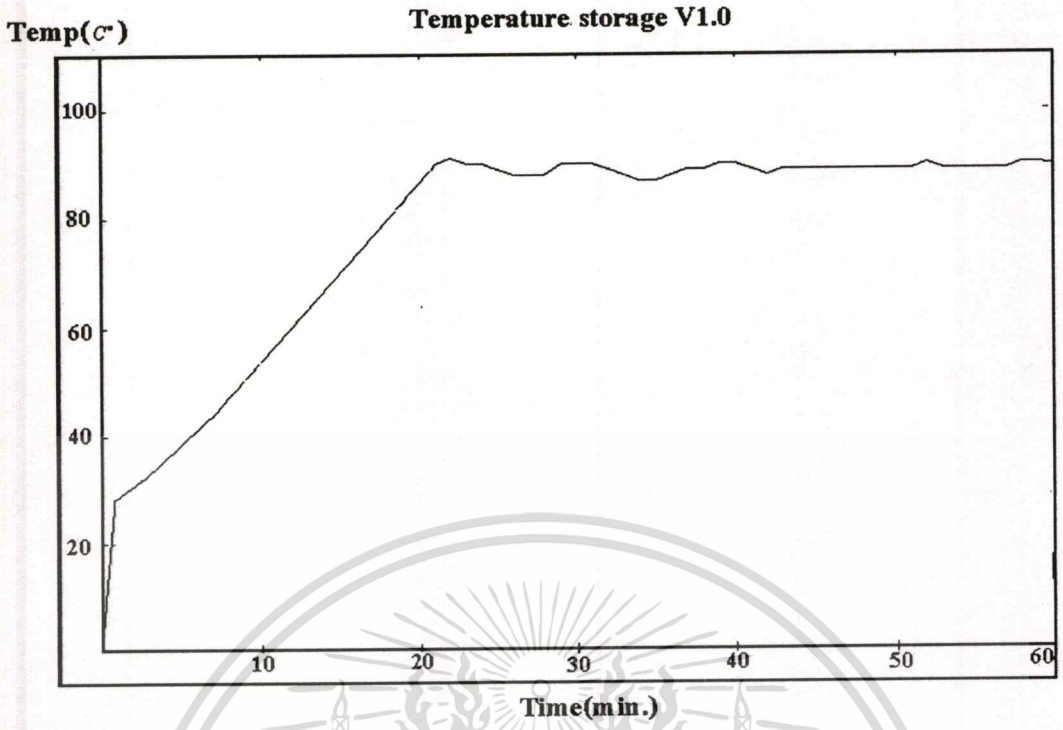


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

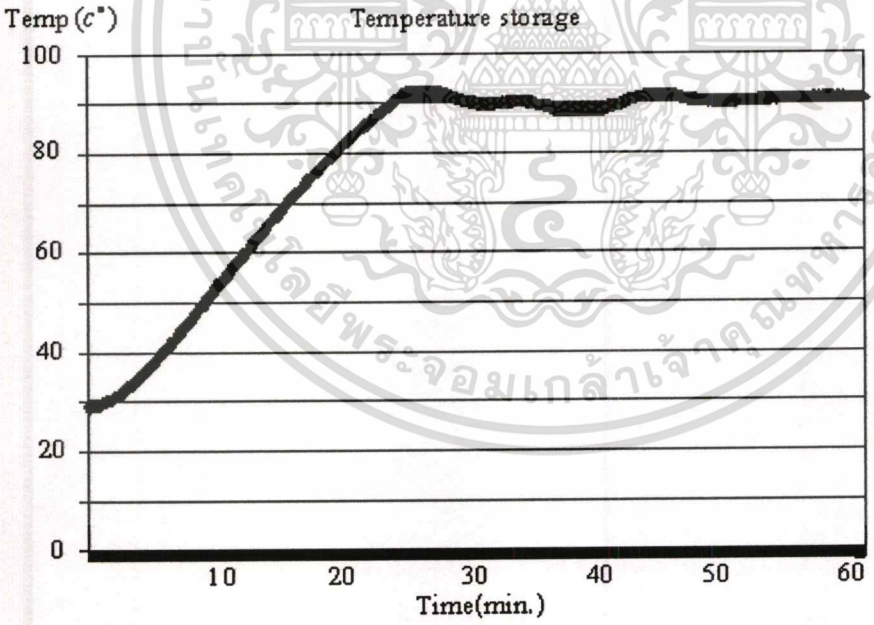


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ Recorder ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่จัดสร้าง โดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน โดยการทดสอบอุณหภูมิของชุดทดสอบที่จัดสร้างได้ทำการทดสอบอุณหภูมิที่ 50^0, 60^0, 70^0, 80^0, 85^0, 90^0 ที่เวลา 60 นาที จากผลการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน ไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส ในสภาวะคงที่ แต่ในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30^0 อุณหภูมิที่ตั้งไว้จะพบว่าค่าอุณหภูมิจะเบี่ยงเบนไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส

4.5 ผลการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน

4.5.1 หลักการและเหตุผล

การทดสอบความถูกต้องของการควบคุมอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ในกรณีศึกษานี้จะทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 85±2 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 14 วัน ของชุดทดสอบ ก่อนนำไปใช้งานจริง

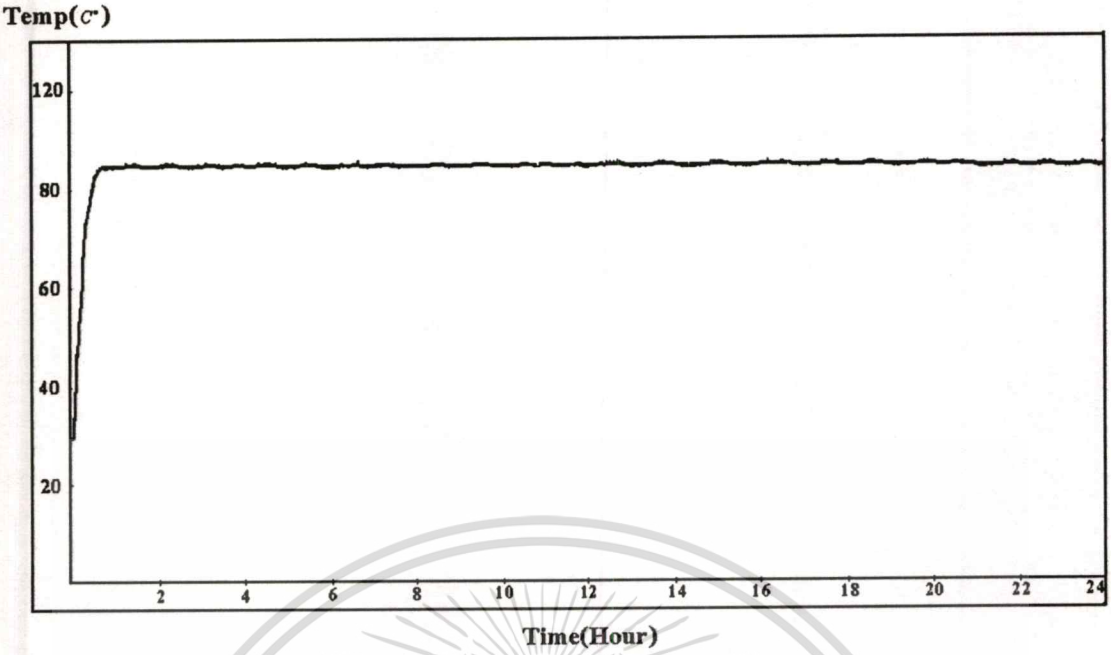
4.5.2 หัวข้อการทดสอบ

ทำการทดสอบโดยการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำไปให้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ในกรณีศึกษานี้คือการควบคุมอุณหภูมิที่ 85±2 องศาเซลเซียส โดยทำการควบคุมเงื่อนไขต่างๆ ของการทดสอบคือ การควบคุมอุณหภูมิ, ระดับน้ำ ภายในระยะเวลา 14 วัน เริ่มการทดสอบจากอุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 85 องศาเซลเซียส

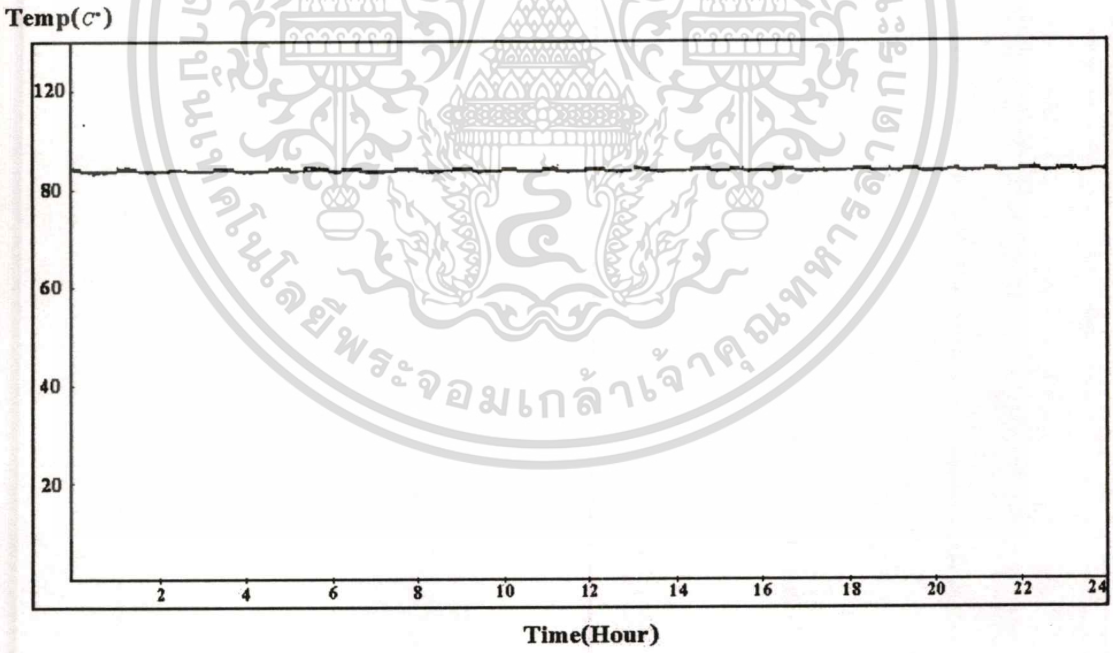
4.5.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจากอุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส แล้วทำการควบคุมอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 14 วัน ซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูล แล้วทำการถ่ายโอนข้อมูลและประมวลผลแล้วแสดงผลของข้อมูลเป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.15-4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

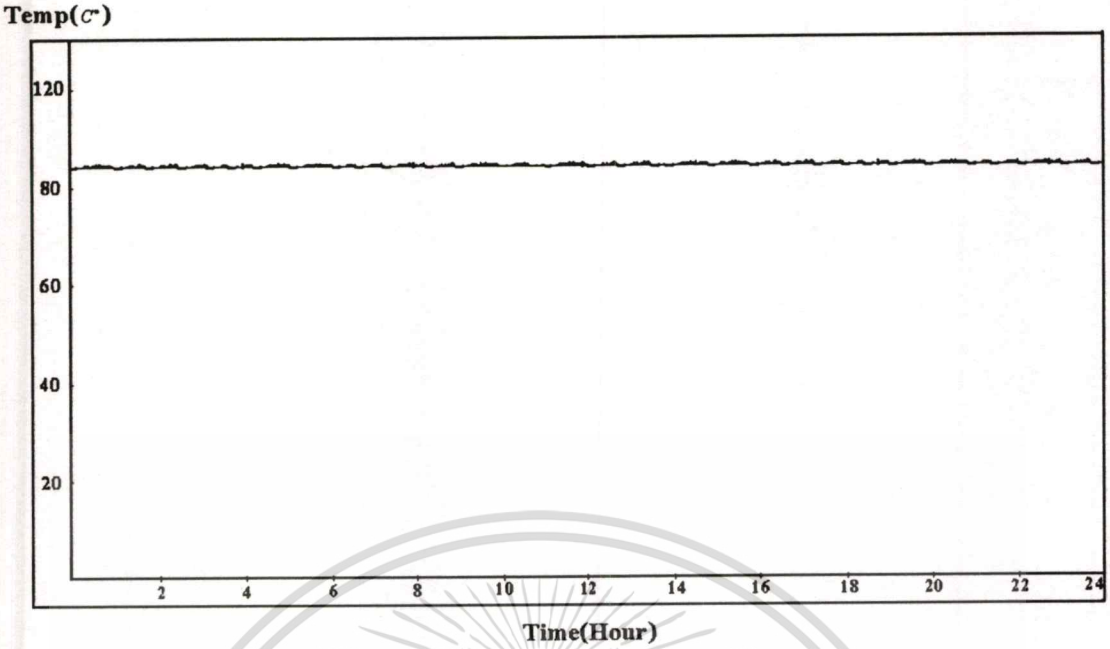


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 1

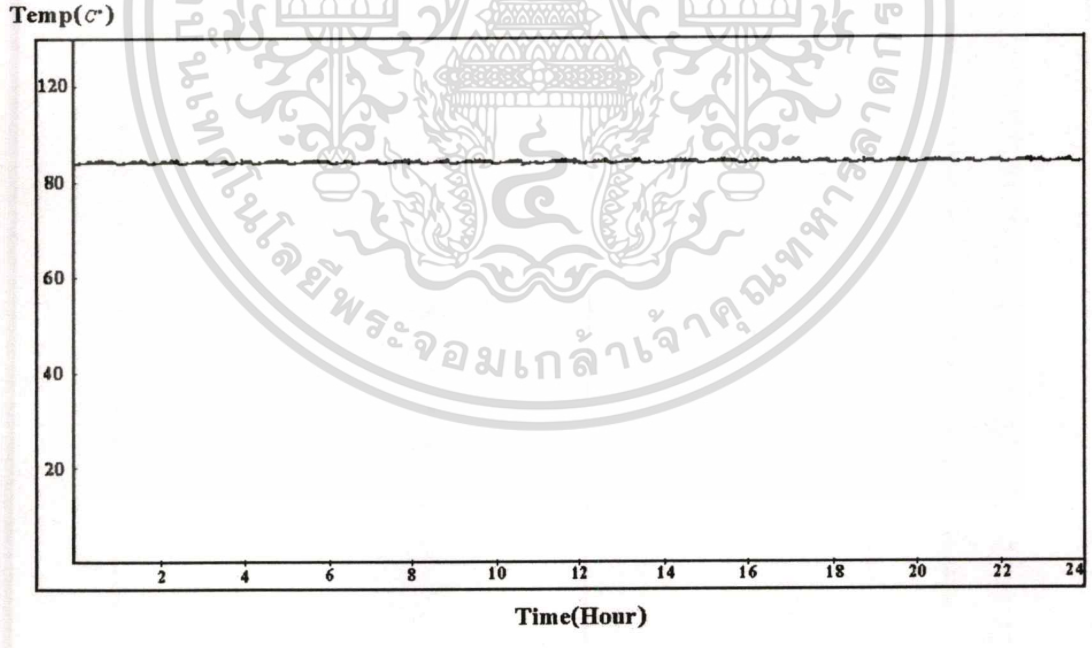


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

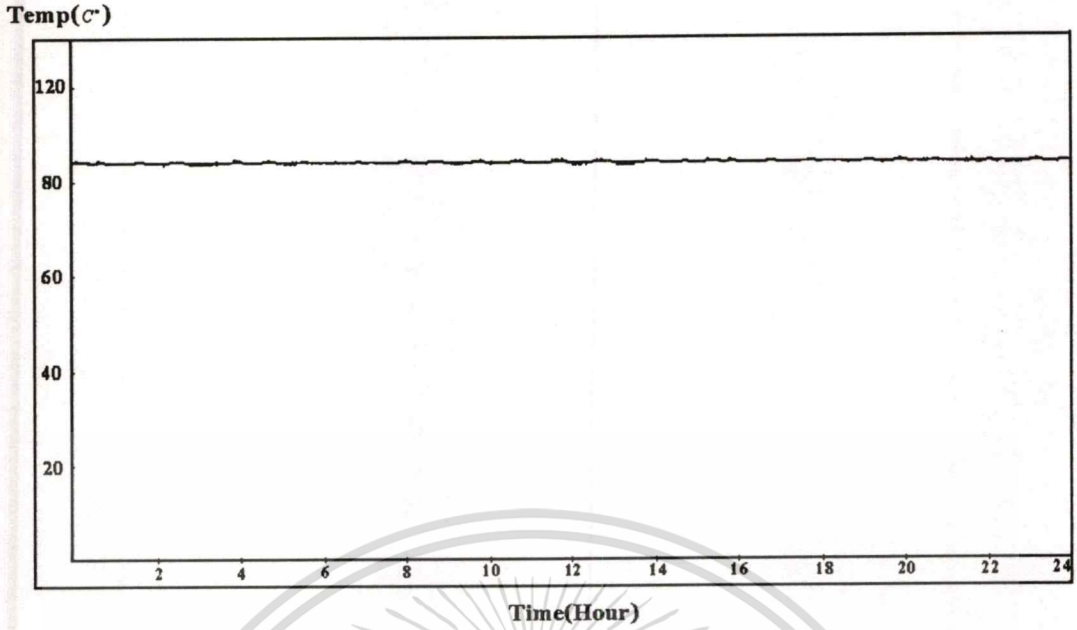


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 3

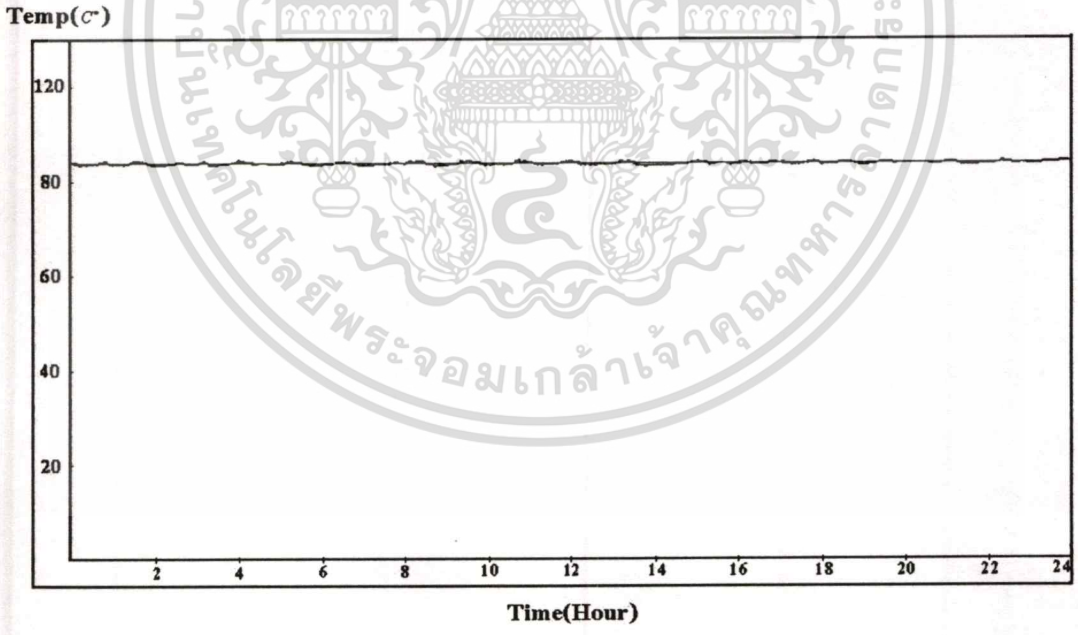


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

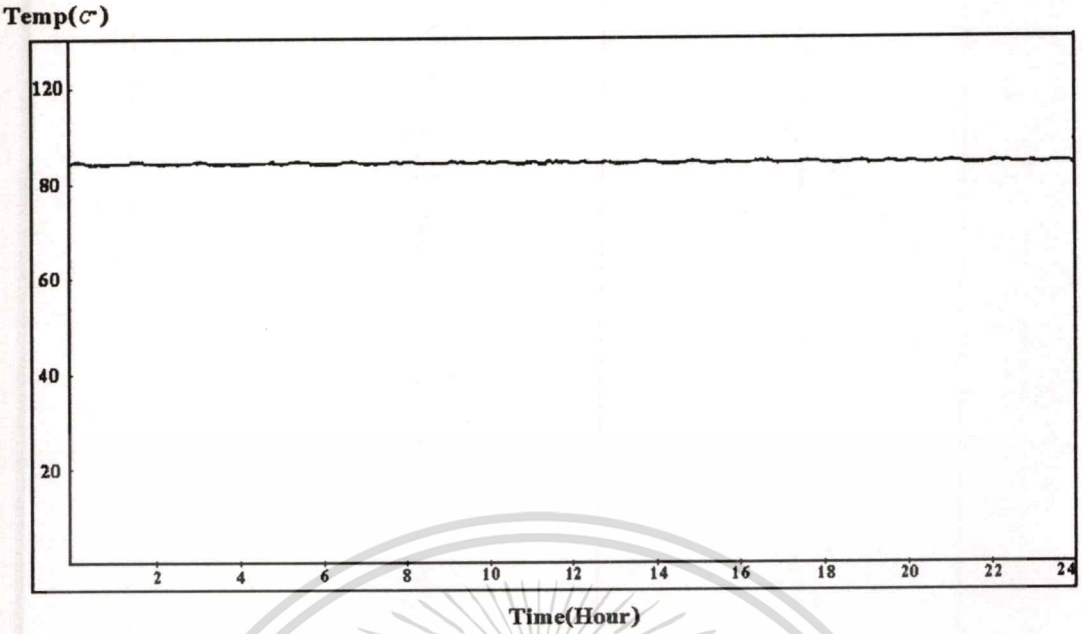


รูปที่ 4.19 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 5

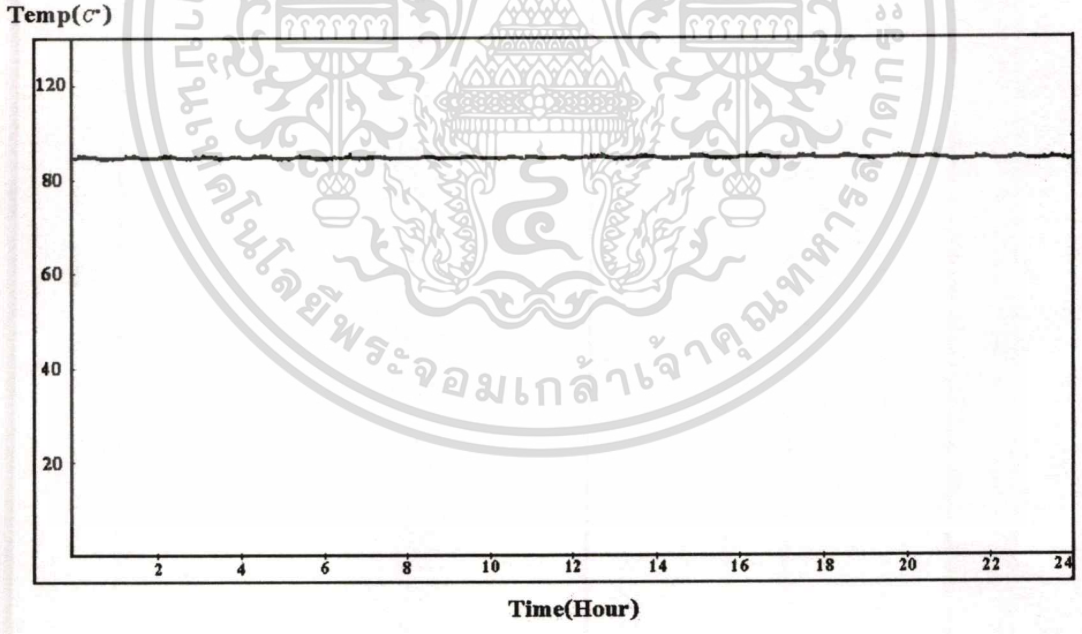


รูปที่ 4.20 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

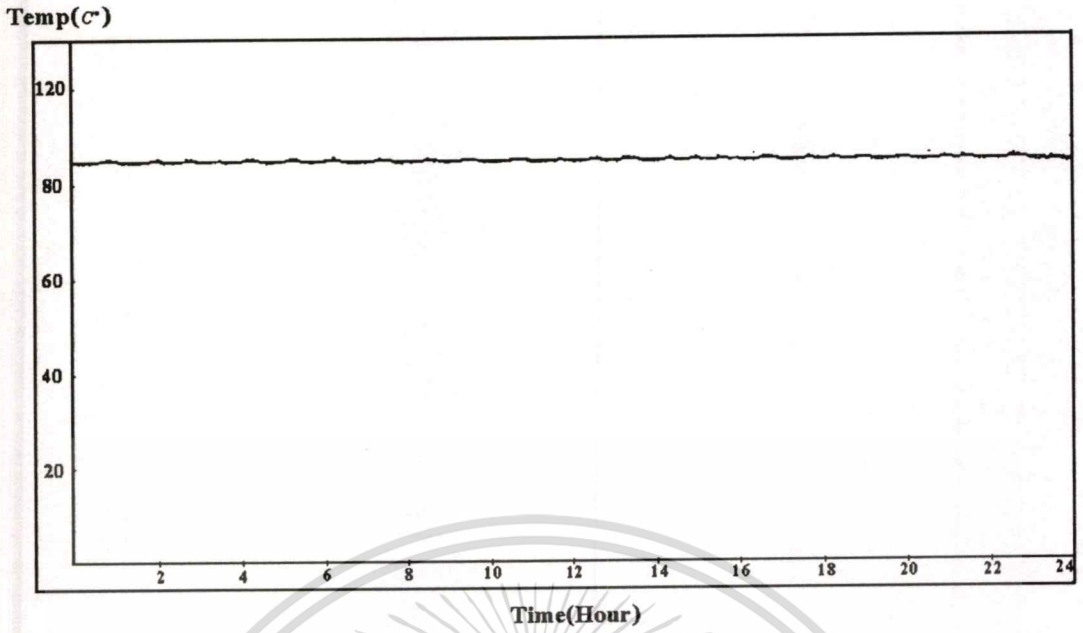


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 7

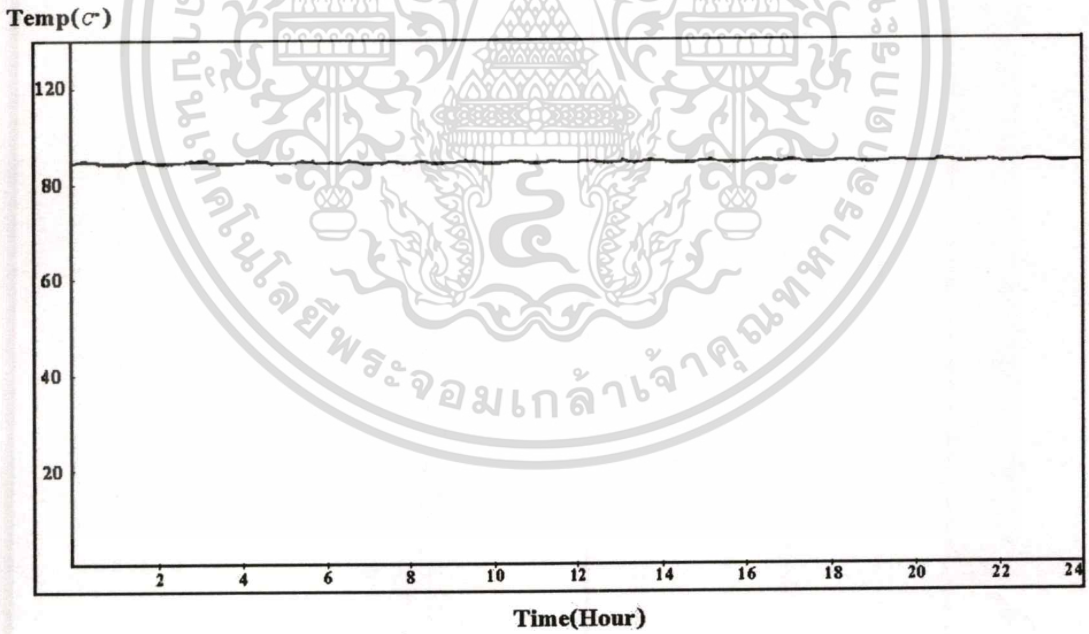


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

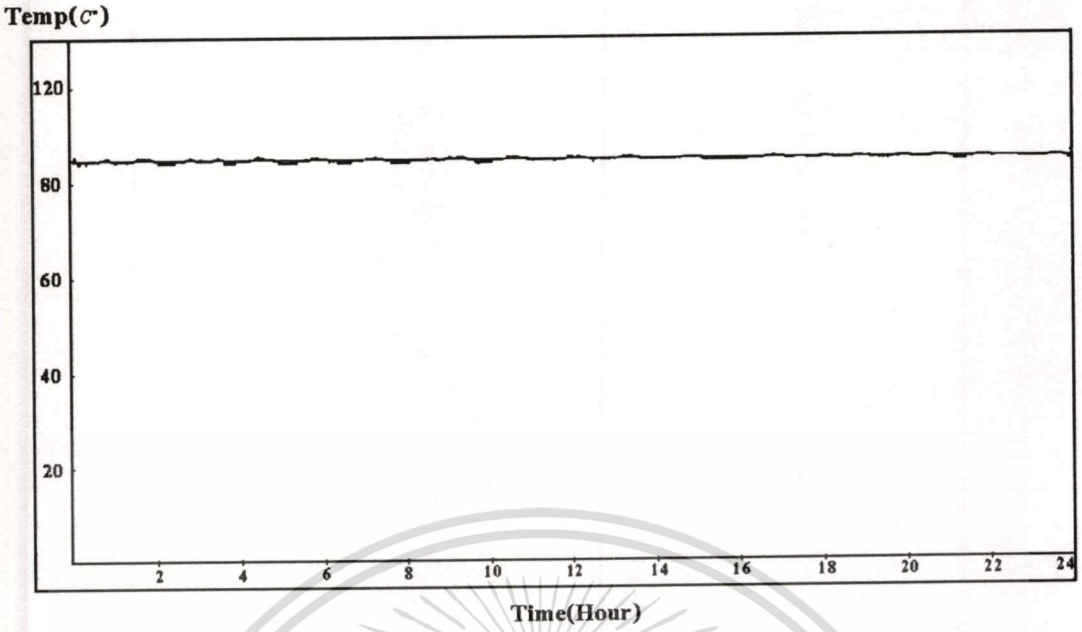


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 9

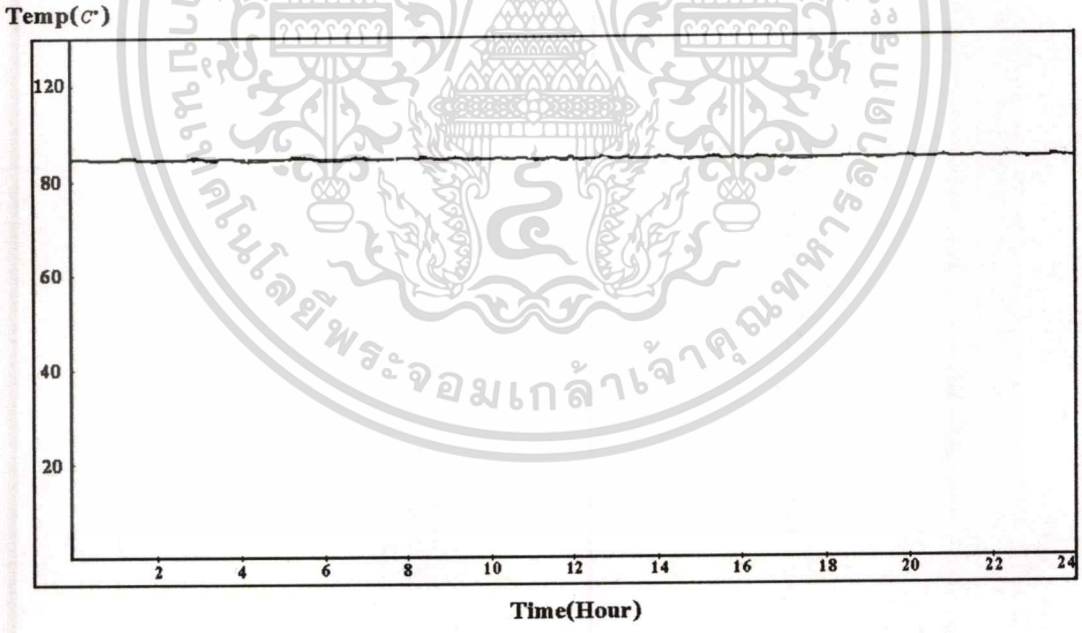


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

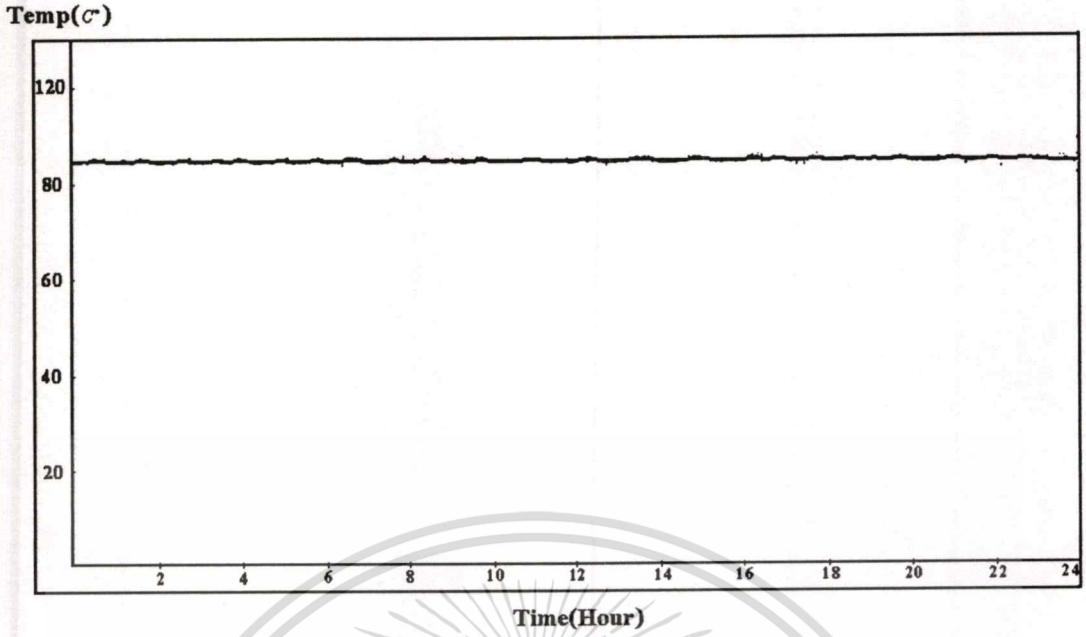


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 11

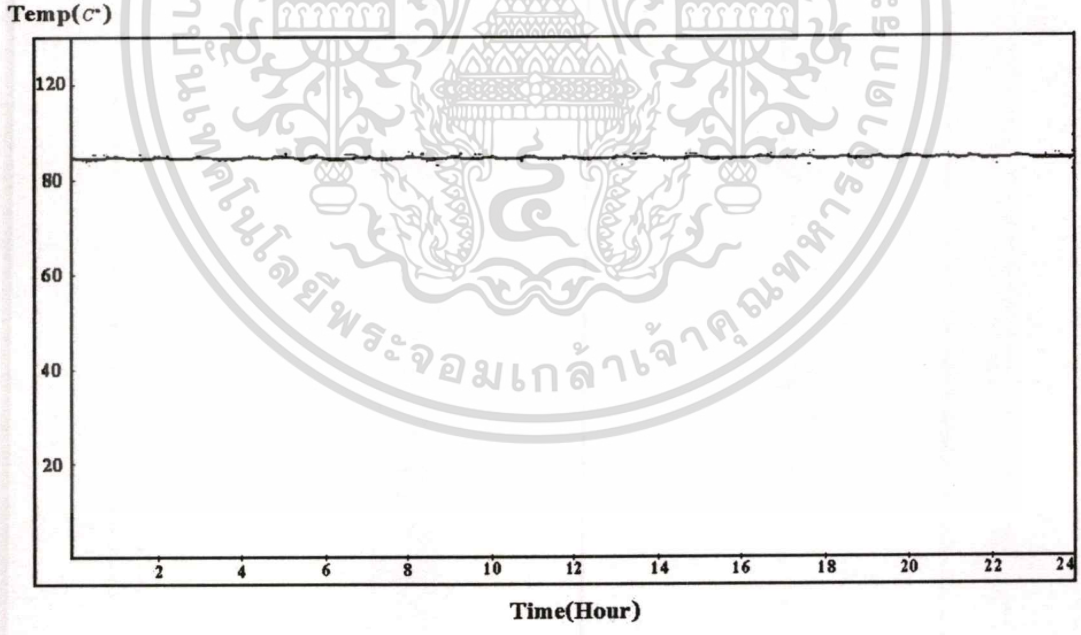


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 13



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิในระยะเวลา 14 วัน สามารถตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมต่างๆ อันได้แก่ การควบคุมเวลา การควบคุมระดับน้ำ การควบคุมอุณหภูมิ โดยข้อมูลและกราฟแสดงผลสามารถแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ และการควบคุมอุณหภูมิในการทดลอง 14 วัน จะพบว่า อุณหภูมิของน้ำจะมีค่าอยู่ในช่วง 85±2 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าเปลี่ยนแปลง อันเป็นผลกระทบจากอุณหภูมิแวดล้อมภายนอก ดังนั้นในการทดสอบภายใน 14 วัน จากข้อมูลกราฟแสดงให้เห็นว่าการทำงานของระบบควบคุมต่างๆ ของชุดทดสอบที่จัดสร้างมีเสถียรภาพในการทำงาน และสามารถทำงานได้สอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบ

4.6 ผลการทดสอบ Water Absorption ของฉนวนสายเคบิล

4.6.1 หลักการและเหตุผล

การทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นส่วนตัวอย่างมาตรฐานของฉนวนสายเคเบิล โดยทำการทดสอบกับชุดทดสอบที่จัดสร้างเปรียบเทียบกับชุดทดสอบมาตรฐาน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2

4.6.2 หัวข้อการทดสอบ

ทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้ได้ขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ นำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้มาทำการทดสอบโดยการต้มในน้ำตามอุณหภูมิที่มาตรฐานกำหนด ในกรณีศึกษานี้ใช้อุณหภูมิ ที่ 85±2 องศาเซลเซียส ทำการต้มชิ้นงานตัวอย่างเป็นระยะเวลา 14 วันตามมาตรฐาน IEC 60502-2 กำหนด เมื่อครบกำหนดระยะเวลา แล้วจึงนำชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการทดสอบสอบมาชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบระหว่างก่อนต้มและหลังต้ม เพื่อดูปริมาณการดูดซึมน้ำของชิ้นงานว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบเปรียบเทียบผลกับชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบด้วยชุดทดสอบมาตรฐานที่เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อดูค่าความแตกต่างของน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของฉนวนระหว่างชุดทดสอบที่จัดสร้างและชุดทดสอบมาตรฐาน

12/20(24) kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheated						
ขนาดของสายตัวนำ (ตารางมิลลิเมตร)	ชุดทดสอบที่จัดสร้าง			ชุดทดสอบมาตรฐาน		
	นน.ก่อนทำการทดสอบ (กรัม)	นน.หลังทำการทดสอบ (กรัม)	ค่าความแตกต่าง (กรัม)	นน.ก่อนทำการทดสอบ (กรัม)	นน.หลังทำการทดสอบ (กรัม)	ค่าความแตกต่าง (กรัม)
70	0.3724	0.3735	0.0011	0.3750	0.3757	0.0007
120	0.3110	0.3129	0.0009	0.3389	0.3398	0.0009
240	0.3943	0.3947	0.0004	0.3518	0.3525	0.0007
400	0.3422	0.3430	0.0008	0.3420	0.3431	0.0011

4.6.4 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างชุดทดสอบที่จัดสร้างและชุดทดสอบมาตรฐาน ผลของการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมาตรฐานมีผลการทดสอบใกล้เคียงกันคือ มีน้ำหนักที่แตกต่างไปจากก่อนทดสอบน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม ดังตารางที่ 4.2 และผลโดยรวมทั้งการทดสอบจากชุดทดสอบและการทดสอบจากชุดทดสอบมาตรฐานยังอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

4.7 ปริมาณกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้โดยประมาณ

ระยะเวลาในแต่ละช่วงของการทดสอบโดยประมาณ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส	กระแส (แอมแปร์)
15 นาทีแรก (ช่วงเริ่มทดสอบ)	2.4
15 นาทีต่อมา (ช่วงอุณหภูมิเข้าใกล้ 85 องศาเซลเซียส)	1.2
ระยะเวลาที่เหลือ (ช่วงอุณหภูมิคงที่ ที่ 85 องศาเซลเซียส)	0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.1 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงแรกจะเป็นช่วงของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เต็มพิกัดเพื่อที่จะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้เข้าสู่ช่วงของอุณหภูมิที่ต้องการภายในระยะเวลาที่เร็วที่สุด หลังจากนั้นจะทำการลดการจ่ายกระแสลงมาครึ่งหนึ่ง เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิค่อยๆเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมและช่วงสุดท้ายคือช่วงระยะเวลาที่เข้าสู่อุณหภูมิที่ต้องการควบคุม

4.8 ปริมาณพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 4.4 ปริมาณพลังงานไฟฟ้า

ระยะเวลาในแต่ละช่วงของการทดสอบโดยประมาณ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส	พลังงาน (วัตต์)
15 นาทีแรก (ช่วงเริ่มทดสอบ)	530
15 นาทีต่อมา (ช่วงอุณหภูมิเข้าใกล้ 85 องศาเซลเซียส)	270
ระยะเวลาที่เหลือ (ช่วงอุณหภูมิคงที่ ที่ 85 องศาเซลเซียส)	200

4.8.1 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าของชุดทดสอบในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงแรกจะเป็นช่วงของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เต็มพิกัดเพื่อที่จะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้เข้าสู่ช่วงของอุณหภูมิที่ต้องการภายในระยะเวลาที่เร็วที่สุด หลังจากนั้นจะทำการลดการจ่ายพลังงานลงมาครึ่งหนึ่ง เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิค่อยๆเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมและช่วงสุดท้ายคือช่วงระยะเวลาที่เข้าสู่อุณหภูมิที่ต้องการควบคุม จะเป็นการจ่ายพลังงานแบบคงที่ ซึ่งจะใช้พลังงานที่ 200 W. ตลอดระยะเวลาทำการทดสอบ

4.9 ข้อควรระวังในการทดสอบ

ศึกษาเครื่องมืออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการให้เข้าใจอย่างละเอียด และปฏิบัติตามขั้นตอนการทดสอบอย่างเคร่งครัด ควรจัดอุปกรณ์ควบคุมให้อยู่ห่างจากสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าเพื่อป้องกันการรบกวนระบบควบคุม ควรมีระบบพลังงานสำรองเช่น UPS ไว้ในกรณีที่มีการทดสอบหลายวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วิเคราะห์ผล

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการมุ่งเน้นการศึกษามาตรฐานการทดสอบสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 จึงดำเนินการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนด ให้สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติและควบคุมเงื่อนไขการทดสอบได้ตามมาตรฐาน โดยเน้นทำการทดสอบสารฉนวน XLPE เนื่องจากสารฉนวนดังกล่าวเป็นฉนวนที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตสายเคเบิลในปัจจุบัน แบ่งการทดสอบเป็น 2 ลักษณะ คือการทดสอบตัวเครื่องของชุดทดสอบโดยทำการทดสอบอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิคือเทอร์โมคัปเปิลและทำการวัดการควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมเวลาของการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบชุดทดสอบให้สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ จึงดำเนินการทำการทดสอบการดูดซึมน้ำของฉนวน XLPE ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลได้ ดังนี้

5.1.1 การทดสอบเปรียบเทียบการทำงานเทอร์โมคัปเปิล

5.1.2 การทดสอบเปรียบเทียบการรักษาระดับอุณหภูมิของชุดทดสอบที่จัดสร้างและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน

5.1.3 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในช่วงระยะเวลา 14 วัน

5.1.4 การทดสอบเปรียบเทียบหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ของฉนวนสายเคเบิลชนิด XLPE ระหว่างชุดทดสอบที่วัดสร้างและชุดทดสอบมาตรฐาน

5.1.5 การวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า

5.1.6 การวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้า

5.1.1 การทดสอบเปรียบเทียบการทำงานเทอร์โมคัปเปิล

จากการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลระหว่างเทอร์โมคัปเปิลที่เลือกใช้ในชุดทดสอบที่จัดสร้างและเทอร์โมคัปเปิลของเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ชนิดเดียวกันคือ Type K. โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกัน ณ อุณหภูมิห้อง 30 ^{o}C ผลของการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็น ดังรูปกราฟที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ว่าผลการทดสอบของเทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้จัดสร้างเป็นชุดทดสอบและเทอร์โมคัปเปิลของเครื่องมือวัดมาตรฐาน เทอร์โมคัปเปิลทั้ง 2 มีอัตราการขยายอยู่ในเกณฑ์เดียวกันอุณหภูมิมีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงประมาณ 0.1-0.4 ^{o}C และค่าผิดพลาดสัมบูรณ์อยู่ในช่วง 0-1.32 %ซึ่งยังอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่มาตรฐานยอมรับได้ ค่าอุณหภูมิที่ชุดทดสอบจะนำมาใช้ในการทดสอบคือค่าอุณหภูมิที่ 85 ^{o}C ผลการทดสอบเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบและของเครื่องมือวัดมาตรฐานแตกต่างกันที่ 0.1 ^{o}C ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้นำไปดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.11 % จึงทำการเลือกเทอร์โมคัปเปิลดังกล่าวนำมาใช้กับชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้น

5.1.2 การทดสอบเปรียบเทียบการรักษาระดับอุณหภูมิของชุดทดสอบที่จัดสร้างและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน

จากการทดสอบการรักษาระดับอุณหภูมิของชุดทดสอบที่จัดสร้างที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ในช่วงพิกัดของชุดทดสอบ โดยเลือกระดับอุณหภูมิเป็น 6 ช่วง ได้แก่ 50 ^{o}C, 60 ^{o}C , 70 ^{o}C, 80 ^{o}C, 85 ^{o}C, 90 ^{o}C โดยผลการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานนั้น จะพบว่าการรักษาระดับอุณหภูมินั้นสามารถทำการรักษาระดับอุณหภูมิให้ได้ตามที่ควบคุมได้จริง และช่วงระยะเวลาในการเข้าสู่อุณหภูมิที่ต้องการควบคุมนั้น อยู่ในช่วงเวลาที่มาตรฐานกำหนดคือ อุณหภูมิจะต้องเข้าสู่ช่วงที่ทำการควบคุมภายในระยะเวลา 60 นาที [2] ซึ่งจากรูปกราฟที่แสดงตั้งแต่รูปที่ 4.3-4.14 จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิในช่วงแรกนั้นอุณหภูมิจะไม่คงที่และมีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิค่อนข้างมาก แต่เมื่อผ่านระยะเวลาไปประมาณ 20 นาที อุณหภูมิที่ทำการควบคุมก็จะเริ่มคงที่ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเริ่มเข้าสู่ช่วงที่ทำการควบคุมให้คงที่นั้นจะใช้หลักการ ของ PID Control มาทำการควบคุมการทำงานของวงจรเฟสคอนโทรลเพื่อควบคุมฮีตเตอร์ให้จ่ายพลังงานต่อไป โดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปในลักษณะเดียวกันทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ

5.1.3 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในช่วงระยะเวลา 14 วัน

จากการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิที่ 85±2 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 14 วัน โดยทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งเมื่อดูผลการทดสอบจากกราฟที่ 4.15-4.28 จะเห็นว่าการทำงานของชุดทดสอบนั้น สามารถควบคุมอุณหภูมิให้ทำงานอยู่ในช่วงที่กำหนดและสามารถทำงานตลอดระยะการทดสอบเป็นช่วงเวลา 14 วันได้จริง ซึ่งผลที่ได้จะแสดงให้เห็นค่าการทดสอบขณะทำงานจริงผ่านหน้าจอ LCD ตลอดเวลาและสามารถทำการถ่ายโอนข้อมูลมานำเสนอเป็นกราฟเพื่อดูค่าได้ตลอดระยะเวลา 14 วันที่ทำการทดสอบ

5.1.4 การทดสอบเปรียบเทียบหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ของฉนวนสายเคเบิล ชนิด XLPE ระหว่างชุดทดสอบที่จัดสร้างและชุดทดสอบมาตรฐาน

จากการทดสอบหัวข้อ Water Absorption ของฉนวนสายเคเบิลชนิด XLPE ได้ทำการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานมาตรฐานในการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบ Water Absorption นั้นได้ทำการวัดน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ Water Absorption และหลังทำการทดสอบ Water Absorption แล้วนำน้ำหนักของชิ้นงานที่ได้ทั้งสองมาเปรียบเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากชุดทดสอบมาตรฐานกับชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้น ซึ่งค่าของน้ำหนักที่ได้นั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นเราจึงสามารถนำชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้นนี้ไปทำการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ได้จริงโดยมีการควบคุมการทำงานและเงื่อนไขของการทดสอบให้เป็นไปโดยอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 การวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า

จากการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบฉนวนเคเบิลที่จัดสร้างขึ้น ผลของปริมาณกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.3 นั้น จะเห็นว่าในช่วง 15 นาทีแรกที่เริ่มทำการทดสอบ ชุดทดสอบจะใช้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าเต็มที่ อยู่ที่ประมาณ 2.4 A. เพื่อจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มให้ขึ้นไปถึงอุณหภูมิที่ต้องการ หลังจากนั้นอีก 15 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจนเกือบถึงอุณหภูมิที่ต้องการ การใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบจะลดลงมาเหลือ ประมาณ 1.2 A. และเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ต้องการควบคุมแล้ว ชุดทดสอบจะใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 0.9 A.

5.1.6 การวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้า

จากการทดสอบวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าของชุดทดสอบฉนวนเคเบิลที่จัดสร้างขึ้น ผลของปริมาณพลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.4 นั้น จะเห็นว่าในช่วง 15 นาทีแรกที่เริ่มทำการทดสอบ ชุดทดสอบจะใช้ปริมาณของพลังงานไฟฟ้าเต็มที่ อยู่ที่ประมาณ 530 W. เพื่อจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มให้ขึ้นไปถึงอุณหภูมิที่ต้องการ หลังจากนั้นอีก 15 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจนเกือบถึงอุณหภูมิที่ต้องการ การใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบจะลดลงมาเหลือ ประมาณ 270 W. และเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ต้องการควบคุมแล้ว ชุดทดสอบจะใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 200 W. ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่น้อยมากในการทดสอบ อันจะเป็นผลให้ชุดทดสอบนี้สามารถประหยัดพลังงานซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

5.2 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบWater Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องทำการควบคุมตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่สามารถยอมรับได้ตามมาตรฐาน โดยในการออกแบบได้ประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสั่งงาน และควบคุมการทำงานให้ชุดทดสอบสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด คือการควบคุมอุณหภูมิในช่วงของการทดสอบให้คงที่ตลอดเวลา การรักษาระดับน้ำ การควบคุมเวลาการทดสอบ การเก็บข้อมูลและการแสดงผล ซึ่งได้ทำการออกแบบการแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD ของชุดทดสอบตลอดระยะเวลาการทดสอบ สามารถถ่ายโอนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปยังคอมพิวเตอร์ และแสดงผลที่ได้จากการทดสอบเป็นกราฟฟิกและจัดพิมพ์ของข้อมูลได้ ซึ่งชุดทดสอบที่จัดสร้างสามารถทดสอบชิ้นงานมาตรฐานได้ครั้งละ 30 ชิ้น โดยใช้หลอดแก้วเป็นตัวแยกชิ้นงานทดสอบไม่ให้สัมผัสกัน ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 90 องศาเซลเซียส ผลการทำงานของชุดทดสอบสามารถทำงานสอดคล้องกับมาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการดำเนินงาน

6.1 สรุปผลการออกแบบหม้อทดสอบ

จากการศึกษาได้ทำการออกแบบตัวหม้อ เลือกใช้โครงสร้างภายนอกของหม้อทดสอบเป็นทรงกระบอกสูง 36 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน/ภายนอก 18/23 ซม. ชนิดวัสดุแสตนเลส เนื่องจากมีแข็งแรง ทนทานไม่เป็นสนิม มีความสวยงาม และทำการบุใยแก้วเป็นฉนวนกันความร้อนภายในโดยรอบ โครงสร้างภายในใช้บีกเกอร์แก้วทนความร้อน มีแผ่นแก้วเป็นฝาปิด โดยตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 ซม. พร้อมทั้งเจาะรูสำหรับใส่ส่วนจับยึดชิ้นงาน เป็นภาชนะในการทดสอบเนื่องจากแก้วจะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ โดยเลือกใช้บีกเกอร์ใส่น้ำในการแช่ชิ้นงานทดสอบขนาดปริมาตร 2 ลิตร ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 13 ซม. สูง 19 ซม. ใช้หลอดแก้วทนความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มม. ยาว 10 ซม.ในการแยกชิ้นงานไม่ให้สัมผัสกันขณะทดสอบ นำชิ้นงานที่จะทำการทดสอบใส่ไว้ด้านในหลอดแก้ว และนำหลอดแก้วนี้มาวางเรียงไว้บนส่วนจับยึดชิ้นงาน ซึ่งจะทำการวางหลอกแก้วในแนวนอนเพื่อที่จะให้อุณหภูมิการทดสอบของชิ้นงานในหลอดแก้วมีค่าเท่ากันตลอดทั้งชิ้น และเป็นการจำลองการวางชิ้นงานในลักษณะของแนวยาว คือแนวการวางสายเคเบิล ชุดทดสอบนี้สามารถวางหลอดแก้วในการทดสอบชิ้นงานได้ครั้งละ 30 ชิ้น เลือกใช้ฮีตเตอร์ขนาด 600 W. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13.2 ซม. สูง 10 ซม. ซึ่งฮีตเตอร์ที่ทำการออกแบบและเลือกใช้นี้สามารถให้อุณหภูมิตามที่ต้องการคือ 50-90 ^{o}C ภายในระยะเวลาที่มาตรฐานกำหนดคือ 60 นาทีได้ โดยฮีตเตอร์นี้จะมีฉนวนกันความร้อนหุ้มอยู่รอบนอก เพื่อการรักษาอุณหภูมิไม่ให้ถ่ายเทไปนอกระบบและเพื่อความปลอดภัยในขณะสัมผัสโดนหม้อทดสอบ

6.2 สรุปผลการควบคุมอุณหภูมิ

จากการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ที่ 85±2 องศาเซลเซียสตามมาตรฐาน IEC 60502-2 กำหนด และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงระหว่าง 50-90 องศาเซลเซียสโดยใช้ PID Control ควบคุมวงจรเฟสคอนโทรลในการตัดต่อกระแสไปยังขดลวดความร้อน ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยอัตโนมัติ สะดวกในการทดสอบเก็บผลเป็นเวลานาน โดยที่ช่วงเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ จะใช้เวลาประมาณ 60 นาที ซึ่งอยู่ในช่วงระยะเวลาที่มาตรฐานกำหนด โดยจะมีปัจจัยในการใช้ระยะเวลานั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการ, อุณหภูมิของน้ำก่อนเพิ่มอุณหภูมิ และอุณหภูมิของห้องในขณะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 สรุปผลการควบคุมระดับน้ำ

จากการทดสอบการรักษาระดับน้ำของชุดทดสอบ เลือกใช้แท่งอิเล็กโทรดร่วมกับวาล์วควบคุมระดับน้ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนต่ออุณหภูมิสูง และไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำที่ใช้ทดสอบ โดยเมื่อระดับน้ำในบีกเกอร์ลดลงอันเนื่องมาจากการระเหยในขณะทำการทดสอบ วงจรควบคุมระดับน้ำจะทำการส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสั่งให้วาล์วควบคุมระดับน้ำทำงานปล่อยน้ำในถังพักน้ำสำรองลงบีกเกอร์อย่างอัตโนมัติ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้อุณหภูมิขณะทดสอบเปลี่ยนแปลง

6.4 สรุปผลการควบคุมเวลา

การออกแบบฐานจริงเวลาเลือกใช้ RTC(DS1307) ในการบอกเวลาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ทราบถึงระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทดสอบให้ถูกต้องตามมาตรฐานกำหนดแบบอัตโนมัติ (14 วัน) [2] โดยจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับเวลา ที่ละเอียดถึงหลัก วินาที สามารถปรับวันเดือนปีให้ตรงตามปฏิทินได้อย่างถูกต้องตลอด 24 ชั่วโมง

6.5 สรุปผลการเก็บข้อมูลและแสดงผล

ชุดทดสอบจะทำการเก็บผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ ในหน่วยความจำซึ่งเป็นหน่วยความจำแบบ EPROM สามารถเก็บข้อมูลได้ตลอดระยะเวลาในการทดสอบ โดยที่ข้อมูลที่ทำการทดสอบจะไม่หายไปแม้ในช่วง กระแสไฟฟ้าเกิดการขัดข้อง เลือกระยะเวลาในการสุ่มเก็บข้อมูลได้ตั้งแต่ 1-10 นาที/ข้อมูล สามารถทำการเก็บข้อมูลได้สูงสุดถึง 30000 ข้อมูล โดยทำการแสดงผลของอุณหภูมิและจำนวนข้อมูลผ่านหน้าจอ LCD ขนาด 16 บิต ได้ตลอดระยะเวลาการทดสอบ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ สามารถทำการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลเป็นกราฟฟิกผ่านจอคอมพิวเตอร์และสั่งพิมพ์ผลการทดสอบได้

6.6 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากชุดทดสอบที่ได้จัดสร้างจะต้องทำการทดสอบชิ้นงานจริงตามมาตรฐาน เป็นระยะเวลานาน จึงอาจมีการขัดข้องของกระแสไฟฟ้าจากระบบส่งจ่าย และทำให้อุณหภูมิที่ทำการควบคุมไม่อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด [2] จึงควรมีระบบการเตือนถึงผลของการทดสอบหลังจากที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามมาตรฐานได้ เพื่อให้ผู้ทำการทดสอบรับรู้และเริ่มทำการทดสอบใหม่ หากสถานที่ทำการทดสอบเกิดกรณีการขัดข้องของกระแสไฟฟ้าเป็นระยะเวลานาน และบ่อยครั้งควรมีระบบพลังงานไฟฟ้าสำรองในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทำการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบเสร็จควรมีการจัดเก็บข้อมูลในลักษณะที่ไม่สามารถทำการแก้ไขได้ อันเนื่องมาจากการทดสอบตามมาตรฐานนั้นจะต้องทำการควบคุมเงื่อนไขต่างๆของการทดสอบตลอดระยะเวลานั้น ให้เป็นไปตามจริง ค่าที่ได้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ผลของการทดสอบได้

ควรมีการพัฒนารูปแบบของชุดทดสอบให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลได้โดยที่ไม่ต้องใช้การถ่ายโอนในลักษณะการถ่ายโอนจากชุดทดสอบมาสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ แต่จะทำการถ่ายโอนข้อมูลเข้าสู่อุปกรณ์เก็บข้อมูลเช่น Thumbdrive,Handydrive แทน เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

เนื่องจากชุดทดสอบที่จัดสร้างยังเป็นชุดทดสอบที่ใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบเก่าซึ่งใช้ Port RS232 ในการถ่ายโอนข้อมูล อนาคตควรมีการพัฒนาการถ่ายโอนให้สามารถทำการถ่ายโอนข้อมูลได้โดยใช้ Port USB เพื่อรองรับการทำงานของคอมพิวเตอร์ในอนาคต

เนื่องจากชุดทดสอบที่จัดสร้างมีโปรแกรมการทำงานเป็นโปรแกรมเฉพาะ ทำให้ยุ่งยากในการใช้งาน และจะต้องทำการติดตั้งโปรแกรมการใช้งานนี้เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะใช้งานร่วมกับชุดทดสอบ จึงควรมีการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมเอกสารทั่วไป เช่น Excel หรือโปรแกรมอื่นๆ ที่สามารถแสดงค่าเป็นกราฟหรือเป็นตารางได้ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และเพื่อรองรับการทำงานในอนาคตของชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] G.F. Moore, **Electric Cables Handbook**, BSP Professional Books, 1997.

[2] H. Wa Beaty, **Electrical Engineering Materials Reference guide**, McGraw-Hill, 1990.

[3] IEC No. 60502 – 2 (Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (U_m = 1 , 2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV))

[4] ICEA Publication No.S-66-524 (Cross-Linked Thermosetting Polyethylene Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy)

[5] สุเจตน์ จันทรังษ์ **"ไมโครคอนโทรลเลอร์ชิพเดี่ยว 8051"** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2535

[6] สำรวย สังข์สะอาด. **"วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง"** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มกราคม 2528.

[7] B. Tareev, **Physics of Dielectric Materials**, MIR PUBLISHERS MOSCOW, 1979.

[8] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, **"เอกสารประกอบคำสอนวิชา Electrical Engineering Materials"**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

[9] B. Clegg, **Underground Cable Fault Location**, McGraw-Hill, 1993.

[10] ดุสิต คงจิตงาม, ศักดิ์ชัย ตรีรัตน์พิจารณ์ และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล **"ชุดทดสอบการดูดซึมน้ำสำหรับฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน"**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, 2547, หน้า 261-264.

[11] กิติพัฒน์ ตันตระรุ่งโรจน์ **"ทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า"** วิทยาพัฒน์, 2541

[12] A. Von Hippel, **Dielectric Materials and Their Applications**, New ed I, 1995.

[13] R.W. Sillars, **Electrical Insulating Materials and Their Applications**, Manchester M171PR, England, 1973.

[14] Temperature sensor & Heater Catalog, **แผนกระบบอุณหภูมิ, บริษัท เทคโนโลยีอินสตรูเมนท์ จำกัด**

[15] **ธีรวัฒน์ รัตนรจนานนท์,ปกรณ์ วิเศษการ ปริญญานิพนธ์2544 , "เครื่องต้มน้ำสำหรับทดสอบฉนวนไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 60502" , สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดสอบฉนวนสายเคเบิลตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Item of Water Absorption Test for Insulation

Test Procedure

The test pieces were prepared in accordance with sub-clause 9.2.1 IEC Publication No.60811-1-3 The pieces with cleaned surfaces were heated at the temperature of 70 ± 2 °C, for 72 h (or 3 days) under vacuum. After the treatment, the test pieces were cooled for 1 h in a desiccator and weighted (mass M_1). Then, the test pieces were immersed in the deionized water at the temperature of 85 ± 2 °C for 14 days, employing the condition specified in table 21 of IEC Publication No.60502-2.(1998). After the time specified, the test pieces were removed from the water, shaken to detach any adherent, and then dried with special filler paper, leaving no fibres and weighed (mass M_2). Finally, the test pieces were heated again under the same condition at the temperature of 70 ± 2 °C for 72 h (or 3 days) in the oven. After that, the test pieces were weighted (mass M_3).

The mass variation was calculated by following formulas given in sub-clause 9.2.3 Iec Publication No.811-1-3.

Specimen

12/20(24) kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheated

Test Result

The test results show that the mass variation is not more than 1 mg/cm^2 as specified in table 21 of IEC Publcation No.60502-2.(1998).

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

Data of Water Absorption Test for Insulation

Specimen	: 12/20(24) kV. 70 sq.mm. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.
Ambient Temperature	: 28 °C
Reference Standard	: IEC Publication No.60502-2 , MEA's Specification No. 418.

Description	Specification		Result			
Water absorption test on insulation - The test pieces			1	2	Mean value	
Dimension of the test pieces - Thickness : T	0.6-0.9	mm.	0.829	0.763	0.796	mm.
- Length : L	80-100	mm.	100	100	100	mm.
- Width : W	4.0-5.0	mm.	5.000	4.962	4.981	mm.
The total surface area : A	-	cm^2	11.740	12.976	12.708	cm^2
Mass M_1 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.3753	0.3728	0.3740	g
Mass M_2 under condition at 85 ± 2 °C for 14 days in the deionized water	-	g	0.3757	0.3770	0.3746	g
Mass M_3 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.3753	0.3731	0.3742	g
The mass variation : $\bar{M}$	≤1.0	mg/cm^2	0.03407	0.32367	0.17887	mg/cm^2

Automatic Control Test Set for Water Absorption Test Item of Cable Insulators According to IEC 60502-2 Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

Data of Water Absorption Test for Insulation

Specimen	: 12/20(24) kV. 120 sq.mm. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.
Ambient Temperature	: 28 °C
Reference Standard	: IEC Publication No.60502-2 , MEA's Specification No. 418.

Description	**Specification**		**Result**			
Water absorption test on insulation - The test pieces			1	2	Mean value	
Dimension of the test pieces - Thickness : T	0.6-0.9	mm.	0.875	0.815	0.845	mm.
- Length : L	80-100	mm.	100	100	100	mm.
- Width : W	4.0-5.0	mm.	4.946	4.628	4.787	mm.
The total surface area : A	-	cm^2	11.728	10.961	11.344	cm^2
Mass M_1 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.4122	0.3387	0.3754	g
Mass M_2 under condition at 85 ± 2 °C for 14 days in the deionized water	-	g	0.4129	0.3398	0.3763	g
Mass M_3 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.4125	0.3391	0.3758	g
The mass variation : $\bar{M}$	≤1.0	mg/cm^2	0.05968	0.10035	0.07933	mg/cm^2

Automatic Control Test Set for Water Absorption Test Item of Cable Insulators According to IEC 60502-2 Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

Data of Water Absorption Test for Insulation

Specimen	: 12/20(24) kV. 240 sq.mm. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.
Ambient Temperature	: 28 °C
Reference Standard	: IEC Publication No.60502-2 , MEA's Specification No. 418.

Description	Specification		Result			
Water absorption test on insulation - The test pieces			1	2	Mean value	
Dimension of the test pieces - Thickness : T	0.6-0.9	mm.	0.747	0.763	0.755	mm.
- Length : L	80-100	mm.	100	100	100	mm.
- Width : W	4.0-5.0	mm.	5.023	5.019	5.021	mm.
The total surface area : A	-	cm^2	11.615	11.640	11.627	cm^2
Mass M_1 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.3935	0.3512	0.3723	g
Mass M_2 under condition at 85 ± 2 °C for 14 days in the deionized water	-	g	0.3947	0.3525	0.3736	g
Mass M_3 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.3945	0.3523	0.3734	g
The mass variation : $\bar{M}$	≤1.0	mg/cm^2	0.10331	0.11168	0.11180	mg/cm^2

Automatic Control Test Set for Water Absorption Test Item of Cable Insulators According to IEC 60502-2 Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

Data of Water Absorption Test for Insulation

Specimen	: 12/20(24) kV. 400 sq.mm. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.
Ambient Temperature	: 28 °C
Reference Standard	: IEC Publication No.60502-2 , MEA's Specification No. 418.

Description	**Specification**		**Result**			
Water absorption test on insulation - The test pieces			1	2	Mean value	
Dimension of the test pieces - Thickness : T	0.6-0.9	mm.	0.791	0.803	0.797	mm.
- Length : L	80-100	mm.	100	100	100	mm.
- Width : W	4.0-5.0	mm.	4.895	4.478	4.686	mm.
The total surface area : A	-	cm^2	11.449	10.633	11.041	cm^2
Mass M_1 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.3417	0.3425	0.3421	g
Mass M_2 under condition at 85 ± 2 °C for 14 days in the deionized water	-	g	0.3430	0.3431	0.3430	g
Mass M_3 under condition at 70 ± 2 °C for 72 h. in air oven	-	g	0.3424	0.3428	0.3426	g
The mass variation : $\bar{M}$	≤1.0	mg/cm^2	0.11354	0.05642	0.08151	mg/cm^2

Automatic Control Test Set for Water Absorption Test Item of Cable Insulators According to IEC 60502-2 Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คู่มือการใช้งานชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2

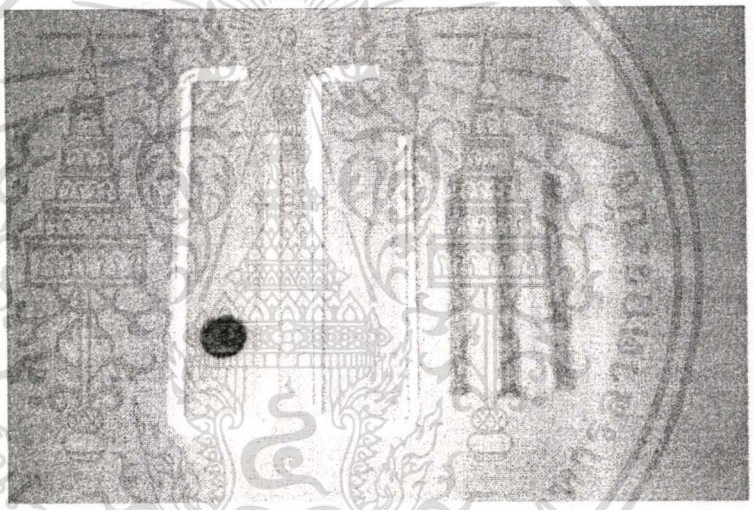
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งานชุดทดสอบฉนวนของสายเคเบิลในหัวข้อการทดสอบ Water Absorption ตามมาตรฐาน IEC 60502-2

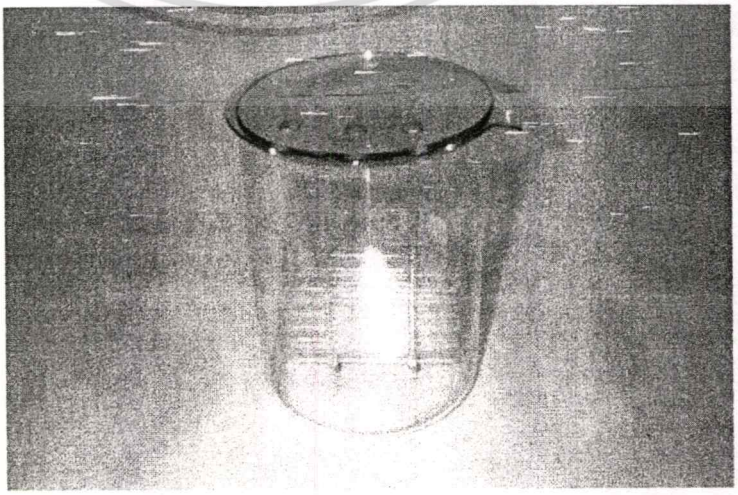
ขั้นตอนการใช้งานชุดทดสอบ

1. การจับยึดชิ้นงาน

- นำชิ้นงานใส่ในหลอดแก้วกลวง หลอดละ 1 ชิ้น
- นำขาจับยึดชิ้นงานประกอบกับฝาแก้ว
- นำหลอดแก้วที่มีชิ้นงานอยู่ด้านในวางลงบนขาจับยึดชิ้นงาน
- ปิดฝาแก้วลงบนบีกเกอร์ที่ใส่น้ำลงไปประมาณ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- นำบีกเกอร์ที่ประกอบเสร็จแล้วใส่ลงไปในฉนวนกันความร้อน



รูปที่ ข.1 แสดงขาจับยึดชิ้นงานและหลอดแก้วกลวงสำหรับใส่ชิ้นงาน

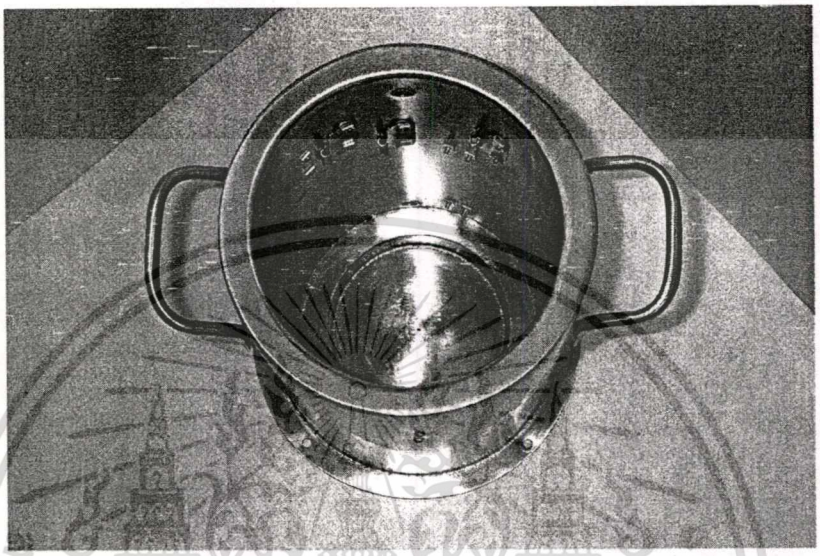


รูปที่ ข.2 แสดงการประกอบส่วนจับยึดชิ้นงานเข้ากับบีกเกอร์

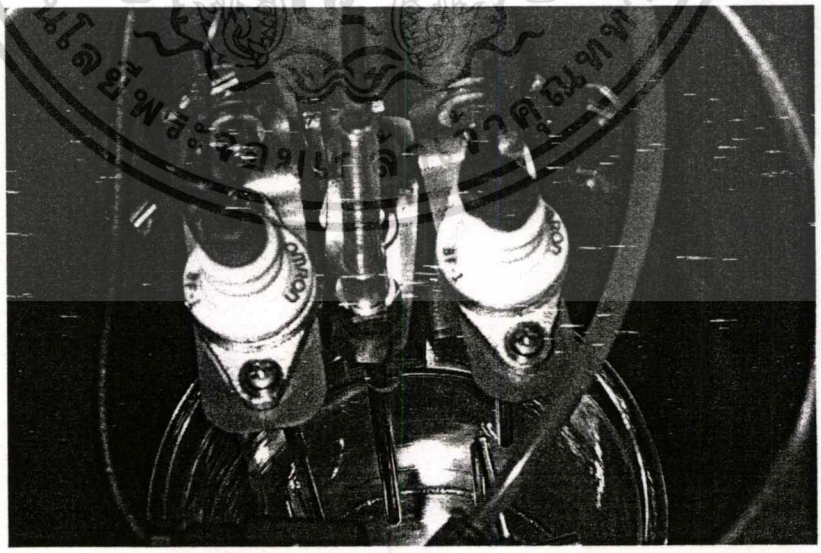
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล , ก้านอิเล็กโตรด และ โซลินอยด์วาล์ว

- นำเทอร์โมคัปเปิลเสียบกับบานพับด้านในตรงกลางด้านที่มีบานพับ 3 อัน
- นำก้านอิเล็กโตรดก้านสั้นเสียบด้านขวาของเทอร์โมคัปเปิล และ นำก้านอิเล็กโตรดก้านยาวเสียบด้านซ้ายของเทอร์โมคัปเปิล
- นำโซลินอยด์วาล์วเสียบที่บานพับด้านตรงข้ามกับเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ ข.3 แสดงตำแหน่งของบานพับโดย ตำแหน่งตรงกลางใช้สำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล
ด้านซ้ายมือใช้สำหรับเสียบก้านอิเล็กโตรดก้านยาว
ด้านขวามือใช้สำหรับเสียบก้านอิเล็กโตรดก้านสั้น

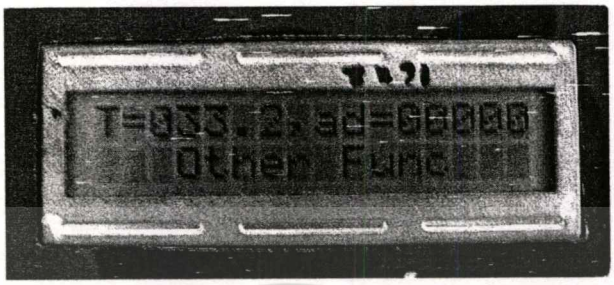


รูปที่ ข.4 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล , ก้านอิเล็กโตรด และ โซลินอยด์วาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

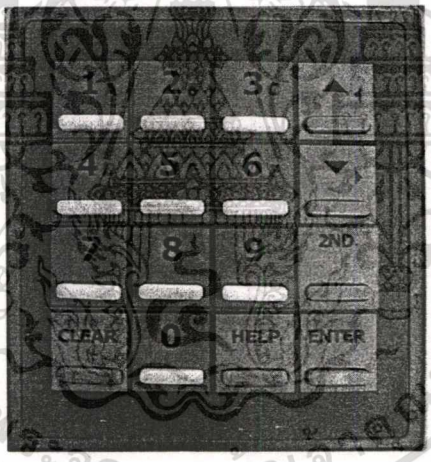
3. การเริ่มต้นการใช้ชุดทดสอบ

- เปิดสวิทซ์ของเครื่องทดสอบจะแสดงความพร้อมของเครื่องทดสอบ โดยจะแสดงถึงอุณหภูมิ ปัจจุบันบนหน้าจอแสดงผล



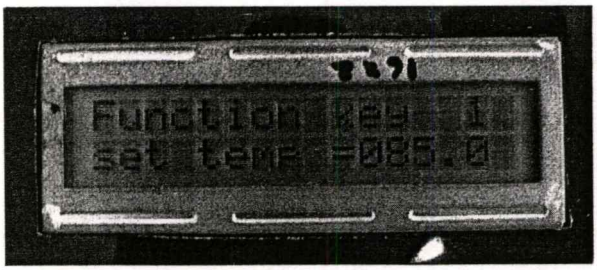
รูปที่ ข.5 แสดงหน้าจอแสดงความพร้อมการทำงานที่อุณหภูมิปัจจุบันของน้ำ

- เรียกการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ โดยการกดคีย์บอร์ดหมายเลข 1 เพื่อเข้าสู่การตั้งค่า



รูปที่ ข.6 แสดงแป้นคีย์บอร์ดในการตั้งค่าอุณหภูมิ และควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ

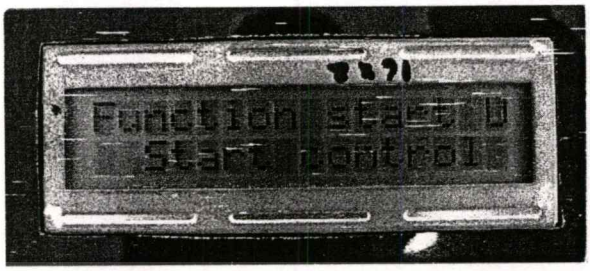
- ตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยการกดจากคีย์บอร์ด มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.7 แสดงหน้าจอแสดงการตั้งค่าอุณหภูมิ ในรูปแสดงการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อได้ค่าอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ให้กดปุ่ม ENTER ที่คีย์บอร์ดเพื่อยืนยัน
- กดปุ่ม Δ บนคีย์บอร์ดเพื่อเข้าสู่การเริ่มทำงาน

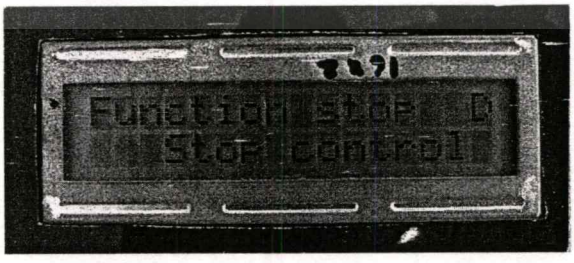


รูปที่ ข.8 แสดงหน้าจอแสดงการเริ่มทำงาน

- กดปุ่ม ENTER เพื่อยืนยันการทำงาน
- เมื่อชุดทดสอบเริ่มทำงานหน้าจอจะแสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และแสดงการเก็บจำนวนข้อมูลที่ได้บันทึกไว้

รูปที่ ข.9 แสดงหน้าจอแสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และการเริ่มเก็บจำนวนข้อมูล

- กดปุ่ม ∇ บนคีย์บอร์ด เมื่อได้ทำการทดสอบจนเสร็จสิ้นเพื่อหยุดการทำงาน

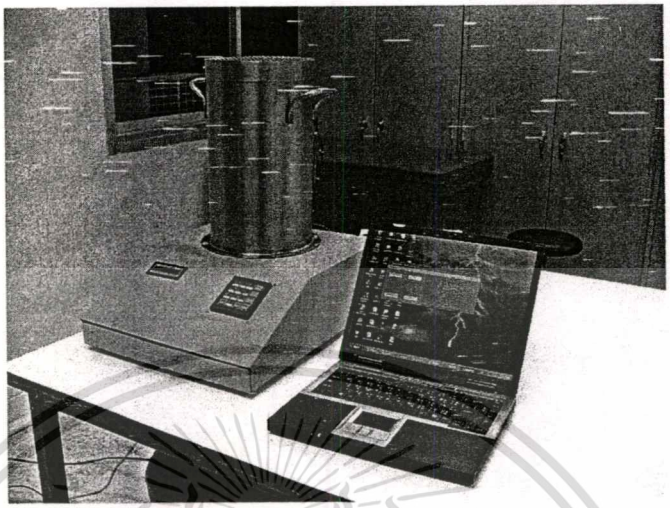


รูปที่ ข.10 แสดงหน้าจอแสดงยืนยันการหยุดทำงาน

- กดปุ่ม ENTER เพื่อยืนยันการหยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการต่อสายโอนข้อมูล Port RS232 จากชุดทดสอบเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อทำการถ่ายโอนข้อมูลและแสดงค่าที่ทำการทดสอบเป็นกราฟ



รูปที่ ข.11 แสดงการต่อสายโอนข้อมูลระหว่างชุดทดสอบกับคอมพิวเตอร์

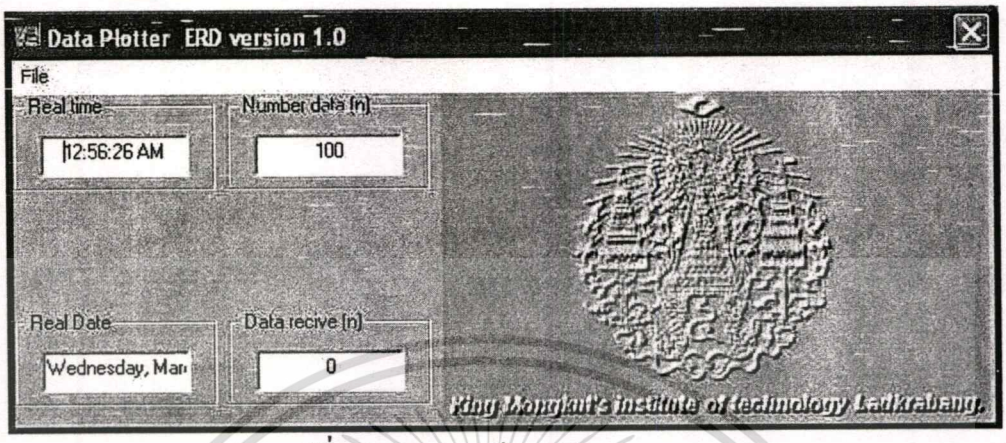
- กดปุ่มหมายเลข 3 บนคีย์บอร์ดเพื่อทำการถ่ายโอนข้อมูลจากชุดทดสอบเข้าสู่คอมพิวเตอร์

รูปที่ ข.12 แสดงหน้าจอแสดงการถ่ายโอนข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

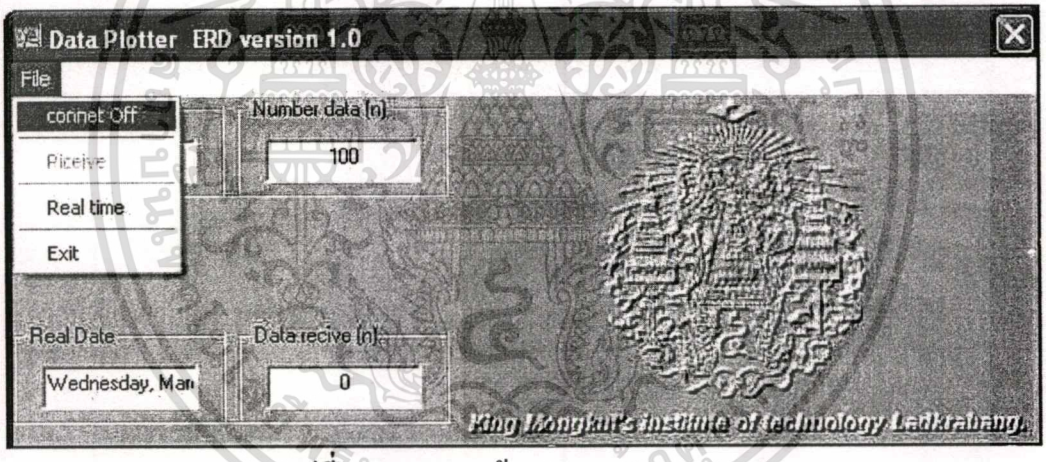
4. การเริ่มต้นการใช้โปรแกรม

- ทำการเปิดโปรแกรม ERD คือโปรแกรมที่สามารถรับข้อมูลจากชุดทดสอบสู่คอมพิวเตอร์



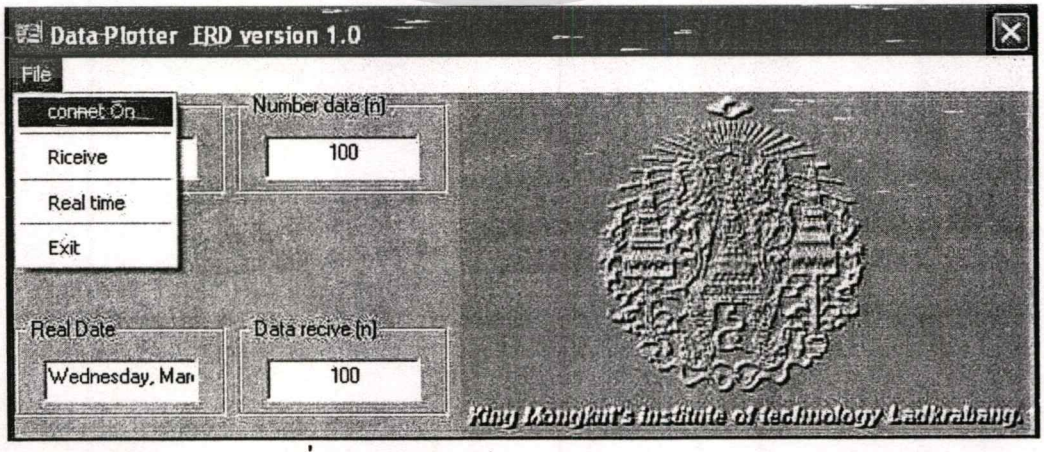
รูปที่ ข.13 แสดงหน้าจอโปรแกรม ERD

- เลื่อนเมาส์ไปกดที่ปุ่ม File บนหน้าจอคอมพิวเตอร์
- เลือกกด connect off 1 ครั้ง



รูปที่ ข.14 แสดงหน้าจอการกด connect off

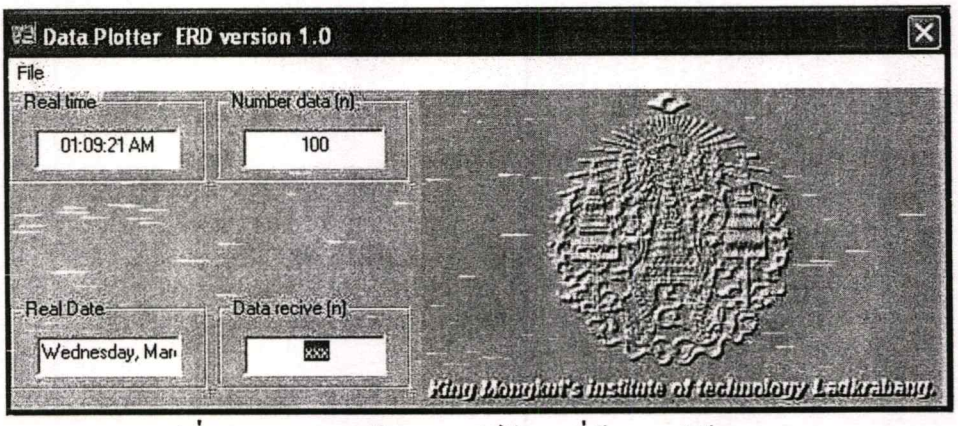
- โปรแกรมจะแสดงการทำงานเป็น connect on เพื่อเข้าสู่การถ่ายโอนข้อมูล



รูปที่ ข.15 แสดงหน้าจอการทำงาน connect on

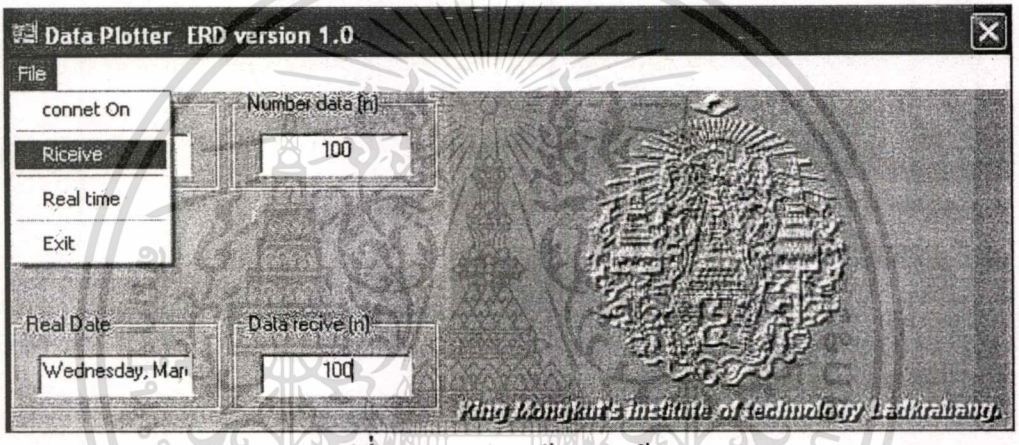
- คีย์จำนวนข้อมูลที่ต้องการให้แสดงผลในช่อง Data receive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



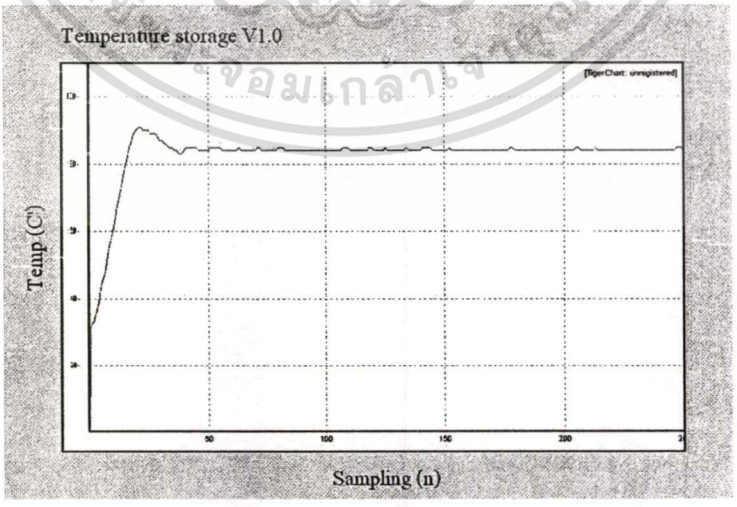
รูปที่ ข.16 แสดงหน้าจอการคีย์ข้อมูลที่ต้องการให้แสดงผล

- กดปุ่ม Receive เพื่อทำการรับข้อมูล



รูปที่ ข.17 แสดงหน้าจอรับข้อมูล

- เมื่อโปรแกรมทำการรับข้อมูลครบตามจำนวนแล้ว ก็จะทำการประมวลผลและแสดงผลเป็นกราฟดังรูป ที่ ข.18

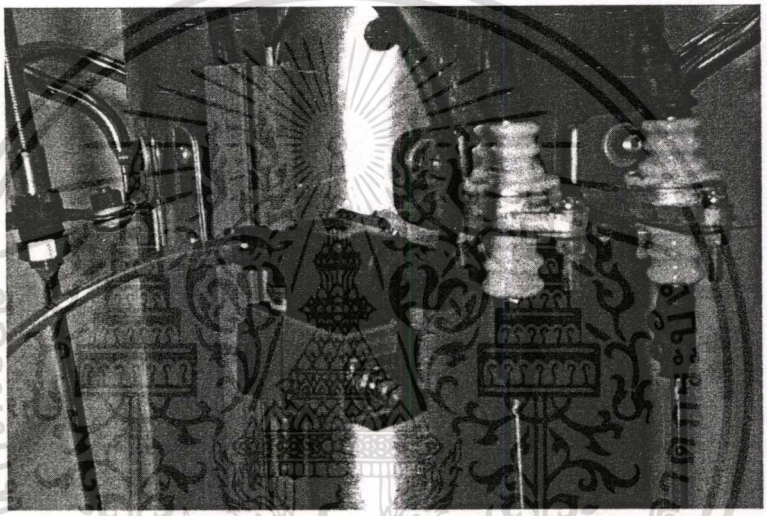


รูปที่ ข.18 แสดงกราฟที่ได้จากการประมวลผล

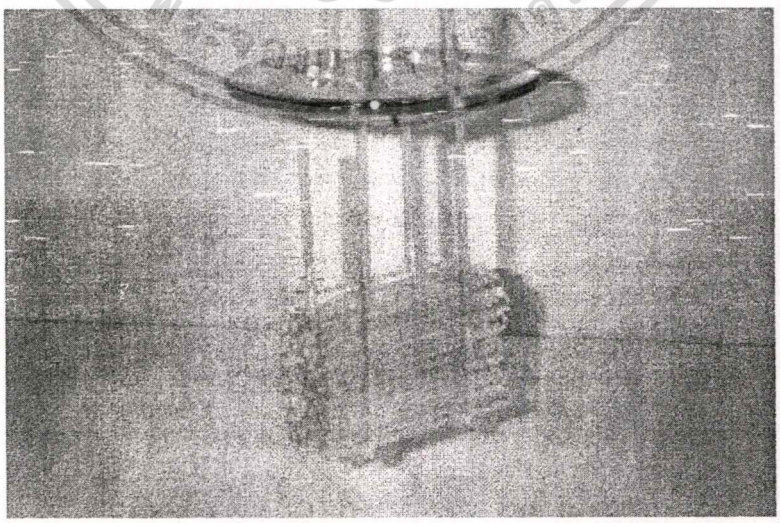
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การนำชิ้นงานออก

- ดึงเทอร์โมคัปเปิลออกจากบานพับด้านใน และนำมาพักไว้ที่บานพับด้านนอก
- สำหรับก้านอิเล็กโตรดทั้ง 2 ก้าน และ โซลินอยด์วาล์ว ให้ทำเช่นเดียวกันกับเทอร์โมคัปเปิล
- ยกบีกเกอร์พร้อมทั้งชิ้นงานออกมาจากตัวฉนวน
- ใช้ขาเกี่ยวแก้วเกี่ยวฝาปิดแก้วออกมา โดยเกี่ยวที่รูของเทอร์โมคัปเปิลและรูของโซลินอยด์วาล์ว
- นำหลอดแก้วออกมาจากขาจับยึดชิ้นงาน
- นำชิ้นงานออกมาจากหลอดแก้ว



รูปที่ ข.19 แสดงการนำอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ มาพักไว้ที่บานพับด้านนอก



รูปที่ ข.20 แสดงการใช้ขาเกี่ยวแก้วเกี่ยวฝาปิดแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การติดตั้งโปรแกรมควบคุมชุดทดสอบ

สำเนาไฟล์ทั้งหมดจากแผ่น Setup ลงไปเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต้องการลงโปรแกรม

- เริ่มทำการติดตั้งโปรแกรม Flash Pro V1.1.lnk โดยการดับเบิลคลิกที่ Shortcut ดังรูปที่ ข.21 แล้วทำตามโปรแกรมติดตั้งไปเรื่อยๆ จนจบการติดตั้ง

รูปที่ ข.21 แสดง Shortcut โปรแกรม Flash Pro V.1.1.lnk

- ทำการติดตั้งโปรแกรม ERD Temperature V1.0.LNK โดยการดับเบิลคลิกที่ Shortcut ดังรูปที่ ข.22 แล้วทำตามโปรแกรมติดตั้งไปเรื่อยๆ จนจบการติดตั้ง

รูปที่ ข.22 แสดง Shortcut โปรแกรม ERD Temperature V1.0.LNK

7. ข้อควรระวัง

หากปรากฏหน้าจอแสดงการเตือนเมื่อระดับน้ำต่ำกว่าปกติซึ่งจะเกิดขึ้นใน 2 กรณีคือ

- น้ำที่ใช้มีค่าความนำไฟฟ้าน้อยเกินไปจนทำให้ก้านอิเล็กโตรดต่อถึงกันทางไฟฟ้าไม่ได้
- ระดับน้ำต่ำเกินไปจนทำให้ก้านอิเล็กโตรดขาสั้นลอยอยู่ตลอดเวลา

ให้กดปุ่ม Enter เพื่อรับรู้ (เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการยุติการทำงานไปแล้ว) แล้วให้กดปุ่ม clear ที่คีย์บอร์ด แล้วจึงค่อยเริ่มการทดสอบครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

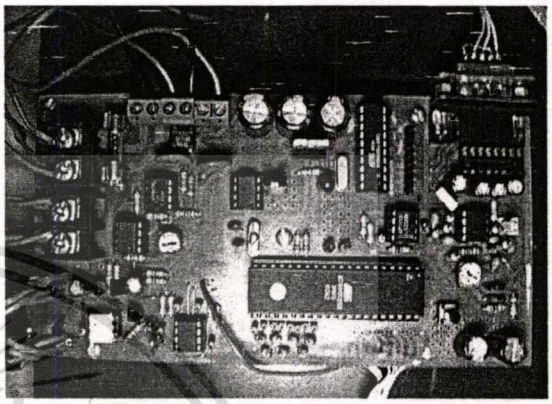
ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องมือวัด เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

Technical Data of Cable Test Set

External of Cable Test Set



Internal of Cable Test Set

Technical Data

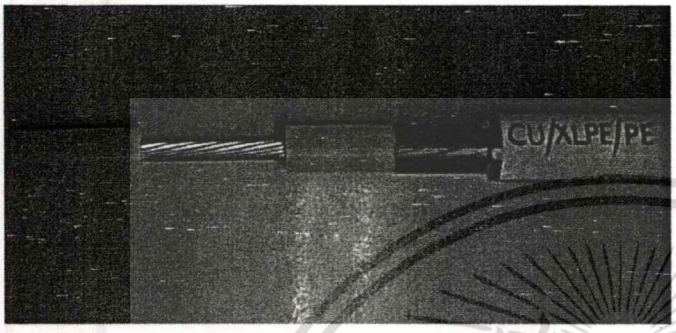
แหล่งจ่ายไฟให้กับเครื่องมือวัด	220 V (AC) ,600 W.
อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ	50-90 °C
ขนาดสายที่ใช้ในการทดสอบ	1 – 400 ตารางมิลลิเมตร
ชนิดฉนวนที่ใช้ในการทดสอบ	XLPE
ประเภทสายที่ใช้ในการทดสอบ	สายเคเบิลใต้ดิน
ความละเอียดในการแสดงค่า	16 ตัวอักษร LCD MODULE (ทศนิยม 1 ตำแหน่ง)
จำนวนชิ้นงานในการทดสอบต่อครั้งสูงสุด	30 ตัวอย่าง
มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบเทียบ	IEC 60502–2
ความคลาดเคลื่อนสูงสุด	±2 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

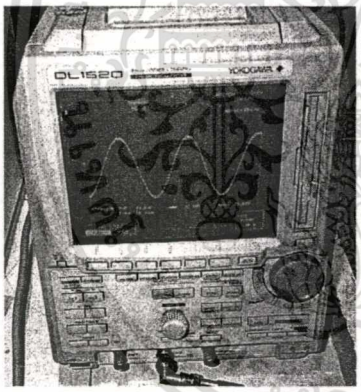
Automatic Control Test Set for Water Absorption Test Item of Cable Insulators According to IEC 60502-2 Standard

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

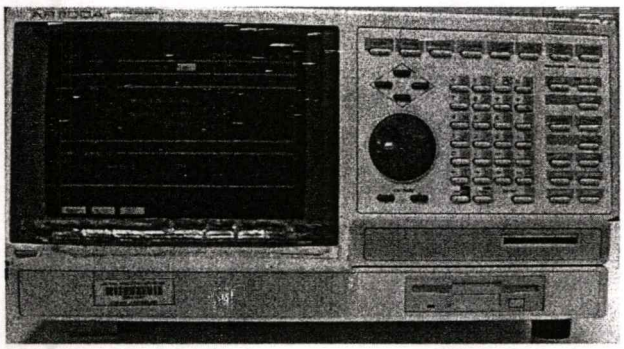
Equipments of Test



12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE)



Digital Oscilloscope YOKOGAWA OL 1520



Oscillographic Recorder YOKOGAWA ORM 1300

Automatic Control Test Set for Water Absorption Test Item of Cable Insulators According to IEC 60502-2 Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

Source code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Source code โปรแกรมภาษาวิชวลเบสิค ของโปรแกรมควบคุมชุดทดสอบ

ฟอร์ม main_menu

```
Private Sub to_test_Click()
Unload main_menu
test_initial_form.Show
End Sub
Private Sub to_look_Click()
Unload main_menu
look_initial_form.Show
End Sub
Private Sub to_quit_Click()
End
End Sub
Private Sub Form_Load()
day = 1
Load test_initial_form
Load look_initial_form
End Sub
```

ฟอร์ม test_initial_form

```
Private Sub command_test_Click()
'*** Save standard table to some filename ***
If text_filename.Text = "" Then
   destinate1 = "c:\my
documents\ping\database\test_date_1-7.mdb"
   destinate2 = "c:\my
documents\ping\database\test_date_8-15.mdb"
Else
   destinate1 = Dir1.Path & "\" &
text_filename.Text & "_date_1-7.mdb"
   destinate2 = Dir1.Path & "\" &
text_filename.Text & "_date_8-15.mdb"
End If
'*** Protect file copy error ***
destinate = "c:\my
documents\ping\database\ping1.mdb"
dat = "date 8"
makedata
editdata
'*** Start to copy ***
locate = "c:\my
documents\ping\database\ping.mdb"
destinate = destinate1
FileCopy locate, destinate
'*** Protect again ***
dat = "date 1"
makedata
editdata
'*** Start to copy ***
locate = "c:\my
documents\ping\database\ping1.mdb"
destinate = destinate2
FileCopy locate, destinate
'*** Store initial condition to public variable
***
comport = Val(text_comport.Text)
nam = text_name.Text
sur = text_surname.Text
insu = text_insulator.Text
temp = Val(text_temperature.Text)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
temp_sib = Left(text_temperature.Text, 1)
temp_nuay = Right(text_temperature.Text, 1)

noi = (((90 - temp) * (135 - 106)) / (90 - 50)) +
106
mark = (((90 - temp) * (150 - 122)) / (90 - 50))
+ 122

makedata
fieldinitial
destinate = destinate2
dat = "date 8"
makedata
fieldinitial
'*** Connect to temperature and voltage table
***
link_t_v
'*** Set day now for use in test_form ***
day_now = 1
'*** Set initial of serial port connection ***
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.CommPort = comport
MSComm1.InputLen = 1
MSComm1.PortOpen = True
noi_noi = (((90 - temp) * (110 - 84)) / (90 -
50)) + 84

clea = Val(text_clearance.Text)
dur = Val(text_duration.Text)
'***Store initial condition to file ***
destinate = destinate1
dat = "date 1"
MSComm1.RThreshold = 1
'*** Send bit start to microprocessor ***
Unload test_initial_form
Load test_form
test_form.Show
End Sub
Private Sub command_back_Click()
'*** Go to main menu ***
Unload test_initial_form
Unload main_menu
Load main_menu
main_menu.Show
End Sub
Private Sub Drive1_Change()
Dir1.Path = Drive1.Drive
End Sub
```

ฟอร์ม test_form

```
Dim x_new, y_new, x_old, y_old As Single
Dim laeead, rim_right, rim_left, rad As Single
Dim x, xo, y As Single
Dim slide_sen, chung As Single
Dim real_temp, real_time, real_time_sec,
real_time_min As Single
Dim y_laeead, x_laeead, start, k As Integer
Dim hex_value As Single
Dim nub, vain, io, vtc As Single

Private Sub Text1_KeyPress(KeyAscii As
Integer)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    MSComm1.Output = Chr$(KeyAscii)
End Sub
Private Sub mscomm1_oncomm()
  'Text1.Text = Text1.Text &
MSComm1.Input
  'nub = nub + 1
'If nub = 3 Then
  'hex_value = Val(Text1.Text)
  'hex_value_before = hex_value
'If jum_nun < 20 Then
  Text1.Text = MSComm1.Input
If Text1.Text <> "" Then
  If Asc(Text1.Text) <> 254 Then '%%%
  'If Text1.Text <> "" Then
    hex_value = (Asc(Text1.Text) + 50)

    vain = (hex_value / 256) * 2.2
    io = (vain / 119.4) * 1000    'mA
    vtc = (io - 4) / (0.016 + (40 / 12.1)) 'mV
    v_ruam = v_ruam + vain
    jum_nun = jum_nun + 1

    rs_t_v.MoveLast
  If vtc > 0.05 Then
  Do
    rs_t_v.MovePrevious
  Loop Until rs_t_v.Fields("voltage") <= vtc
    tbase = rs_t_v.Fields("temperature")
    vbase = rs_t_v.Fields("voltage")
    rs_t_v.MoveNext
    vnext = rs_t_v.Fields("voltage")
    tadd = ((vtc - vbase) / (vnext - vbase))
    temperature = tbase + tadd
    temp_ruam = temp_ruam + temperature
    Text4.Text = Format(temperature,
"###.##")
'End If
  End If
  Text1.Text = ""

Else   '%%%
  Unload test_form   '%%%
  'test_form.Hide    '%%%
  Load out_of_water_form  '%%%
  out_of_water_form.Show  '%%%
End If  '%%%
End If
    'nub = 0
'End If
End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
Text2.Text = Str(noi) & " " & Str(mark)

'*** Protect over flow ***
If HScroll1.Max <= 32767 - laeead Then
  HScroll1.Min = -32767
'*** For average temperature ***
If jum_nun <> 0 Then
  temperature = (temp_ruam / jum_nun)
End If
'*** For draw graph ***
  x_old = x_new
  y_old = y_new
  x_new = x_new + laeead
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    y_new = (39767 - (temperature * 50))

    Picture2.Line (x_old, y_old)-(x_new,
y_new)
    'Picture2.Circle (a, b), rad
    real_temp = temperature
    text_temperature_now.Text = "Temperature
at this time is " & Format(temperature,
"###.##") & " degree of celcious"
    real_time = (((x_new - 32767) - rim_left) *
1) / 0.8
    real_time_sec = (real_time Mod 3600) Mod
60 '!!!!!!!!!!!!!(real_time Mod 10)
    real_time_min = (real_time Mod 3600) \ 60
    real_time_hour = (real_time \ 3600)
'!!!!!!!!!!!!!(real_time \ 10)
    text_duration_now.Text = "This duration is "
& Str(day_now - 1) & " day " &
Str(real_time_hour) & " hour : " &
Str(real_time_min) & " min : " &
Str(real_time_sec) & " sec "
'*** For check hour and edit value to file ***

'If real_time_hour <= (dur + 1) Then
'!!!!!!!!!!!!!!!!  'really is save until dur
    If real_time_sec Mod 5 = 0 Then
      If (real_time_sec = 0) And
(real_time_min = 0) Then
        real_time_hour = (real_time_hour - 1)
      End If
      '*** For set hour ***
      select_hour
      rsdate_edit.Edit
      rsdate_edit.Fields(real_hour) = real_temp
      rsdate_edit.Update
      rsdate_edit.MoveNext
      If rsdate_edit.EOF = True Then
        rsdate_edit.MoveFirst
      End If
    End If
'End If
'*** For check duration and add day ***
If real_time_hour = 24 And real_time_sec > 0
Then '!!!!!!!!!!!!!
    Timer1.Enabled = False
    Unload test_form
    If day_now = dur Then
      Load warning_form
      warning_form.Show
    End If
    day_now = day_now + 1
    If day_now <= 16 Then
      Unload look_form
      look_form.Hide
      Load test_form
      test_form.Show
    Else
      MsgBox "You are going to test for too
much duration ", vbInformation + vbOKOnly,
"Warning"
      MSComm1.Output = Chr$(Asc("r"))
    End If
End If
'*** Add line follow picture2.width ***
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If (x_new - 32767) > (Picture2.Width -
rim_right) Then
   Line2.X2 = (x_new + rim_right)
   For i% = 0 To 26
      Line3(i%).X2 = (x_new + rim_right)
   Next i%
   Picture2.Width = x_new - 32767 + rim_right
End If
If Picture2.Width > Picture1.Width Then
   HScroll1.Enabled = True
   If start < 3 Then
      start = start + 1
   End If
   HScroll1.Max = Picture2.Width -
Picture1.Width - 32767
Else
   HScroll1.Enabled = False
End If
HScroll1.Refresh
'*** Give Hscroll1.value follow draging mouse
***
If (HScroll1.Value = HScroll1.Max - laeead)
Or (start = 1) Then  '****new*****
   HScroll1.Value = HScroll1.Max
Else
   If HScroll1.Enabled = True Then
      HScroll1.Value = -Picture2.Left
   End If
End If
End If
   v_ruam = 0
   jum_nun = 0
   temp_ruam = 0
End Sub
Private Sub Form_Load()
'*** Initial temperature reader ***
   'Text1.Text = ""
   nub = 0
   v_ruam = 0
   jum_nun = 0
   temp_ruam = 0
'*** Set initial of serial port connection ***
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.CommPort = comport
MSComm1.InputLen = 1
MSComm1.PortOpen = True
MSComm1.RThreshold = 1
Timer2.Enabled = True
'*** Set destinate and date to editdata ***
select_day_now
editdata
rsdate_edit.MoveFirst
'*** Set command previous and next ***
  command_next.Enabled = False
If day_now = 1 Then
  command_previous.Enabled = False
Else
  command_previous.Enabled = True
End If
'*** Set initial condition of drawing graph ***
x_new = 33767
y_new = (39767 - (temperature * 50))
laeead = 0.8
rim_right = 1500
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
rim_left = 1000
rad = 20
chung = 30
x = (0.8 * 60 * 30)
xo = 33767 + (0.8 * 60 * 30)
'*** Draw line and text for show value in y
axis ***
text_temp_value(26).Visible = False
distance_of_text% = 450
temp_value% = 130
distance_of_line% = 500
For y_axis% = 0 To 26
   Line3(y_axis%).X1 = 1000
   Line3(y_axis%).X2 = 12000   '*****
   Line3(y_axis%).BorderColor = &HFF&
   Line3(y_axis%).Y1 = distance_of_line%
   Line3(y_axis%).Y2 = distance_of_line%
   distance_of_line% = distance_of_line% +
250
   text_temp_value(y_axis%).BackColor =
&HC0C0FF
   text_temp_value(y_axis%).Alignment = 2
   text_temp_value(y_axis%).BorderStyle = 0
   text_temp_value(y_axis%).Height = 100
   text_temp_value(y_axis%).Width = 400
   text_temp_value(y_axis%).Left = 300
   text_temp_value(y_axis%).Top =
distance_of_text%
   distance_of_text% = distance_of_text% +
250
   text_temp_value(y_axis%).Text =
temp_value%
   temp_value% = temp_value% - 5
Next y_axis%
'*** Did not display laeead and different of
line ***
For m% = 1 To 25 Step 2
   text_temp_value(m%).Visible = False
   Line3(m%).BorderStyle = 5
   Line3(m%).Visible = False
   Line3(m%).BorderWidth = 1
   Line3(m% - 1).BorderWidth = 1
   Line3(m% - 1).BorderStyle = 1
Next m%
'*** Draw text for show value in x axis ***
For x_axis% = 0 To 51
   text_time_value(x_axis%).BackColor =
&HC0C0FF
   text_time_value(x_axis%).Alignment = 2
   text_time_value(x_axis%).BorderStyle = 0
   text_time_value(x_axis%).Height = 100
   text_time_value(x_axis%).Width = 1200
   text_time_value(x_axis%).Top = 7200
   '*** Did not display zero ***
   If Str(((x_axis% + 1) * 30) \ 60) <> 0 Then
'hour
      If Str(((x_axis% + 1) * 30) Mod 60) <> 0
Then ' minute
         text_time_value(x_axis%).Text =
Str(((x_axis% + 1) * 30) \ 60) & " hour" &
Str(((x_axis% + 1) * 30) Mod 60) & " min"
      Else
         text_time_value(x_axis%).Text =
Str(((x_axis% + 1) * 30) \ 60) & " hour"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      End If
    Else
      text_time_value(x_axis%).Text =
Str(((x_axis% + 1) * 30) Mod 60) & " min"
    End If
    text_time_value(x_axis%).Left = (1000 +
(0.8 * 60 * 30) * (x_axis% + 1)) -
(text_time_value(x_axis%).Width / 2)
Next x_axis%
'*** Draw line in x axis ***
For x_axis% = 0 To 99
    Line4(x_axis%).BorderColor = &HFF&
    Line4(x_axis%).Y1 = 500
    Line4(x_axis%).Y2 = 7000
    Line4(x_axis%).X1 = 1000 + ((0.8 * 60 *
15) * (x_axis% + 1))
    Line4(x_axis%).X2 = Line4(x_axis%).X1
Next x_axis%
'*** Did not display laeead and different of
line ***
For m% = 0 To 99 Step 2
    Line4(m% + 1).BorderWidth = 1
    Line4(m% + 1).BorderStyle = 1
    Line4(m%).BorderWidth = 1
    Line4(m%).BorderStyle = 5
    Line4(m%).Visible = False
Next m%
End Sub
Private Sub command_previous_Click()
previous_from_test = 3
test_form.Hide
day = day_now
day = day - 1
Unload look_form
Load look_form
look_form.Show
End Sub
'Private Sub command_stop_timer_Click()
'Timer1.Enabled = False
'End Sub
'Private Sub command_start_timer_Click()
'Timer1.Enabled = True
'End Sub
Private Sub command_y_laeead_Click()
If y_laeead = 0 Then
    For m% = 1 To 25 Step 2
    Line3(m%).Visible = True
    Next m%
    y_laeead = y_laeead + 1
Else
    For m% = 1 To 25 Step 2
    Line3(m%).Visible = False
    Next m%
    y_laeead = y_laeead - 1
End If
End Sub
Private Sub command_x_laeead_Click()
If x_laeead = 0 Then
    For m% = 0 To 99 Step 2
    Line4(m%).Visible = True
    Next m%
    x_laeead = x_laeead + 1
Else
    For m% = 0 To 99 Step 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Line4(m%).Visible = False
    Next m%
    x_laeead = x_laeead - 1
End If
End Sub
Private Sub command_quit_Click()
MSComm1.Output = Chr$(Asc("r"))
      nub = 0
      v_ruam = 0
      jum_nun = 0
      temp_ruam = 0
Unload test_form
Load main_menu
main_menu.Show
End Sub
Private Sub Form_Activate()
test_form.Caption = "Graph display between
temperature and duration of " & Str(dur) & "
day"
text_insulator.Text = "Type of insulation is " &
insu
text_temperature.Text = "At temperature " &
Str(temp) & " degree of celcious "
text_duration.Text = "for " & Str(dur) & " day"
text_name_surname.Text = "By " & nam & " "
& sur
End Sub
Private Sub Form_Resize()
'*** Initial condition for draw graph ***
test_form.ScaleLeft = 32767
test_form.ScaleTop = 32767
Picture1.ScaleLeft = 32767
Picture2.ScaleLeft = 32767
Picture1.ScaleTop = 32767
Picture2.ScaleTop = 32767
Picture1.Move 32767, 32767, ScaleWidth -
VScroll1.Width, ScaleHeight -
HScroll1.Height
Picture2.Move 32767, 32767
If Picture2.Width < Picture1.Width Then
   Picture2.Width = Picture1.Width
   HScroll1.Max = 32767 - laeead
End If
If Picture2.Height < Picture1.Height Then
   Picture2.Height = Picture1.Height
End If
HScroll1.Left = 32767
HScroll1.Top = ScaleHeight - HScroll1.Height
+ 32767
HScroll1.Width = Picture1.Width
VScroll1.Top = 32767
VScroll1.Left = ScaleWidth - VScroll1.Width
+ 32767
VScroll1.Height = Picture1.Height
HScroll1.Min = -32767
VScroll1.Min = -32767
HScroll1.Value = -32767
VScroll1.Value = -32767
If Picture2.Width > Picture1.Width Then
   HScroll1.Enabled = True
   HScroll1.Max = Picture2.Width -
Picture1.Width - 32767
Else
   HScroll1.Enabled = False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
End If
If Picture2.Height > Picture1.Height Then
   VScroll1.Enabled = True
   VScroll1.Max = Picture2.Height -
Picture1.Height - 32767
Else
   VScroll1.Enabled = False
End If
'*** Set change scrolls 1/10 of distance. ***
If HScroll1.Max > 10 And VScroll1.Max > 10
Then
   HScroll1.LargeChange = HScroll1.Max / 10
   VScroll1.LargeChange = VScroll1.Max / 10
Else
   HScroll1.LargeChange = 1000
   VScroll1.LargeChange = 1000
End If
HScroll1.Refresh
VScroll1.Refresh
End Sub
Private Sub vscroll1_change()
Picture2.Top = -VScroll1.Value
End Sub
Private Sub vscroll1_scroll()
Picture2.Top = -VScroll1.Value
End Sub
Private Sub hscroll1_change()
Picture2.Left = -HScroll1.Value
End Sub
Private Sub hscroll1_scroll()
Picture2.Left = -HScroll1.Value
End Sub
Private Sub Timer2_Timer()
MSComm1.Output = Chr$(dur)
Timer3.Enabled = True
Timer2.Enabled = False
End Sub
Private Sub Timer3_Timer()
MSComm1.Output = Chr$(Asc(temp_sib))
Timer4.Enabled = True
Timer3.Enabled = False
End Sub
Private Sub Timer4_Timer()
MSComm1.Output = Chr$(Asc(temp_nuay))
Timer6.Enabled = True
Timer4.Enabled = False
End Sub
Private Sub Timer5_Timer()
MSComm1.Output = Chr$(Asc("s"))
Timer5.Enabled = False
End Sub
Private Sub Timer6_Timer()
MSComm1.Output = Chr$(noi - 90)
Timer7.Enabled = True
Timer6.Enabled = False
End Sub
Private Sub timer7_timer()
MSComm1.Output = Chr$(mark - 100)
Timer8.Enabled = True
Timer7.Enabled = False
End Sub
Private Sub timer8_timer()
MSComm1.Output = Chr$(noi_noi - 50)
Timer5.Enabled = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Timer8.Enabled = False
```

ฟอร์ม look_intial_form

```
Private Sub command_open_Click()
If InStr(File1.FileName, "date_1-7") > 0 Then
   destinate1 = Dir1.Path & "\" &
File1.FileName
   destinate2 = Left$(destinate1,
(Len(destinate1) - 7)) & "8-15.mdb"
  previous_from_test = 0
   Load look_form
   look_form.Show
   Unload look_initial_form
Else
   MsgBox "This file did not support this
program ! please select new file", vbInformation
+ vbOKOnly, "Warning"
End If
End Sub
Private Sub command_quit_Click()
Unload look_initial_form
Load main_menu
main_menu.Show
End Sub
Private Sub Command1_Click()
If InStr(File1.FileName, "date_1-7") > 0 Then
   destinate1 = Dir1.Path & "\" &
File1.FileName
   destinate2 = Left$(destinate1,
(Len(destinate1) - 7)) & "8-15.mdb"
   previous_from_test = 0
   Load print_form
   print_form.Show
   Unload look_initial_form
Else
   MsgBox "This file did not support this
program ! please select new file", vbInformation
+ vbOKOnly, "Warning"
End If
End Sub
Private Sub Dir1_Change()
File1.Path = Dir1.Path
End Sub
Private Sub Drive1_Change()
Dir1.Path = Drive1.Drive
End Sub
Private Sub File1_Click()
Text1.Text = Dir1.Path & "\" & File1.FileName
End Sub
Private Sub Form_Load()
Text1.Text = "*.mdb"
File1.Pattern = "*.mdb"
End Sub
```

ฟอร์ม look_form

```
Dim a, b, c, d As Single
Dim j, r, l As Single
Dim laeead, rim_right, rim_left, rad As Single
Dim x, xo, y As Single
Dim slide_sen, chung As Single
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Dim real_temp, real_time, real_time_sec,
real_time_min As Single
Dim n, p, start, k As Integer
Private Sub draw_graph()
a = 33767
b = 39767
Picture2.Cls
For hour_field% = 0 To 23 Step 1
   rsdate.MoveFirst
   real_time_hour = hour_field%
   select_hour
   For sec% = 5 To 3600 Step 5
      HScroll1.Min = -32767
      c = a
      d = b
      a = a + laeead
      b = (39767 - (rsdate.Fields(real_hour) *
50))
      Picture2.Line (c, d)-(a, b)
   rsdate.MoveNext
  Next sec%
Next hour_field%
End Sub
Private Sub command_next_Click()
day = day + 1
If previous_from_test = 3 Then
   If day = day_now Then
      Unload look_form
      previous_from_test = 2
      test_form.Show
   Else
      Unload look_form
      Load look_form
      look_form.Show
   End If
Else
   Unload look_form
   Load look_form
   look_form.Show
End If
End Sub
Private Sub command_previous_Click()
day = day - 1
Unload look_form
Load look_form
look_form.Show
End Sub
Private Sub command_quit_Click()
Unload look_form
Unload test_form
'*** Set initial of serial port connection ***
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.CommPort = comport
MSComm1.InputLen = 1
MSComm1.PortOpen = True
MSComm1.RThreshold = 1
'*** Send bit start to micropro ***
MSComm1.Output = Chr$(Asc("r"))
Load main_menu
main_menu.Show
End Sub
Private Sub command_y_laeead_Click()
If n = 0 Then
   For m% = 1 To 25 Step 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Line3(m%).Visible = True
    Next m%
    n = n + 1
  Else
    For m% = 1 To 25 Step 2
    Line3(m%).Visible = False
    Next m%
    n = n - 1
  End If
  End Sub
  Private Sub command_x_laeead_Click()
  If p = 0 Then
    For m% = 0 To 99 Step 2
    Line4(m%).Visible = True
    Next m%
    p = p + 1
  Else
    For m% = 0 To 99 Step 2
    Line4(m%).Visible = False
    Next m%
    p = p - 1
  End If
  End Sub
  Private Sub command_close_Click()
  Unload look_form
  Load look_initial_form
  look_initial_form.Show
  End Sub
  Private Sub Form_Activate()
  look_form.Caption = "Graph display between
  temperature and duration of " & Str(day) & "
  day"
  rsinitial.MoveFirst
  text_insulator.Text = "Type of insulation is " &
  rsinitial.Fields("type of insulation")
  text_temperature.Text = "At temperature " &
  Str(rsinitial.Fields("temperature")) & " degree of
  celcious "
  text_duration.Text = "for " &
  Str(rsinitial.Fields("duration")) & " day"
  text_name_surname.Text = "By " &
  rsinitial.Fields("name") & " " &
  rsinitial.Fields("surname")
  End Sub
  Private Sub Form_Load()
  select_day
  If day <= 15 Then
    makedata
  End If
  look_form.Caption = "Graph display between
  temperature and duration of " & Str(day) & "
  day"
  If day = 1 Then
    command_previous.Enabled = False
  Else
    command_previous.Enabled = True
  End If
  If previous_from_test = 0 Then
    If day = 15 Then
      command_next.Enabled = False
    Else
      command_next.Enabled = True
    End If
  Else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    If day = 15 Or day = day_now Then
        command_next.Enabled = False
    Else
        command_next.Enabled = True
    End If
End If

If previous_from_test = 3 Then
    command_quit.Visible = True
    command_close.Visible = False
Else
    command_quit.Visible = False
    command_close.Visible = True
End If

look_form.ScaleHeight = 8595
look_form.ScaleWidth = 11880
look_form.ScaleLeft = 32767
look_form.ScaleTop = 32767
Picture1.ScaleLeft = 32767
Picture2.ScaleLeft = 32767
Picture1.ScaleTop = 32767
Picture2.ScaleTop = 32767

Picture1.Move 32767, 32767, ScaleWidth -
VScroll1.Width, ScaleHeight - HScroll1.Height
Picture2.Move 32767, 32767
Picture2.Width = 81000 '***********
Picture2.Height = (ScaleHeight -
HScroll1.Height) + 100
a = 33767
b = 39767
laeead = 0.8 * 5
rim_right = 100
rim_left = 1000
rad = 20
chung = 30
x = (0.8 * 60 * 30)
xo = 33767 + (0.8 * 60 * 30)
Text5(26).Visible = False
j = 33217
r = 130
l = 33267
 For i% = 0 To 26
 Line3(i%).X1 = 33767
 Line3(i%).X2 = 33767 + 70000  '*****
 Line3(i%).BorderColor = &HFF&
 Line3(i%).Y1 = l
 Line3(i%).Y2 = l
 l = l + 250
 Text5(i%).BackColor = &HC0C0FF
 Text5(i%).Alignment = 2
 Text5(i%).BorderStyle = 0
 Text5(i%).Height = 100
 Text5(i%).Width = 400
 Text5(i%).Left = 33067
 Text5(i%).Top = j
 j = j + 250
 Text5(i%).Text = r
 r = r - 5
 Next i%
 For m% = 1 To 25 Step 2
 Text5(m%).Visible = False
 Line3(m%).BorderStyle = 5
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Line3(m%).Visible = False
    Line3(m%).BorderWidth = 1
    Line3(m% - 1).BorderWidth = 1
    Line3(m% - 1).BorderStyle = 1
    Next m%
      For o% = 0 To 51
    Text6(o%).BackColor = &HC0C0FF
    Text6(o%).Alignment = 2
    Text6(o%).BorderStyle = 0
    Text6(o%).Height = 100
    Text6(o%).Width = 1200
    Text6(o%).Top = 39967
    'don't display zero
    If Str(((o% + 1) * 30) \ 60) <> 0 Then  'hour
      If Str(((o% + 1) * 30) Mod 60) <> 0 Then '
minute
        Text6(o%).Text = Str(((o% + 1) * 30) \
60) & " hour" + Str(((o% + 1) * 30) Mod 60) &
" min"
      Else
        Text6(o%).Text = Str(((o% + 1) * 30) \
60) & " hour"
      End If
    Else
      Text6(o%).Text = Str(((o% + 1) * 30) Mod
60) & " min"
    End If
    Text6(o%).Left = (33767 + (0.8 * 60 * 30) *
(o% + 1)) - (Text6(o%).Width / 2)
    Next o%
    For o% = 0 To 99
    Line4(o%).BorderColor = &HFF&
    Line4(o%).Y1 = 33267
    Line4(o%).Y2 = 39767
    Line4(o%).X1 = 33767 + ((0.8 * 60 * 15) *
(o% + 1))
    Line4(o%).X2 = Line4(o%).X1
    Next o%
    For m% = 0 To 99 Step 2
    Line4(m% + 1).BorderWidth = 1
    Line4(m% + 1).BorderStyle = 1
    Line4(m%).BorderWidth = 1
    Line4(m%).BorderStyle = 5
    Line4(m%).Visible = False
    Next m%
draw_graph
End Sub
Private Sub Form_Resize()
'look_form.ScaleHeight = 8595
'look_form.ScaleWidth = 11880
look_form.ScaleLeft = 32767
look_form.ScaleTop = 32767
Picture1.ScaleLeft = 32767
Picture2.ScaleLeft = 32767
Picture1.ScaleTop = 32767
Picture2.ScaleTop = 32767
Picture1.Move 32767, 32767, ScaleWidth -
VScroll1.Width, ScaleHeight - HScroll1.Height
Picture2.Move 32767, 32767
If Picture2.Width < Picture1.Width Then
  Picture2.Width = Picture1.Width
  HScroll1.Max = 32767 - laeead
End If
If Picture2.Height < Picture1.Height Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Picture2.Height = Picture1.Height
End If
HScroll1.Left = 32767
HScroll1.Top = ScaleHeight - HScroll1.Height +
32767
HScroll1.Width = Picture1.Width
VScroll1.Top = 32767
VScroll1.Left = ScaleWidth - VScroll1.Width +
32767
VScroll1.Height = Picture1.Height
HScroll1.Min = -32767
VScroll1.Min = -32767
HScroll1.Value = -32767
VScroll1.Value = -32767
   HScroll1.Max = Picture2.Width -
Picture1.Width - 32767
If Picture2.Height > Picture1.Height Then
    VScroll1.Max = Picture2.Height -
Picture1.Height - 32767
End If
'set change scrolls 1/10 of distance.
If HScroll1.Max > 10 And VScroll1.Max > 10
Then
    HScroll1.LargeChange = HScroll1.Max / 10
    VScroll1.LargeChange = VScroll1.Max / 10
Else
    HScroll1.LargeChange = 1000
    VScroll1.LargeChange = 1000
End If
    HScroll1.Enabled = True
If (Picture1.Height < Picture2.Height) Then
    VScroll1.Enabled = True
Else
    VScroll1.Enabled = False
End If
HScroll1.Refresh
VScroll1.Refresh
End Sub
Private Sub hscroll1_change()
Picture2.Left = -HScroll1.Value
End Sub
Private Sub hscroll1_scroll()
Picture2.Left = -HScroll1.Value
End Sub
Private Sub vscroll1_change()
Picture2.Top = -VScroll1.Value
End Sub
Private Sub vscroll1_scroll()
Picture2.Top = -VScroll1.Value
End Sub
```

ฟอร์ม print_form

```
Dim a, b, c, d As Single
Dim j, r, l As Single
Dim laeead, rim_right, rim_left, rad As Single
Dim x, xo, y As Single
Dim slide_sen, chung As Single
Dim real_temp, real_time, real_time_sec,
real_time_min As Single
Dim n, p, start, k As Integer
Private Sub draw_graph()
Picture2.Cls
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
For hour_field% = 0 To 23 Step 1
  rsdate.MoveFirst
  real_time_hour = hour_field%
  select_hour
  For sec% = 5 To 3600 Step 5
    If sec% = 5 Then
      temp_5! = rsdate.Fields(real_hour)
      'Line3(hour_field%).X1 = (500 +
(hour_field% * 450))
      'Line3(hour_field%).X2 = (500 +
((hour_field% + 1) * 450))
      'Line3(hour_field%).Y1 = (8000 -
(rsdate.Fields(real_hour) * 75))
    End If
    If sec% = 1800 Then
      temp_30! = rsdate.Fields(real_hour)
      'Line3(hour_field%).Y2 = (8000 -
(rsdate.Fields(real_hour) * 75))
    End If
    If sec% = 3600 Then
      temp_60! = rsdate.Fields(real_hour)
    End If
    rsdate.MoveNext
  Next sec%
  Line3(hour_field%).X1 = ((500 + 920) +
(hour_field% * 410))
  Line3(hour_field%).X2 = ((725 + 920) +
(hour_field% * 410))
  Line4(hour_field%).X1 =
Line3(hour_field%).X2
  Line4(hour_field%).X2 = ((950 + 920) +
(hour_field% * 410))
  If hour_field% = 0 Then
    Line3(hour_field%).Y1 = ((8000 - 500) -
(temp_5! * 65))
  Else
    Line3(hour_field%).Y1 =
Line4(hour_field% - 1).Y2
  End If
  Line3(hour_field%).Y2 = ((8000 - 500) -
(temp_30! * 65))
  Line4(hour_field%).Y1 =
Line3(hour_field%).Y2
  Line4(hour_field%).Y2 = ((8000 - 500) -
(temp_60! * 65))
  Next hour_field%
End Sub
Private Sub command_next_Click()
day = day + 1
 Unload print_form
 Load print_form
 print_form.Show
End Sub
Private Sub command_previous_Click()
day = day - 1
Unload print_form
Load print_form
print_form.Show
End Sub
Private Sub Form_Activate()
print_form.Caption = "Graph display between
temperature and duration of " & Str(day) & "
day"
rsinitial.MoveFirst
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
text_insulator.Text = "Type of insulation is " &
rsinitial.Fields("type of insulation")
text_temperature.Text = "At temperature " &
Str(rsinitial.Fields("temperature")) & " degree "
text_duration.Text = "for " &
Str(rsinitial.Fields("duration")) & " day"
text_name_surname.Text = "By " &
rsinitial.Fields("name") & " " &
rsinitial.Fields("surname")
End Sub
Private Sub Form_Load()
select_day
If day <= 15 Then
   makedata
End If
print_form.Caption = "Graph display between
temperature and duration of " & Str(day) & "
day"
Text6.Text = "Graph display between
temperature and duration of " & Str(day) & "
day"
If day = 1 Then
   command_previous.Enabled = False
Else
   command_previous.Enabled = True
End If
   If day = 15 Then
      command_next.Enabled = False
   Else
      command_next.Enabled = True
   End If
text_insulator.BackColor = &HC0C0FF
text_temperature.BackColor = &HC0C0FF
text_name_surname.BackColor = &HC0C0FF
text_duration.BackColor = &HC0C0FF
Text5.BackColor = &HC0C0FF
Text6.BackColor = &HC0C0FF
Picture2.BackColor = &HC0C0FF
print_form.ScaleLeft = 0
print_form.ScaleTop = 0
Picture1.ScaleLeft = 0
Picture2.ScaleLeft = 0
Picture1.ScaleTop = 0
Picture2.ScaleTop = 0
Picture1.Move 960, 0, ScaleWidth, ScaleHeight
Picture2.Move 960, 0, ScaleWidth, ScaleHeight
For i% = 0 To 10
Text1(i%).BackColor = &HC0C0FF
Text1(i%).Alignment = 2
Text1(i%).BorderStyle = 0
Text1(i%).Height = 100
Text1(i%).Width = 350
Text1(i%).Top = ((500 - 50 + 500) + (i% * 650))
Text1(i%).Left = (100 + 960)
Text1(i%).Text = Str(100 - (i% * 10))
Line1(i%).BorderColor = &HFF&
Line1(i%).X1 = (500 + 960)
Line1(i%).X2 = (11300)
Line1(i%).Y1 = (500 + 500 + (i% * 650))
Line1(i%).Y2 = (500 + 500 + (i% * 650))
Next i%
For i% = 0 To 24
Line2(i%).BorderColor = &HFF&
Line2(i%).X1 = ((500 + 960) + (i% * 410))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Line2(i%).X2 = ((500 + 960) + (i% * 410))
Line2(i%).Y1 = (500 + 500)
Line2(i%).Y2 = (8000 - 500)
Next i%
Line2(0).BorderWidth = 2
Line1(10).BorderWidth = 2
For i% = 0 To 12
Text2(i%).BackColor = &HC0C0FF
Text2(i%).Alignment = 2
Text2(i%).BorderStyle = 0
Text2(i%).Height = 100
Text2(i%).Width = 300
Text2(i%).Top = (8100 - 500)
Text2(i%).Left = ((500 + 960 - 150) + (i% *
(900 - 80)))
Text2(i%).Text = Str(i% * 2)
Next i%
Text3.BackColor = &HC0C0FF
Text3.Alignment = 2
Text3.BorderStyle = 0
Text3.Height = 100
Text3.Width = 1800
Text3.Top = (200 + 500)
Text3.Left = (150 + 960)
Text3.Text = "Temperature (celcious)"
Text4.BackColor = &HC0C0FF
Text4.Alignment = 2
Text4.BorderStyle = 0
Text4.Height = 100
Text4.Width = 850
Text4.Top = (8350 - 500)
Text4.Left = (10600)
Text4.Text = "Time (hour)"
draw_graph
End Sub
Private Sub Command1_Click()
Printer.CurrentY = Printer.CurrentY + 500
'Printer.Print " "
Printer.CurrentY = Printer.CurrentY + 100
Printer.ScaleTop = 500
Printer.EndDoc
print_form.PrintForm
End Sub
Private Sub Command2_Click()
Unload print_form
Load look_initial_form
look_initial_form.Show
End Sub
Private Sub Form_Resize()
print_form.ScaleLeft = 0
print_form.ScaleTop = 0
Picture1.ScaleLeft = 0
Picture2.ScaleLeft = 0
Picture1.ScaleTop = 0
Picture2.ScaleTop = 0
Picture1.Move 0, 0, ScaleWidth, ScaleHeight
Picture2.Move 0, 0
   Picture2.Width = Picture1.Width
  Picture2.Height = Picture1.Height
End Sub
```

ฟอร์ม warning_form

```
Private Sub command_you_know_Click()
Unload test_form
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'*** Set initial of serial port connection ***
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.CommPort = comport
MSComm1.InputLen = 1
MSComm1.PortOpen = True
MSComm1.RThreshold = 1
'*** Send bit stop to micropro ***
MSComm1.Output = Chr$(Asc("r"))
End
End Sub
```

ฟอร์ม out_of_water_form

```
Private Sub Command1_Click()
Unload test_form
'*** Set initial of serial port connection ***
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.CommPort = comport
MSComm1.InputLen = 1
MSComm1.PortOpen = True
MSComm1.RThreshold = 1
'*** Send bit stop to micropro ***
MSComm1.Output = Chr$(Asc("r"))
End
End Sub

Private Sub Form_Load()
tee! = 0
out_of_water_form.Hide
End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
tee! = tee! + 1
If tee! > 30 Then
out_of_water_form.Show
Timer1.Enabled = False
End If
End Sub
```

โมดูล module1

```
Public db, db_edit, t_v As Database
Public rsdate, rsdate_edit, rs_t_v As Recordset
Public rsinitial, rsinitial_edit As Recordset
Public locate, destinate As String
Public destinate1, destinate2 As String
Public dat As String
Public nam, sur, insu As String
Public real_hour As String
Public day As Single
Public previous_from_test As Single
Public day_now As Single
Public temp, clea As Integer
Public dur As Integer
Public real_time_hour As Single
Public vtc, temperature As Single
Public tbase, vbase, vnext, tadd As Single
Public comport As Integer
Public v_ruam, jum_nun, temp_ruam As Single
Public temp_sib, temp_nuay As String
Public noi, mark, noi_noi As Long
Public Sub link_t_v()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Set t_v = OpenDatabase("c:\my
documents\ping\database\reference.mdb")
Set rs_t_v = t_v.OpenRecordset("temp_voltage",
dbOpenDynaset)
End Sub
Public Sub makedata()
Set db = OpenDatabase(destinate)
Set rsdate = db.OpenRecordset(dat,
dbOpenDynaset)
Set rsinitial = db.OpenRecordset("initial",
dbOpenDynaset)
End Sub
Public Sub editdata()
Set db_edit = OpenDatabase(destinate)
Set rsdate_edit = db_edit.OpenRecordset(dat,
dbOpenDynaset)
Set rsinitial_edit =
db_edit.OpenRecordset("initial",
dbOpenDynaset)
End Sub
Public Sub fieldinitial()
   rsinitial.MoveFirst
   rsinitial.Edit
   rsinitial.Fields("name") = nam
   rsinitial.Fields("surname") = sur
   rsinitial.Fields("type of insulation") = insu
   rsinitial.Fields("temperature") = temp
   rsinitial.Fields("clearance of temp") = clea
   rsinitial.Fields("duration") = dur
   rsinitial.Update
End Sub
Public Sub select_hour()
Select Case real_time_hour
    Case 0
      real_hour = "hour 0"
    Case 1
      real_hour = "hour 1"
    Case 2
      real_hour = "hour 2"
    Case 3
      real_hour = "hour 3"
    Case 4
      real_hour = "hour 4"
    Case 5
      real_hour = "hour 5"
    Case 6
      real_hour = "hour 6"
    Case 7
      real_hour = "hour 7"
    Case 8
      real_hour = "hour 8"
    Case 9
      real_hour = "hour 9"
    Case 10
      real_hour = "hour 10"
    Case 11
      real_hour = "hour 11"
    Case 12
      real_hour = "hour 12"
    Case 13
      real_hour = "hour 13"
    Case 14
      real_hour = "hour 14"
    Case 15
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            real_hour = "hour 15"
        Case 16
            real_hour = "hour 16"
        Case 17
            real_hour = "hour 17"
        Case 18
            real_hour = "hour 18"
        Case 19
            real_hour = "hour 19"
        Case 20
            real_hour = "hour 20"
        Case 21
            real_hour = "hour 21"
        Case 22
            real_hour = "hour 22"
        Case 23
            real_hour = "hour 23"
        Case 24
            real_hour = "hour 24"
    End Select
End Sub
Public Sub select_day()
Select Case day
Case 1
    dat = "date 1"
    destinate = destinate1
Case 2
    dat = "date 2"
    destinate = destinate1
Case 3
    dat = "date 3"
    destinate = destinate1
Case 4
    dat = "date 4"
    destinate = destinate1
Case 5
    dat = "date 5"
    destinate = destinate1
Case 6
    dat = "date 6"
    destinate = destinate1
Case 7
    dat = "date 7"
    destinate = destinate1
Case 8
    dat = "date 8"
    destinate = destinate2
Case 9
    dat = "date 9"
    destinate = destinate2
Case 10
    dat = "date 10"
    destinate = destinate2
Case 11
    dat = "date 11"
    destinate = destinate2
Case 12
    dat = "date 12"
    destinate = destinate2
Case 13
    dat = "date 13"
    destinate = destinate2
Case 14
    dat = "date 14"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    destinate = destinate2
Case 15
    dat = "date 15"
    destinate = destinate2
End Select
End Sub
Public Sub select_day_now()
Select Case day_now
Case 1
    dat = "date 1"
    destinate = destinate1
Case 2
    dat = "date 2"
    destinate = destinate1
Case 3
    dat = "date 3"
    destinate = destinate1
Case 4
    dat = "date 4"
    destinate = destinate1
Case 5
    dat = "date 5"
    destinate = destinate1
Case 6
    dat = "date 6"
    destinate = destinate1
Case 7
    dat = "date 7"
    destinate = destinate1
Case 8
    dat = "date 8"
    destinate = destinate2
Case 9
    dat = "date 9"
    destinate = destinate2
Case 10
    dat = "date 10"
    destinate = destinate2
Case 11
    dat = "date 11"
    destinate = destinate2
Case 12
    dat = "date 12"
    destinate = destinate2
Case 13
    dat = "date 13"
    destinate = destinate2
Case 14
    dat = "date 14"
    destinate = destinate2
Case 15
    dat = "date 15"
    destinate = destinate2
End Select
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Source code โปรแกรมภาษาแอสเซมบลี สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

```
;r2 : address of data to write in real time
clock
;r0 : address of data in it
;r1 : loop of number of data to want to
recieve
;r6 : loop of recieve and send
;r7 : delay
;define port and pin name
        lcd_en  bit     p2.6
        lcd_rs  bit     p2.5
        lcd_rw  bit     p2.4

lcd_addr        equ     030h
lcd_dataequ     031h
adde_s  equ     11010000b       ; adde is
address of ds1307
sda_s   equ     p1.4
scl_s   equ     p1.3
adde_a  equ     10010000b       ;address
of pcf8591
con_a   equ     01000000b       ;control
byte of pcf8591
con1_a  equ     01000001b       ;control
byte of pcf8591a to d channal 1
sda_a   equ     p1.6
scl_a   equ     p1.5

        org     0000h
begin:
        mov     p1,#11101110b  ;clear status all
device
        mov     p0,#00000000b  ;clear databus
        call    delay
        setb    p1.0
        call    delay
        clr     p1.0
        call    delay
        mov     p2,#11111111b  ;clear status
keypad and 1 - wire
        mov     p3,#00011111b  ;clear status lcd, r-
2r,p3.2-p3.4
        clr     lcd_rw
        mov     21h,#00h        ;set old sec in 0
        ;mov    52h,#00010100b;set duration for
test
        ;mov    58h,#00001001b;set temp luk sib
        ;mov    59h,#00000000b;set temp luk nuay
        mov     5ah,#00h
        mov     5bh,#00h
        mov     5ch,#00h
        mov     5dh,#00h
        mov     5eh,#0bh
        mov     63h,#09h
        mov     21h,#00h
        mov     6fh,#00h
        mov     6ah,#00h
        ;mov    6ch,#00h
        ;mov    6dh,#0ffh
        ;mov    6eh,#0ffh
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mov     72h,#00h
mov     70h,#00h
mov     71h,#00h

setmode:mov     a,pcon          ;clear
smod
        anl     a,#01111111b
        mov     pcon,a
        mov     tmod,#20h       ;timer 1
mode 2
                                ;timer 0
mode 1
        mov     scon,#40h       ;set mode
        mov     th1,#0fah       ;set reload
value
        mov     tl1,#0fah
        setb    tr1             ;start
timer 1 setb    tr0             ;start
timer 0
        setb    ren
        mov     20h,#0ffh       ;for do not
drive heater
        call    dac
        jnb     ri,$    ;for initial
condition of testing
        clr     ri
        mov     52h,sbuf
        jnb     ri,$
        clr     ri
        mov     58h,sbuf
        jnb     ri,$
        clr     ri
        mov     59h,sbuf
        jnb     ri,$
        clr     ri
        mov     70h,sbuf
        mov     a,#90d
        add     a,70h
        mov     70h,a
        jnb     ri,$
        clr     ri
        mov     71h,sbuf
        mov     a,#100d
        add     a,71h
        mov     71h,a
        jnb     ri,$
        clr     ri
        mov     72h,sbuf
        mov     a,#50d
        add     a,72h
        mov     72h,a
        mov     a,58h
        clr     c
        subb    a,#30h
        mov     58h,a
        mov     6bh,a
        mov     a,59h
        clr     c
        subb    a,#30h
        mov     59h,a
        mov     a,58h
        mov     b,#0ah
        mul     ab
        add     a,59h
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        mov     58h,a
start:  jnb     ri,$
        clr     ri
        mov     a,#'s'
        cjne    a,sbuf,start
data_to_send_to_rtc:    mov
        33h,#00000000b;set second
                        mov
        34h,#00000000b;set minute
                        mov
        35h,#00000000b;set hour
                        mov
        36h,#00000001b;set day
                        mov
        37h,#00000000b;set date
                        mov
        38h,#00000001b;set month
                        mov
        39h,#00000001b;set year
                        mov
        3ah,#10000000b;set control byte
main:   call    write_data
        call    init_lcd
main_1: call    read_data
        call    adc
        call    drive_heater
        call    dac
        call    adc1
        call    send_hex_temp  ;for
display
        call    check_temp_0
        call    loop            ;lcd
display
        call    check_water
        call    check_reset     ;with get
digital value
        jmp     main_1
;*************** drive heater
****************
drive_heater:   mov     a,54h
                mov     b,#0ah
                mul     ab
                add     a,55h
                mov     69h,a
                clr     c
                subb    a,58h
                jc      check_half
                mov     a,71h
                ;************
                mov     20h,a
                jmp     drive_return
check_half:     mov     a,58h
                clr     c
                subb    a,#02h
                clr     c
                subb    a,69h
                jz      half
                jc      half
check_half_half:mov     a,58h
                clr     c
                subb    a,#20d
                clr     c
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        subb    a,69h
        jz      half_half
        jc      half_half
        mov     20h,#00h
        jmp     drive_return
half_half:      mov     a,72h
                mov     20h,a
                jmp     drive_return
half:           mov     a,70h   ;**
                mov     20h,a
drive_return:   ret
;************** check drive heater
***********
;suad:  mov     a,#50h  ;**********
;       mov     b,#40d
;       div     ab
;       mov     a,#90d
;       clr     c
;       subb    a,58h
;       mov     b,#

;************** delay
******************
delay_100ms:    mov     r7,#150
delay_100ms_1:  mov     r6,#0e6h
delay_100ms_2:  nop
                nop
                djnz    r6,delay_100ms_2
                djnz    r7,delay_100ms_1
                ret
;************** delay 1 sec
************
delay_1_sec:    mov     r5,#10
delay_1_sec_1:  call    delay_100ms
                djnz    r5,delay_1_sec_1
                ret
;*********** check temperature
*********
check_temp_0:   djnz    5eh,check_temp
                djnz    63h,add_in
                mov     5eh,#01h
                mov     63h,#01h
                jmp     return_temp
add_in:         mov     68h,#0ah
                call    average
                mov     a,5fh
                add     a,64h
                mov     64h,a
                mov     a,60h
                add     a,65h
                mov     65h,a
                mov     a,61h
                add     a,66h
                mov     66h,a
                mov     a,62h
                add     a,67h
                mov     67h,a
                mov     5eh,#0bh
                jmp     return_temp
check_temp:     mov     dptr,#4000h
check_temp_1:   mov     a,53h
                anl     a,#11000000b
                jz      temp_is_0
                mov     a,#00h
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                movc    a,@a+dptr
                cjne    a,53h,add_dptr
;53h is a2d value
                mov     a,#01h
                movc    a,@a+dptr
                mov     54h,a
                mov     a,#02h
                movc    a,@a+dptr
                mov     55h,a
                mov     a,#03h
                movc    a,@a+dptr
                mov     56h,a
                mov     a,#04h
                movc    a,@a+dptr
                mov     57h,a
                jmp     add_temp
temp_is_0:      mov     54h,#00h
                mov     55h,#00h
                mov     56h,#00h
                mov     57h,#00h
add_temp:       mov     a,54h
                add     a,5ah
                mov     5ah,a
                mov     a,55h
                add     a,5bh
                mov     5bh,a
                mov     a,56h
                add     a,5ch
                mov     5ch,a
                mov     a,57h
                add     a,5dh
                mov     5dh,a
return_temp:    ret
add_dptr:       mov     r0,#05h
add_dptr_1:     inc     dptr
                djnz    r0,add_dptr_1
                jmp     check_temp_1
;****************** average
******************
average:mov     a,5ah
                mov     b,68h
                div     ab
                mov     5fh,a
                mov     a,#0ah
                mul     ab
                add     a,5bh
                mov     b,68h
                div     ab
                mov     60h,a
check_more_9:   clr     c
                mov     a,#0ah
                subb    a,60h
                jz      sol_is_10
                jc      more_10
                jmp     cal_on
sol_is_10:      inc     5fh
                mov     60h,#00h
                jmp     cal_on
more_10:        inc     5fh
                clr     c
                mov     a,60h
                subb    a,#0ah
                mov     60h,a
cal_on:         mov     a,#0ah
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                mul     ab
                add     a,5ch
                mov     b,68h
                div     ab
                mov     61h,a
check_more_9_1: clr     c
                mov     a,#0ah
                subb    a,61h
                jz      sol_is_10_1
                jc      more_10_1
                jmp     cal_on_1
sol_is_10_1:    inc     60h
                mov     a,60h
                cjne    a,#0ah,go_on_1
                inc     5fh
                mov     60h,#00h
go_on_1:        mov     61h,#00h
                jmp     cal_on_1
more_10_1:      inc     60h
                mov     a,60h
                cjne    a,#0ah,go_on_11
                inc     5fh
                mov     60h,#00h
go_on_11:       clr     c
                mov     a,61h
                subb    a,#0ah
                mov     61h,a
cal_on_1:       mov     a,#0ah
                mul     ab
                add     a,5dh
                mov     b,68h
                div     ab
                mov     62h,a
check_more_9_2: clr     c
                mov     a,#0ah
                subb    a,62h
                jz      sol_is_10_2
                jc      more_10_2
                jmp     cal_on_2
sol_is_10_2:    inc     61h
                mov     a,61h
                cjne    a,#0ah,go_on_2
                inc     60h
                mov     a,60h
                cjne
            a,#0ah,go_on_before_2
                inc     5fh
                mov     60h,#00h
go_on_before_2:     mov     61h,#00h
go_on_2:        mov     62h,#00h
                jmp     cal_on_2
more_10_2:      inc     61h
                mov     a,61h
                cjne    a,#0ah,go_on_22
                inc     60h
                mov     a,60h
                cjne
          a,#0ah,go_on_before_22
                inc     5fh
                mov     60h,#00h
go_on_before_22:mov     61h,#00h
go_on_22:       clr     c
                mov     a,62h
                subb    a,#0ah
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                mov     62h,a
cal_on_2:       mov     5ah,#00h
                mov     5bh,#00h
                mov     5ch,#00h
                mov     5dh,#00h
                ;mov    5eh,#0bh
                ret
;********** write data loop **********
write_data:     call    start_s
                mov     a,#adde_s
                call    send_s
                jc      write_data_end
                mov     a,#00h
                call    send_s
                jc      write_data_end
                mov     r0,#33h
                mov     r1,#08h
write_data_2:   mov     a,@r0
                call    send_s
                jc      write_data_end
                inc     r0
                djnz    r1,write_data_2

write_data_end: call    stop_s
                ret
;********** read data loop
**********
read_data:      call    start_s
        ;send start condition
                mov     a,#adde_s
        ;set a as address bit ( to write mode)
                call    send_s
        ;send address of ds1307
                jc      read_data_end
        ;jump if have error
                mov     a,#00h
        ;lock position to address 00h
                call    send_s
        ;send address of register byte
                jc      read_data_end
                call    stop_s
                call    start_s
        ;send repeat start
                mov     a,#adde_s
                setb    acc.0
        ;set address bit as read mode
                call    send_s
                jc      read_data_end
                mov     r0,#3bh
        ;for keep data
                mov     r1,#07h
        ;because data have 7 data
read_all:       call    recieve_s
        ;recieve data output in a
                mov     @r0,a
        ;*********keep for the
future*********
                inc     r0
                clr     sda_s
                call    clkpulse_s
                setb    sda_s
                djnz    r1,read_all
                call    recieve_s
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                mov     @r0,a
                setb    sda_s
        ;send ack bit
                call    clkpulse_s
        ;clock for send ack bit
read_data_end:  call    stop_s
        ;send stop condition
                ret
;**************** send to pc
**************
;a : is data to be send
send_to_pc:             clr     ti
                        mov     sbuf,a
                        jnb     ti,$
                        clr     ti
                        ret
;*********** send hex value of temp to pc
********
send_hex_temp: mov      a,53h
               ;clr     c
               subb     a,#50d
               call     send_to_pc
               ;mov     b,#100
               ;div     ab
               ;add     a,#30h
               ;call    send_to_pc
               ;mov     a,b
               ;mov     b,#10
               ;div     ab
               ;add     a,#30h
               ;call    send_to_pc
               ;mov     a,b
               ;add     a,#30h
               ;call    send_to_pc
               ret
;************** a to d converter
*********
;for control water level channal 2
adc:            jnb     scl_a,adc_end
        ;jump if bus busy
                jnb     sda_a,adc_end
        ;jump if bus busy
                call    start_a
        ;send start condition
        mov     a,#adde_a
        ;set a as address bit
                call    send_a
        ;send address of pcf8591
                jc      adc_end
        ;jump if have error
                mov     a,#con_a
        ;set a as control bit
                call    send_a
        ;send control bit
                jc      adc_end
                call    start_a
        ;send repeat start
                mov     a,#adde_a
                setb    acc.0
        ;set address bit as read mode
                call    send_a
                jc      adc_end
                call    recieve_a
        ;recieve data
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                mov     32h,a
        ;give digital data in r0
;************************************
***
                setb    sda_a
        ;send ack bit
                call    clkpulse_a
        ;clock for send ack bit
adc_end:        clr     c
                call    stop_a
        ;send stop condition
                ret
;************** a to d_1 converter
*********
;control temperature channal 1
adc1:           jnb     scl_a,adc1_end
        ;jump if bus busy
                jnb     sda_a,adc1_end
        ;jump if bus busy
                call    start_a
        ;send start condition
        mov     a,#adde_a
        ;set a as address bit
        call    send_a          ;send
address of pcf8591
        jc      adc1_end
        ;jump if have error
        mov     a,#con1_a
        ;set a as control bit
        call  send_a            ;send
control bit
        jc      adc1_end
                call    start_a         ;send
repeat start
                mov     a,#adde_a
                setb    acc.0           ;set
address bit as read mode
                call    send_a
                jc      adc1_end
                call    recieve_a       ;recieve
data
                mov     53h,a
                setb    sda_a           ;send ack
bit
                call    clkpulse_a      ;clock for
send ack bit
adc1_end:       clr     c
                call    stop_a
                ;send stop condition
                ret
;********** digital to analog
*****************
;sbuf is digital to convert to analog
dac:    jnb     sda_a,dac_end
        jnb     scl_a,dac_end
        call    start_a
        mov     a,#adde_a
        call    send_a
        jc      dac_end
        mov     a,#con_a
        call    send_a
        jc      dac_end
        mov     a,20h
        call    send_a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
dac_end:clr     c
        call    stop_a
        ret
;**************** check water
****************
check_water:    jmp     check_min_equal
check_water_con:        setb    p0.6
                call    delay
                setb    p1.0
                call    delay
                clr     p1.0
                call    delay
        call    delay_1_sec
        call    delay_1_sec
        call    adc
        call    adc
        call    adc1
        call    adc1
        mov     a,32h
        anl     a,#11111100b
        jz      water_less
        mov     a,53h
        anl     a,#11111100b
        jz      water_less
        mov     6ah,#00h
check_water_high:       clr     p0.7
        clr     p0.6
        call    delay
        setb    p1.0
        call    delay
        clr     p1.0
        call    delay
        call    delay_1_sec
        call    delay_1_sec
        mov     6eh,#01h
        call    adc
        call    adc
        call    adc1
        call    adc1
        call    delay_1_sec
        jmp     check_water_exit
water_less:             inc     6ah
                        setb    p0.7
                        clr     p0.6
                        call    delay
                        setb    p1.0
                        call    delay
                        clr     p1.0
                        call    delay
                        call
                delay_1_sec
                        call
                delay_1_sec
                        jmp
                check_water_high
check_water_exit:       mov     6fh,3ch
                        ret
;********** check for minute is equal
**********
;6fh : old sec
;6eh : new sec
check_min_equal:        mov     a,3ch
                        cjne
                a,6fh,min_not_equal
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                jmp     min_is_equal
min_not_equal:  jmp     check_water_con
min_is_equal:           jmp
        check_water_exit
;***************** check reset
*****************
check_reset:    mov     a,#50d
                cjne
        a,6ah,check_reset_1
                mov     a,#0feh
                call    send_to_pc
                call    delay_1_sec
                mov     a,#0feh
                call    send_to_pc
                call    delay_1_sec
                jmp     check_reset_2
check_reset_1:  jnb     ri,check_reset_exit
                clr     ri
                mov     a,#'r'
                cjne
        a,sbuf,check_reset_exit
check_reset_2:  mov     20h,#0ffh
        ;for do not drive heater
                call    dac
                call    lcd_clr
                call    lcd_off
                jmp     begin
check_reset_exit:
return:                 ret
;********** send of pcf8591
***************
send_a: mov     r6,#08h         ;8 bit to
send
send_a_1:rlc    a               ;rotate
data to send
                mov     sda_a,c         ;put bit on
pin
                call    clkpulse_a      ;built
clock pulse
                djnz    r6,send_a_1
                setb    sda_a   ;for check ack bit
in soon
                call    delay
                setb    scl_a   ;for change of data
line while clock line still high
                call    delay
                jnb     sda_a,send_a_2  ;jump if
slave send ack bit
                clr     scl_a           ;for output
from this routine is low as other routine
                call    delay
                setb    c               ;set error
bit
                ret
send_a_2:clr    scl_a
                call    delay
                clr     c
                ret
;********** send of real time clock
**************
;input   a as data to transfer
;       sda_ scl is clear
;output c is high ( 1 ) if have error
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;       sda is low ( 0 ) if sending complete :
scl is low
send_s: mov     r6,#08h ;8 bit to send
send_s_1:rlc    a       ;rotate data to send
        mov     sda_s,c         ;put bit on
pin
        call    clkpulse_s      ;built
clock pulse
        djnz    r6,send_s_1
        setb    sda_s   ;for check ack bit
in soon
        call    delay
        setb    scl_s   ;for change of data
line while clock line still high
        call    delay
        jnb     sda_s,send_s_2  ;jump if
slave send ack bit
        clr     scl_s   ;for output from
this routine is low as other routine
        call    delay
        setb    c       ;set error bit
        ret
send_s_2:clr    scl_s
        call    delay
        clr     c
        ret
;******** recieve data of pcf8591
****************
recieve_a:mov   r6,#08h
recieve_a_1:    setb    scl_a   ;to start
data (bit) recieve from slave
        call    delay
        mov     c,sda_a
        rlc     a       ;rotate bit data to
acc
        clr     scl_a
        call    delay
        djnz    r6,recieve_a_1
        clr     c       ;for safe must set c
as low
        ret
;*** recieve data of real time clock *******
;output  : a contain recieve data
recieve_s:mov   r6,#08h
recieve_s_1:    setb    scl_s   ;to start
data (bit) recieve from slave
        call    delay
        mov     c,sda_s
        rlc     a       ;rotate bit data to
acc
        clr     scl_s
        call    delay
        djnz    r6,recieve_s_1
        clr     c       ;for safe must set c
as low
        ret
;****** start condition of pcf8591
**********
start_a: setb   sda_a
        setb    scl_a
        call    delay
        clr     sda_a
        call    delay
        clr     scl_a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ret
;**** start condition of real time clock
*********
;output  sda,scl clear
start_s: setb    sda_s
        setb    scl_s
        call    delay
        clr     sda_s
        call    delay
        clr     scl_s
        ret
;******* stop condition of pcf8591
********
stop_a: clr     sda_a
        setb    scl_a
        call    delay
        setb    sda_a
        call    delay
        ret
;**** stop condition of real time clock ****
;output sda scl is high
stop_s: clr     sda_s
        setb    scl_s
        call    delay
        setb    sda_s
        call    delay
        ret
;***** build clock pulse of pcf8591
************
clkpulse_a:call  delay
        setb    scl_a
        call    delay
        clr     scl_a
        ret
;*** build clock pulse of real time clock
******
clkpulse_s:call  delay
        setb    scl_s
        call    delay
        clr     scl_s
        ret
;*************** delay
**********************
delay:  mov     r7,#00ch        ;each loop
        = 50usec
delay_1:        nop
        nop
        djnz    r7,delay_1
        ret
;***************** show time
*****************
show_time:      mov     22h,3fh ;send date
                call
        change_bcd_to_ascii
        mov     42h,23h
                mov     43h,24h
                mov     44h,#':'
                mov     22h,3dh ;send hour
                call
        change_bcd_to_ascii
        mov     45h,23h
                mov     46h,24h
                mov     47h,#':'
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                mov     22h,3ch ;send
minute
                call
        change_bcd_to_ascii
        mov     48h,23h
                mov     49h,24h
                mov     4ah,#':'
                mov     22h,3bh ;send
second
                mov     21h,3bh
                call
        change_bcd_to_ascii
        mov     4bh,23h
                mov     4ch,24h
                mov     4dh,#'P'
                mov     4eh,#'i'
                mov     4fh,#'n'
                mov     50h,#'g'
                mov     51h,#'!'
                mov     6eh,#02h
                ret
;****************** show temp
******************
show_temp:      mov     a,6eh
                cjne
        a,#01h,show_temp_11
                jmp     show_time
show_temp_11:   mov     a,53h
                anl     a,#11000000b
                jnz     check_100
                mov     46h,#' '
                jmp     show_temp_1
check_100:      mov     a,54h
                cjne    a,#00h,not_100
                mov     a,55h
                cjne    a,#00h,not_100
                mov     46h,#'1'
                jmp     show_temp_1
not_100:        mov     46h,#' '
                mov     5ah,64h
                mov     5bh,65h
                mov     5ch,66h
                mov     5dh,67h
                mov     68h,#08h
                call    average
                mov     54h,5fh
                mov     55h,60h
                mov     56h,61h
                mov     57h,62h
                call    drive_heater
                call    dac
show_temp_1:    mov     a,54h
                add     a,#30h
                mov     54h,a
                mov     a,55h
                add     a,#30h
                mov     55h,a
                mov     a,56h
                add     a,#30h
                mov     56h,a
                mov     a,57h
                add     a,#30h
                mov     57h,a
                mov     42h,#'*'
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                mov     43h,#'*'                        mov     4ah,#'p'
                mov     44h,#'*'                        mov     4bh,#' '
                mov     45h,#'*'                        mov     4ch,#'n'
                mov     47h,54h                         mov     4dh,#'o'
                mov     48h,55h                         mov     4eh,#'w'
                mov     49h,#'.'                        mov     4fh,#'!'
                mov     4ah,56h                         mov     50h,#' '
                mov     4bh,57h                         mov     51h,#' '
                mov     4ch,#60h                        mov     21h,3bh
                mov     4dh,#'C'                        ret
                mov     4eh,#'*'            ;****************** lcd display
                mov     4fh,#'*'            **************
                mov     50h,#'*'            loop:       jmp     check_sec_equal
                mov     51h,#'*'            loop_con:mov    a,3fh   ;move min to a for
                mov     21h,3bh             test
                mov     64h,#00h                        cjne
                mov     65h,#00h                    a,52h,loop_continue
                mov     66h,#00h                        mov     a,3bh   ;move sec
                mov     67h,#00h            to a
                mov     5eh,#0bh                        mov     b,#03
                mov     63h,#09h                        div     ab
                ret                                     mov     a,b
;****************** warning                            jz      time
******************                                      cjne    a,#01h,temp
warning:        mov     42h,#' '                        call    warning
                mov     43h,#' '                        jmp     loop_lcd_r_shf
                mov     44h,#'T'            loop_continue:  mov     a,3bh
                mov     45h,#'i'                        mov     b,#02
                mov     46h,#'m'                        div     ab
                mov     47h,#'e'                        mov     a,b
                mov     48h,#' '                        jz      time
                mov     49h,#'u'            temp:       call    show_temp
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;               call    check_water
                jmp     loop_lcd_r_shf
time:           call    show_time
loop_lcd_r_shf: call    lcd_r_shf
        ;right shift lcd display
                call    lcd_delay
                call    lcd_clr
                mov     lcd_addr,#000h
        ;set address 00h
                call    set_addr_lcd
                call    lcd_on
                mov     lcd_data,42h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,43h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,44h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,45h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,46h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,47h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,48h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,49h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_addr,#40h
                call    set_addr_lcd
                mov     lcd_data,4ah
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,4bh
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,4ch
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,4dh
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,4eh
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,4fh
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,50h
                call    wrchar_lcd
                mov     lcd_data,51h
                call    wrchar_lcd
loop_end:       call    lcd_home
                ret
;********** check for second is equal **********
;21h : old sec
check_sec_equal:        mov     a,3bh
                        cjne    a,21h,sec_not_equal
                        jmp     sec_is_equal
sec_not_equal:          jmp     loop_con
sec_is_equal:           jmp     loop_end
;********** change bcd to ascii **********
change_bcd_to_ascii:
                        push    acc
                        push    b
                        mov     a,22h
                        mov     b,a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                anl     a,#11110000b
                swap    a
                add     a,#30h
                mov     23h,a
                mov     a,b
                anl     a,#00001111b
                add     a,#30h
                mov     24h,a
                pop     acc
                pop     b
                ret
;write character to show on lcd
;i/p:    lcd_data
wrchar_lcd:     setb    lcd_rs
                mov     p0,lcd_data
                call    lcd_clk
                call    lcd_on
                ret
;lcd display on
lcd_on: clr     lcd_rs
        mov     p0,#00001100b
        call    lcd_clk
        ret
;set lcd address
;i/p: lcd_addr
set_addr_lcd:   clr     lcd_rs
                mov     a,lcd_addr
                setb    acc.7
                mov     p0,a
                call    lcd_clk
                ret
;lcd right shift display
lcd_r_shf:      clr     lcd_rs
                mov     p0,#00011100b
                call    lcd_clk
                ret
;initialize lcd
init_lcd:call   lcd_delay
                clr     lcd_rs
        mov     p0,#00111000b   ;8 bit
mode
                call    lcd_clk         ;pulse lcd
clock
                call    lcd_off ;let only display
off
                call    lcd_clr
                mov     p0,#00000110b
                call    lcd_clk
                call    lcd_home        ;return
home display
                ret
;lcd return home
lcd_home:       clr     lcd_rs
                mov     p0,#00000010b
                call    lcd_clk
                ret
;lcd clear display
lcd_clr: clr    lcd_rs
                mov     p0,#00000001b
                call    lcd_clk
                ret
;lcd only display off
lcd_off: clr    lcd_rs
                mov     p0,#00001000b
```

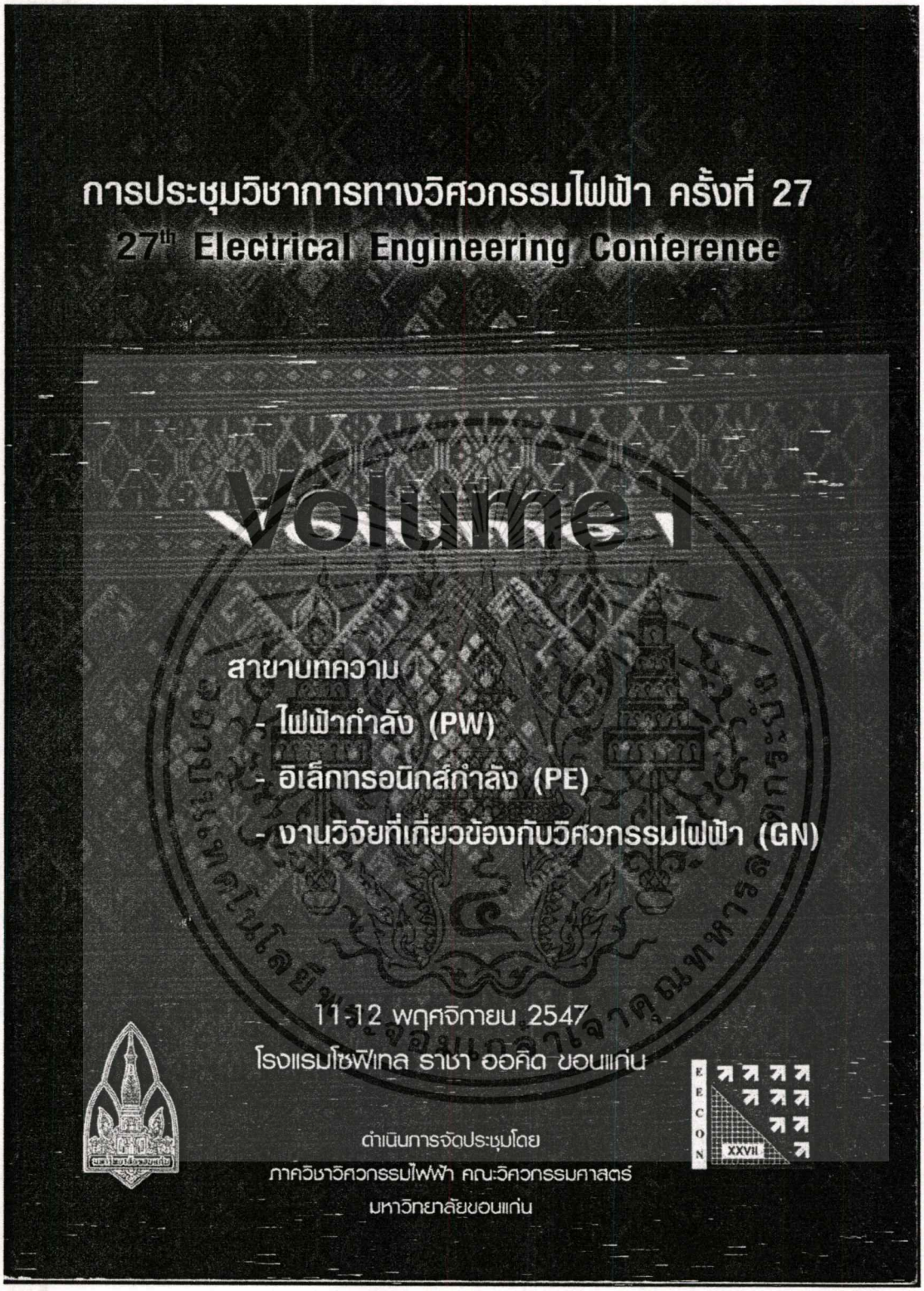
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                call    lcd_clk
                ret
;lcd clock
lcd_clk: setb   lcd_en
                call    lcd_delay
                clr     lcd_en
                call    lcd_delay
                ret
;lcd delay
lcd_delay:      mov     r7,#002
lcd_delay_1:    mov     r6,#0e6h
lcd_delay_2:    nop
                nop
                djnz    r6,lcd_delay_2
                djnz    r7,lcd_delay_1
                ret
;***************** finish ************
finish:
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดสอบการดูดซึมน้ำสำหรับฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน

Water Absorption Testset for Underground Cable Insulation

คุสิต คงจิตงาม ศักดิ์ชัย ตรีรัตน์พิจารณ์* ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ถ. เชื่อมสัมพันธ์ หนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการสร้างชุดทดสอบการดูดซึมน้ำของฉนวนสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการควบคุมอุณหภูมิของน้ำ,รักษาระดับน้ำ, ควบคุมเวลา,การเก็บข้อมูลและแสดงผล ชุดทดสอบนี้สามารถทดสอบชิ้นงานมาตรฐานได้ครั้งละ 30 ชิ้น และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 90 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาทดสอบ ชุดทดสอบนี้สามารถทำงานได้ต่อเนื่องแบบอัตโนมัติ ใช้งานสะดวก สามารถเก็บข้อมูลที่ได้ลงในหน่วยความจำ แสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ เป็นกราฟฟิก ผลการทำงานของชุดทดสอบสามารถทำงานสอดคล้องกับมาตรฐานกำหนด

คำสำคัญ : ฉนวนสายเคเบิล,การดูดซึมน้ำ,มาตรฐาน IEC 60502-2

Abstract

This paper presents a construction of underground cable insulation testset that is a testing water absorption topic follow IEC 60502-2 standard using microcontroller. The advantages of microcontroller are control temperature of water, control level of water, control timer, display graphic of data and record data. The maximum load to test in this research is 30 loads, and this testing can have constant temperature between 50- 90 ^{0}C in period of testing. This research can use automatic mode that is more convenince. Furthermore the testset can be recorded the memory and if can display data graphic on monitor. The result can show testing water absorption follow the IEC 60502-2 standard.

Keywords: Cable Insulation,Water absorption , IEC 60502-2 Standard

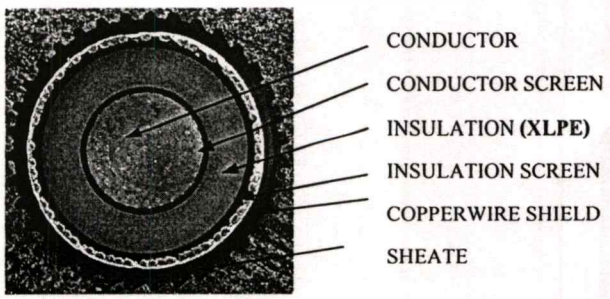
1. บทนำ

ในการออกแบบและใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน ในระบบไฟฟ้ากำลัง ต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของสายเคเบิล เพื่อยืนยันคุณภาพของสายทั้งทางไฟฟ้าและทางฟิสิกส์ [1] ซึ่งในหัวข้อการทดสอบหนึ่งที่สำคัญคือการทดสอบการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [2] เพื่อศึกษาลักษณะทางฟิสิกส์ของฉนวนสายเคเบิลซึ่งระบบทดสอบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้น มีการเก็บข้อมูลของสภาวะการทดสอบภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทดสอบ (เวลา, อุณหภูมิ, ระดับน้ำ) ด้วยการบันทึกข้อมูลโดยผู้ทดสอบหรือใช้งานร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูลและอุปกรณ์ต่อพ่วงจำนวนมาก ทำให้ไม่สะดวกและใช้งานยาก บทความนี้จึงทำการพัฒนาชุดทดสอบโดยการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมการทำงานของชุดทดสอบให้สามารถทำงานอัตโนมัติ เก็บข้อมูลและถ่ายโอนข้อมูลได้สะดวก แสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ เป็นกราฟฟิก เพื่อลดความผิดพลาดของขั้นตอนการทดสอบและแสดงผล

2. ทฤษฎี

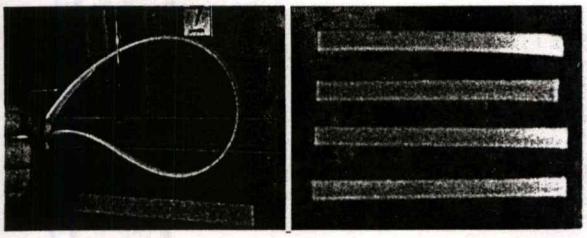
2.1 ข้อกำหนดการทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน IEC 60502-2

การทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฉนวน โดยการแช่ชิ้นฉนวนในน้ำที่มีอุณหภูมิคงที่ ไม่เกิน90 องศาเซลเซียส โดยเลือกอุณหภูมิทดสอบให้น้อยกว่าอุณหภูมิสูงสุดของสายเคเบิล ขณะใช้งานเต็มพิกัด อยู่ 5 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 14 วัน โดยนำสายเคเบิลเฉพาะเนื้อฉนวน XLPE ที่ต้องการทดสอบ ดังรูปที่ 1. มาทำการสไลค์ให้เป็นแผ่น มีขนาดโดยประมาณ กว้าง 4-5 มม. ยาว 80 -100 มม. หนา 0.6 - 0.9 มม. ดังรูปที่ 2. มาทำการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 1. โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2. ตัวอย่างฉนวนของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

2.2 การคำนวณหากำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์

การคำนวณหากำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์ที่เหมาะสมต่อการปรับอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ทดสอบ ในหม้อทดสอบเป็นไปตามสมการที่ (1) [3]

$$P = \frac{DVc\Delta T}{\Delta t} \qquad (1)$$

โดยที่

P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW)

D คือ ความหนาแน่นของน้ำ (1 kg/dm^3)

V คือ ปริมาตรของน้ำที่ใช้ (dm^3)

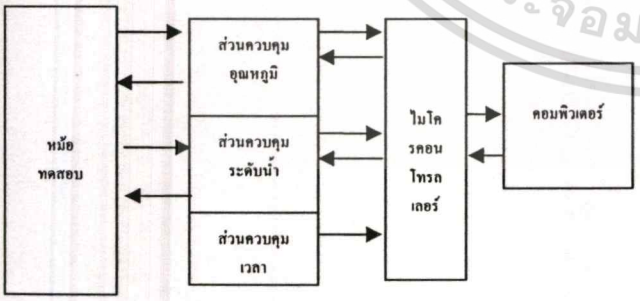
c คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ (4.18 kJ/kg-K)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ต้องการให้เพิ่มขึ้น (°C)

Δt คือ ระยะเวลาที่ต้องการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงจุดที่ต้องการ

3. การออกแบบ

การออกแบบชุดทดสอบเพื่อให้ครอบคลุมเงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐานที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3. สามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้ คือ หม้อทดสอบ,ส่วนควบคุมอุณหภูมิ,ส่วนควบคุมระดับน้ำ,ส่วนควบคุมเวลา,ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์สำหรับการสั่งงานและแสดงผล



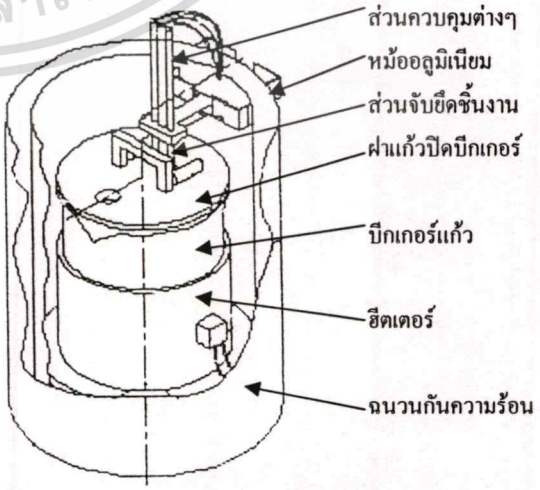
รูปที่ 3. ไดอะแกรมการทำงานของชุดทดสอบฉนวน

3.1 ขั้นตอนการทำงานของชุดทดสอบ

โดยหลักการทำงานของชุดทดสอบ เริ่มจากป้อนข้อมูลอุณหภูมิที่จะทำการทดสอบในคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นคอมพิวเตอร์จะสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการควบคุมฮีตเตอร์เพื่อปรับอุณหภูมิของน้ำให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการภายในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วทำการรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ในขณะทดสอบจะมีชุดควบคุมให้ระดับน้ำในบีกเกอร์ของหม้อทดสอบมีปริมาตรคงที่ตลอดเวลาโดยอัตโนมัติ แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ทำการทดสอบลงในหน่วยความจำ (24LC256) เมื่อครบเวลาที่กำหนดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการปรับลดอุณหภูมิลง จนถึงอุณหภูมิปกติ แล้วทำการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำเข้าสู่คอมพิวเตอร์ และแสดงผลอุณหภูมิที่ทำการทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด โดยแสดงผลเป็นกราฟฟิก,หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแล้วไปทำการทดสอบหัวข้อการทดสอบอื่นต่อไป

3.2 หม้อทดสอบ

เลือกใช้โครงสร้างภายนอกของหม้อทดสอบเป็นทรงกระบอกสูง 36 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน/ภายนอก 18/23 ซม. ชนิดวัสดุอลูมิเนียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และทำการบุใยแก้วเป็นฉนวนกันความร้อนภายในโดยรอบ โครงสร้างภายในใช้บีกเกอร์แก้วทนความร้อน มีแผ่นแก้วเป็นฝาปิด โดยตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 ซม. พร้อมทั้งเจาะรูสำหรับใส่ส่วนจับยึดชิ้นงาน เป็นภาชนะในการทดสอบ เนื่องจากแก้วจะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ โดยเลือกใช้บีกเกอร์ใส่น้ำในการแช่ชิ้นงานทดสอบขนาดปริมาตร 2 ลิตร ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 13 ซม. สูง 19 ซม. ใช้หลอดแก้วทนความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มม. ยาว 10 ซม.ในการแยกชิ้นงานไม่ให้สัมผัสกันขณะทดสอบ นำชิ้นงานที่จะทำการทดสอบใส่ไว้ด้านในหลอดแก้ว และนำหลอดแก้วนี้มาวางเรียงไว้บนส่วนจับยึดชิ้นงานสามารถวางหลอดแก้วในการทดสอบชิ้นงานได้ครั้งละ 30 ชิ้น เลือกใช้ฮีตเตอร์ขนาด 600 W. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13.2 ซม. สูง 10 ซม. โดยฮีตเตอร์นี้จะมีฉนวนกันความร้อนหุ้มอยู่รอบนอก เพื่อการรักษาอุณหภูมิไม่ให้ถ่ายเทไปนอกระบบและเพื่อความปลอดภัยในขณะสัมผัสโดนหม้อทดสอบ ดังรูปที่ 4.

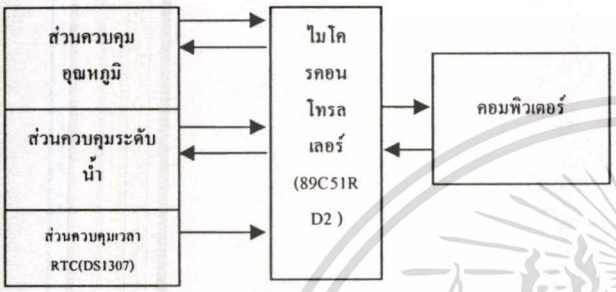


รูปที่ 4. โครงสร้างของหม้อทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์

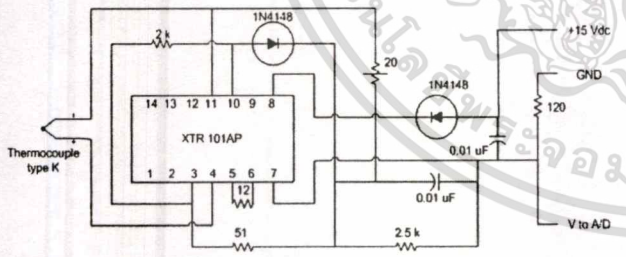
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (89C51RD2) ดังรูปที่ 5. ในการรับส่งข้อมูลกับคอมพิวเตอร์และควบคุมการทำงานของชุดทดสอบทั้งระบบ โดยทำการรับสัญญาณอะนาลอก 0-5 โวลต์ จากชุดตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล จากนั้นทำการประมวลผลอุณหภูมิ และทำการแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-5 โวลต์ ให้กับวงจรควบคุมแรงดันกระแสสลับ ในการปรับมุมเฟสของแรงดันให้กับฮีตเตอร์ เพื่อการรักษาอุณหภูมิให้คงที่



รูปที่ 5. ไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.4 ส่วนควบคุมอุณหภูมิ

การตรวจวัดอุณหภูมิใช้ เทอร์โมคัปเปิล Type K เนื่องจากสัญญาณแรงดันที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีสัญญาณไม่มาก จึงทำการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ชดเชยและขยายสัญญาณ (XTR101AP) ดังรูปที่ 6. ซึ่งสามารถให้ความละเอียดในการวัดสูงและมีย่านการใช้งานที่กว้าง ความเพี้ยนต่ำ



รูปที่ 6. วงจรชดเชยและขยายสัญญาณของการตรวจวัดอุณหภูมิ

3.5 ส่วนควบคุมระดับน้ำอัตโนมัติ

เลือกใช้แท่งอิเล็กโทรดร่วมกับวาล์วควบคุมระดับน้ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนต่ออุณหภูมิสูง และไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำที่ใช้ทดสอบ โดยเมื่อระดับน้ำในบีกเกอร์ลดลงอันเนื่องมาจากการระเหยในขณะทำการทดสอบ วงจรควบคุมระดับน้ำจะทำการส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้วาล์วควบคุมระดับน้ำทำงานปล่อยน้ำในถังพักน้ำสำรองลงบีกเกอร์อย่างอัตโนมัติ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้อุณหภูมิขณะทดสอบเปลี่ยนแปลง

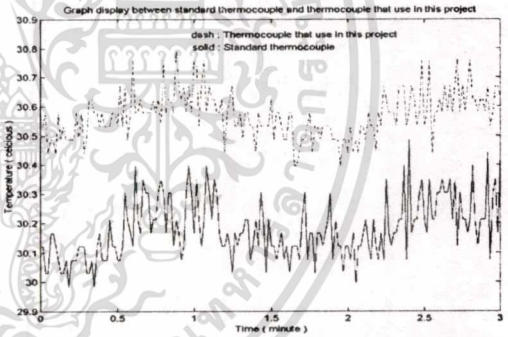
3.6 ส่วนควบคุมเวลา

การออกแบบฐานจริงเวลาเลือกใช้ RTC(DS1307) ในการบอกเวลาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ทราบถึงระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทดสอบให้ถูกต้องตามมาตรฐานกำหนดแบบอัตโนมัติ (14 วัน) [2] โดยจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับเวลา ที่ละเอียดถึงหลัก วินาที สามารถปรับวันเดือนปีให้ตรงตามปฏิทินได้อย่างถูกต้องตลอด 24 ชั่วโมง

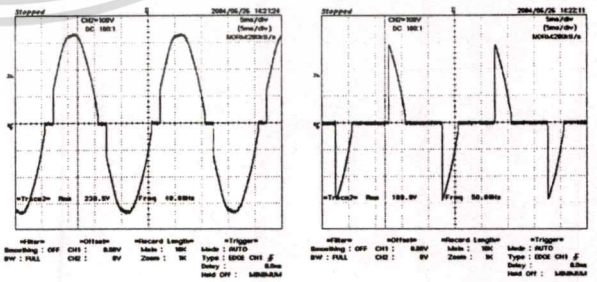
4. การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1. ผลการทดสอบส่วนต่างๆของชุดทดสอบ

ในรูปที่ 7. การทดสอบการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลของชุดทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดมีความไวในการตรวจจับอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันในด้านอัตราการขยายสัญญาณเล็กน้อย อุณหภูมิจะแตกต่างกันประมาณ 0.4 องศาเซลเซียส รูปที่ 8.(ก) สัญญาณควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์จากชุดเฟสคอนโทรลในขณะเริ่มทำงานการทำงานที่อุณหภูมิห้อง รูปที่ 8.(ข) สัญญาณควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์ในขณะที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 85 องศาเซลเซียสเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วจะต้องทำการรักษาสภาวะแรงดันให้คงที่ไว้ที่ค่าหนึ่งเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ต้องการ



รูปที่ 7. ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก Analyser Recorder ของเทอร์โมคัปเปิลชุดทดสอบเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน



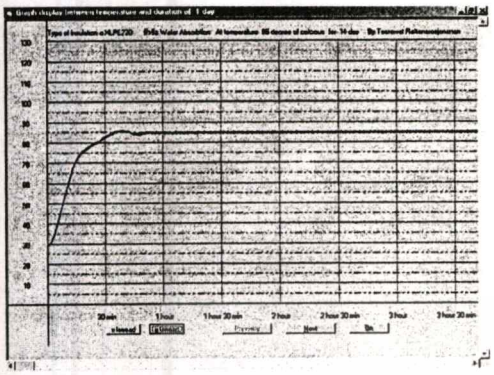
(ก) (ข)

รูปที่ 8. สัญญาณเฟสคอนโทรลที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์

กราฟแสดงผลอุณหภูมิการทดสอบฉนวนที่ได้จากชุดทดสอบโดยตั้งค่าการทดสอบไว้ที่ 85 องศาเซลเซียส ± 2 องศาเซลเซียส [2] จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิจะเข้าสู่สภาวะคงที่ และมีการกระเพื่อมของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่าง 83.6 – 85.4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดตลอดการทดสอบ ดังรูปที่ 9.



รูปที่ 9. กราฟการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 85 องศาเซลเซียส

4.2. ขั้นตอนในการทดสอบการดูดซึมน้ำของฉนวน

นำชิ้นส่วนตัวอย่างใส่ในหลอดแก้วทนความร้อนแล้วนำมาวางเรียงกันที่ส่วนจับยึดชิ้นงานในบีกเกอร์ในหม้อทดสอบ เติมน้ำที่ผ่านการลดประจุหรือน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 2 ลิตร ควบคุมชุดทดสอบให้มีอุณหภูมิทดสอบตามมาตรฐานกำหนด เป็นระยะเวลา 14 วัน เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด ให้ทำการลดอุณหภูมิของชิ้นส่วนตัวอย่างกลับสู่อุณหภูมิปกติ โดยการนำไปแช่ในน้ำลดประจุหรือน้ำกลั่นประมาณ 1 ชม. แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผลเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการทดสอบ [2]

4.3. ผลการทดสอบฉนวน

การทดสอบชิ้นส่วนฉนวนตัวอย่างของชุดทดสอบที่จัดสร้างเปรียบเทียบชุดทดสอบมาตรฐาน พบว่ามีค่าความแตกต่างไม่มาก ซึ่งค่าที่ได้ยังอยู่ในช่วงของมาตรฐาน ดังตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของฉนวนระหว่างชุดทดสอบที่จัดสร้างและชุดทดสอบมาตรฐาน

12/20(24) kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheated						
ขนาดของสายตัวนำ (ตร.มม.)	ชุดทดสอบที่จัดสร้าง			ชุดทดสอบมาตรฐาน		
	นน.ก่อนทำการทดสอบ (กรัม)	นน.หลังทำการทดสอบ (กรัม)	ค่าความแตกต่าง (กรัม)	นน.ก่อนทำการทดสอบ (กรัม)	นน.หลังทำการทดสอบ (กรัม)	ค่าความแตกต่าง (กรัม)
70	0.3724	0.3735	0.0011	0.3750	0.3757	0.0007
120	0.3110	0.3129	0.0009	0.3389	0.3398	0.0009
240	0.3943	0.3947	0.0004	0.3518	0.3525	0.0007
400	0.3422	0.3430	0.0008	0.3420	0.3431	0.0011

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบผลการทำงานของชุดทดสอบพบว่าสามารถทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ต้องการได้โดยอัตโนมัติ มีความสะดวกในการใช้งานและเก็บผลการทดสอบได้ตลอดระยะเวลาการทดสอบจริง ถ่ายโอนข้อมูลและแสดงผลของอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการทดสอบผ่านจอคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 9. และผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างชุดทดสอบที่จัดสร้างและชุดทดสอบมาตรฐาน ผลของการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมาตรฐานมีผลการทดสอบใกล้เคียงกันคือมีน้ำหนักที่แตกต่างไปจากก่อนทดสอบน้อยกว่า 1 มก. ดังตารางที่ 1. และผลโดยรวมทั้งการทดสอบจากชุดทดสอบและการทดสอบจากชุดทดสอบมาตรฐานยังอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

ชุดทดสอบการดูดซึมน้ำสำหรับฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน ที่ได้จัดสร้างนี้สามารถทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 และสามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมเงื่อนไขการทำงานได้ทั้งหมด อนาคตสามารถลดการนำเข้าอุปกรณ์ทดสอบจากต่างประเทศที่มีราคาแพงและรองรับการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลตามมาตรฐานได้

เอกสารอ้างอิง

[1] G.F. Moore, Electric Cables Handbook, BSP Professional Books,1997, p.50.

[2] IEC No.60502–2 (Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (U_m =1, 2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV)).

[3] Temperature sensor & Heater Catalog, แผนกระบบอุณหภูมิ , บริษัท เทคโนโลยีอินสตรูเมนท์ จำกัด

ดุสิต คงจิตงาม จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศักดิ์ชัย ตรีรัตน์พิจารณ์ ปัจจุบันทำงานตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สาขางานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและเล็กทรอนิกส์กำลัง

รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งการออกแบบและควบคุมระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายดุสิต คงจิตงาม เกิดเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2520 ที่อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2542 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงสาขาไฟฟ้ากำลังจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ และประกาศนียบัตรวิชาชีพ จากวิทยาลัยเทคนิค นครศรีธรรมราช

ปี พ.ศ.2542	ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ปี พ.ศ.2543	ทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย
ปี พ.ศ.2544	ถึงปัจจุบัน ประกอบธุรกิจส่วนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้