สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV เพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง

The Study and Design of Underground Cable up to 24 kV deal with mechanical strength determination of installed cables.

T104091

นายชินวัฒน์ ปรีดากิตติพัฒน์
นายสุรเมตต์ ช่วยท้าว
นางสาวสุวพี ก้อนจันทร์เทศ
นายเสกสรรค์ แสนนิทา

เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 104091
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2552
b..........
i..........

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV เพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง

ผู้จัดทำ

1. นายชินวัฒน์ ปรีดากิตติพัฒน์
2. นายสุรเมตต์ ช่วยท้าว
3. นางสาวสุวพี ก้อนจันทร์เทศ
4. นายเสกสรรค์ แสนนิทา

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.นรเศรษฐ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV เพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง

นายชินวัฒน์ ปรีดากิตติพัฒน์
นายสุรเมตต์ ช่วยท้าว
นางสาวสุวพี ก้อนจันทร์เทศ
นายเสกสรรค์ แสนนิทา
ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV. เพื่อแก้ปัญหาจากการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง โดยใช้ลักษณะมิติของสายเคเบิลพิกัดแรงดันสูงสุด 24 kV. ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดงขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร ชนิด CU/XLPE/PE เป็นข้อกำหนดเบื้องต้น และได้ทำการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินต้นแบบขึ้นมา และทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงความร้อนของสายเคเบิลใต้ดินต้นแบบด้วยโครงสร้างสองมิติ และทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลด้วยโครงสร้างสามมิติ เมื่อสายเคเบิลใต้ดินได้รับแรงทางกลในลักษณะต่าง ๆกัน ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิลต้นแบบจะต้องมีค่าไม่มากกว่าเคเบิลเดิม

ผลจากการจำลองพบว่าในการพิจารณาทางความร้อน สายที่ได้ทำการออกแบบจะมีการระบายความร้อนที่ดีขึ้น และชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาทางกล พบว่าจะมีความเครียดเฉลี่ยภายในสายต่ำกว่าสายที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study and Design of Underground Cable up to 24 kV deal with mechanical strength determination of installed cables.

Mr. Chinnawat	Preedakrittipat	
Mr. Suramate	Chaewtow	
Ms. Suwaphee	Konchanthet	
Mr. Seksan	Sannita	
Asst. Prof. Norasage	Pathanadech	Advisor
2008		

ABSTRACT

This project represents the study and design of underground cable up to 24 kV to deal with mechanical strength determination of installed cables. The dimension of CU/XLPE/PE underground cable with maximum system voltage 24 kV, 240 square millimeter cross-section area, is used as the litimation of cable prototype structure. The prototype cable was designed and studied in thermal and mechanical characteristics by using 2 and 3 Dimension Finite Element technique respectively in the condition of constance electric field strength compared with that of the conventional under ground cable.

The simulation results show that it has good characteristic in heat transfer which be obviously observed when carrying heavy load. The average mechanical stress of the designed cable is also lower than that of the conventional underground cable.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือเป็นอย่างดี จากหลายๆฝ่าย

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ศาสตราจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ช่วยชี้แนะให้คำปรึกษารวมถึงวิชาการความรู้ต่าง ๆที่ได้สอนแก่คณะผู้จัดทำโครงงานวิศวกรรม ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา และค้นคว้าหาข้อมูลเพื่อจัดทำโครงงานโดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย รวมถึงตรวจสอบและแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ต่อผู้จัดทำโครงงาน ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำมาใช้ในการจัดทำโครงงานครั้งนี้ และขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษาและจัดทำโครงงานวิศวกรรม และเป็นสถานที่รวมสมาชิกในกลุ่มเพื่อทำงานและปรึกษางานต่าง ๆจนสำเร็จลุล่วงไปได้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) คุณเซรษฐา รัตนพันธ์ และ คุณสงกรานต์ ศิริเดชาชัย ที่ให้ความรู้ทางด้านการใช้งานโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม (ไฟไนต์เอลิเมนต์) และให้คำแนะนำที่ดีตลอดมา

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิ้ล จำกัด (มหาชน) คุณสาธิต ไกรระภี และเจ้าหน้าที่ฝ่ายตรวจสอบคุณภาพและห้องทดสอบ ที่ให้ความรู้ทางด้านกระบวนการผลิตและทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน รวมถึงโอกาสที่ให้คณะผู้จัดทำโครงงานได้มีส่วนร่วมในการผลิตและทดสอบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV ตลอดจนเป็นส่วนหนึ่งในการให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีตลอดมา

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนสายสายเคเบิลใต้ดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดง 240 mm^2 ความยาวสาย 50 เมตร ที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV เพื่อให้คณะผู้จัดทำได้เกิดการเรียนรู้ในการทดสอบ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณศานิต สมบูรณ์ เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 2 ที่ให้ความรู้ทางด้านงานซ่อมบำรุงสายเคเบิลใต้ดิน และข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อการจัดทำโครงงานปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ อีกทั้งยังเป็นส่วนหนึ่งในการให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำที่ดีตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่กองวิจัย กองแผนที่ระบบไฟฟ้า กองโครงการพิเศษ กองอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำนักงานใหญ่ บางเขน ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงงานวิศวกรรมครั้งนี้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณเพทาย นิ่มสนอง คุณภูชิต ถึงสุข และคุณอภิชาต นิ่มเทียน รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทและอีกหลายๆท่านที่มิได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษาในเรื่องการทำโครงงานวิศวกรรมเป็นอย่างดี และช่วยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา อีกทั้งขอบคุณเพื่อนร่วมงานและสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมแรงสูงทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน และคอยให้กำลังใจในการทำงานเสมอจนกระทั่งโครงงานวิศวกรรมสามารถสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มิได้กล่าวถึง ที่คอยสนับสนุนทางด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงคอยให้กำลังใจที่ดีในทุกๆเรื่อง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ V

สารบัญรูปภาพ X

สารบัญตาราง XIV

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 7

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย 8

1.4 ตารางแสดงแผนงานวิจัย 8

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย 9

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 10

2.1 สายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) 10

2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน 10

2.2.1 ตัวนำ (Conductor) 11

2.2.2 Conductor Screen 12

2.2.3 Insulation (ฉนวน) 12

2.2.4 Insulation Screen 12

2.2.5 Metallic Screen 12

2.2.6 Reinforcement หรือ Armour 13

2.2.7 Water Blocking Tape 13

2.2.8 Laminated Sheath 13

2.2.9 Non Metallic Sheath (Jacket) 13

2.2.10 Protective tape 13

2.3 Characteristics of Cable Materials 14

2.3.1 โลหะตัวนำ 14

2.3.2 วัสดุกึ่งตัวนำ (Semi conductive) 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.3 วัสดุฉนวน 15

2.3.3.1. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) 15

2.3.3.2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) 17

2.3.4 ฉนวน XLPE 18

2.3.4.1 การเปลี่ยนฉนวน PE เป็น XLPE 19

2.3.4.1.1 วิธี Steam Cure 19

2.3.4.1.2 วิธี Dry Cure 20

2.4 ส่วนประกอบของระบบเคเบิลใต้ดิน 22

2.4.1 รูปแบบการก่อสร้าง 22

2.4.1.1 แบบเปิดหน้าดิน 22

2.4.1.1.1 กลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต 22

2.4.1.1.2 ร้อยท่อฝังดิน 24

2.4.1.1.3 ฝังดินโดยตรง 26

2.4.1.2 แบบไม่เปิดหน้าดิน 28

2.4.1.2.1 Pipe Jacking 28

2.4.1.2.2 Horizontal Directional Drilling(HDD) 30

2.4.2 บ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (Manhole and Handhole) 32

2.5 การเลือกขนาดสายเคเบิลใต้ดิน 32

2.6 แรงดึงในสายเคเบิลใต้ดิน (Pulling Tensions) 34

2.6.1 ข้อจำกัดของการออกแบบในการติดตั้ง 34

2.6.1.1 แรงดึงในสายเคเบิลใต้ดิน 34

2.6.1.2 การลากสายเคเบิลใต้ดิน 34

2.6.1.2.1 ใช้พูลลิ่งอาย 34

2.6.1.2.2 ใช้พูลลิ่งกริป 36

2.6.1.3 สำหรับสายเคเบิลใต้ดินชนิด โคแอ๊คเชียล
ไทรแอ๊คเชียล และชนิดพิเศษอื่นๆ 37

2.6.1.4 แรงกดด้านข้าง 37

2.6.1.5 Jam ratio หรือเรียกว่า Jamming 38

2.6.1.6 การโค้งงอของสายเคเบิลใต้ดิน 39

2.7 การดึงสายเคเบิล 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8 ความปลอดภัยในการปฏิบัติงานระบบเคเบิลใต้ดิน	42
2.9 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน	43
2.10 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60520-2	43
2.11 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดินที่ดำเนินการโดยโรงงานผู้ผลิต	44
2.11.1 การทดสอบแบบเฉพาะหรือการทดสอบรับรอง (Type Test)	44
2.11.2 การทดสอบประจำ (Routine Tests)	48
2.11.3 การทดสอบตัวอย่าง (Sample Tests)	58
2.12 Repetition of tests	61
2.13 พิกัดแรงดันที่ใช้ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC 60502	61
2.14 ไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น	61
2.14.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วย FEM	62
2.14.2 เอลิเมนต์	62
บทที่ 3 การออกแบบและแนวทางการออกแบบ	65
3.1 ตัวนำ	65
3.2 ฉนวน XLPE (Cross-linked polyethylene)	69
3.3 Screening	70
3.3.1 Conductor Screen	70
3.3.2 Insulation Screen	70
3.4 Metallic Screen	70
3.5 Oversheath หรือ Jacket	71
3.6 การออกแบบสายเคเบิล	72
3.7 แบบจำลองโครงสร้างสายเคเบิล	73
3.7.1 การจำลองโครงสร้างสายเคเบิล	73
3.7.2 การใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 เบื้องต้น	76
3.7.2.1 การนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรม	76
3.7.3 การจำลองทางด้านไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	79
3.7.4 การจำลองทางความร้อนโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	83
3.7.4.1 การคำนวณหาค่า Heat Source ในหน่วย W/m^3	87
3.7.5 การจำลองทางกลโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการออกแบบ 94
4.1 ผลการออกแบบเมื่อพิจารณาทางด้านไฟฟ้า 96
4.2 ผลการออกแบบเมื่อพิจารณาทางด้านความร้อน 104
4.2.1 เมื่อมีอากาศเป็นตัวกลางในการพาความร้อน 105
4.2.2 เมื่อมีน้ำเป็นตัวกลางในการพาความร้อน 112
4.2.3 พิจารณาค่ากระแสของสายเคเบิล 116
4.3 ผลการออกแบบเมื่อพิจารณาทางกล 117
4.3.1 ผลการดึงปลายสายเคเบิล 118
4.3.2 ผลจากการโค้งงอของสาย 119
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการออกแบบ 120
5.1 การวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดความเสียหายต่อสายเคเบิล 120
5.1.1 วิเคราะห์สาเหตุที่เกิดจากสายเคเบิล 120
5.1.2 วิเคราะห์สาเหตุที่เกิดจากการติดตั้งและวางสายเคเบิล 120
5.1.2.1 ชำรุดก่อนการติดตั้ง 120
5.1.2.2 ชำรุดเนื่องจากการติดตั้ง 121
5.1.3 วิเคราะห์สาเหตุที่เกิดจากสภาพแวดล้อม
ที่บริเวณบ่อพักสายเคเบิล (Man Hole) 121
5.2 สรุปผลการออกแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 122
5.2.1 ผลทางไฟฟ้า 122
5.2.2 ผลทางความร้อน 123
5.2.2.1.เมื่อมีอากาศเป็นตัวพาความร้อน 124
5.2.2.2.เมื่อมีน้ำเป็นตัวพาความร้อน 124
5.2.2.3.เมื่อมีการพิจารณาค่ากระแส 124
5.2.3 ผลทางกล 125
5.2.3.1 ความเครียดที่เกิดจากการดึงปลายสายเคเบิล 126
5.2.3.2 ความเครียดที่เกิดจากการโค้งงอสายเคเบิล 126
5.3 ความเป็นไปได้ในการผลิตสายเคเบิลที่ได้ออกแบบใหม่ 126
5.4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 129
เอกสารอ้างอิง 130
ภาคผนวก 131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก ข้อมูลบริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิ้ล จำกัด(มหาชน) 132
ภาคผนวก ข ข้อมูลบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด 155
ภาคผนวก ค ตารางแสดงค่าต่างๆที่ใช้ในการออกแบบ 159
และทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
ภาคผนวก ง การประยุกต์ใช้งานสายเคเบิล 165
ประวัติผู้เขียน 173

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 การใช้งานสายเคเบิลแรงสูงในปัจจุบัน 1

รูปที่ 1.2 การปรับปรุงภูมิทัศน์ด้วยการเดินสายเคเบิลใต้ดินในระบบส่งจ่าย แทนสายเดินในอากาศ บริเวณหน้าอาคารไอบีเอ็ม ถนนพหลโยธิน 2

รูปที่ 1.3 การปรับปรุงภูมิทัศน์ด้วยการเดินสายเคเบิลใต้ดินแทนสายเดินในอากาศ 3

รูปที่ 1.4 สายเคเบิลใต้ดินภายในบ่อพักสาย (Man Hole) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการติดตั้งภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม 4

รูปที่ 1.5 จุดที่เกิดเหตุการณ์ Trip ภายในบ่อ Man Hole 4

รูปที่ 1.6 สายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุดเมื่อได้ทำการติดตั้งสายภายใน Duct Bank 5

รูปที่ 1.7 สายเคเบิลใต้ดินที่เกิดการระเบิด 5

รูปที่ 1.8 สภาพแวดล้อมบริเวณบ่อพักสายเคเบิลที่ไม่เหมาะสม 6

รูปที่ 1.9 บริเวณบ่อพักสายเคเบิลปกติ 7

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV . 11

รูปที่ 2.2 การผลิตสายเคเบิลโดยวิธี Vertical Continuous Valcanization (VCV) 21

รูปที่ 2.3 การผลิตสายเคเบิลใต้ดินโดยวิธี Catenary Continuous Valcanization (CCV) 22

รูปที่ 2.4 Concrete Encased Duct Bank และวิธีจัดวางก่อนเทคอนกรีต 24

รูปที่ 2.5 ร้อยท่อฝังดิน (Semi – Direct Burial) 25

รูปที่ 2.6 Concrete Spacer Block และลักษณะการใช้งาน 26

รูปที่ 2.7 การฝังดินโดยตรง (Direct Burial) 27

รูปที่ 2.8 รูปจำลอง Pipe Jacking ผ่านใต้ถนน และ การ Pipe Jacking 29

รูปที่ 2.9 Pipe Jacking Machine 30

รูปที่ 2.10 Horizontal Directional Drilling (HDD 31

รูปที่ 2.11 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน ภายในท่อร้อยสาย 36

รูปที่ 2.12 แรงดึงที่เกิดขึ้นจากการดึงสายเคเบิล 37

รูปที่ 2.13 แรงกดด้านข้าง 38

รูปที่ 2.14 การโค้งงอของสายเคเบิลใต้ดิน 40

รูปที่ 2.15 การหาค่า Weight - Correction Factor (C) ของสายเคเบิลใต้ดิน 2 เส้น 41

รูปที่ 2.16 การโค้งงอสายเคเบิล 45

รูปที่ 2.17 การทดสอบความทนทานไฟฟ้าหลังจากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.18 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก	46
รูปที่ 2.19 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ	46
รูปที่ 2.20 การวัดค่าความต้านทานของตัวนำทองแดง	49
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบ	51
รูปที่ 2.22 การปอกสายเคเบิลเพื่อทำการทดสอบ	52
รูปที่ 2.23 หัวต่อสายเคเบิลประกอบเข้ากับสายเคเบิล	54
รูปที่ 2.24 การต่อปลายสายเคเบิลภายในหัวต่อสายชนิดน้ำมัน	54
รูปที่ 2.25 วงจรพื้นฐานสำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน	55
รูปที่ 2.26 รูปวงจรการทดสอบ PD	56
รูปที่ 2.27 ค่า PD ที่ได้จากการทดสอบ	57
รูปที่ 2.28 สัญญาณ PD ที่วัดได้	57
รูปที่ 2.29 ค่าแรงดันที่ป้อน เพื่อทดสอบ AC Withstand	58
รูปที่ 2.30 การวัดความหนาฉนวนและชั้นเครื่องป้องกันตัวนำและฉนวน	59
รูปที่ 2.31 ชิ้นตัวอย่างในการนำมาตรวจสอบขนาดความหนา	59
รูปที่ 2.32 การทดสอบ HOT SET TEST	60
รูปที่ 2.33 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 1 มิติ และ 2 มิติ	62
รูปที่ 2.34 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ	63
รูปที่ 2.35 ตัวอย่าง mesh 2 มิติ	63
รูปที่ 2.36 ตัวอย่าง mesh 3 มิติ	64
รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายเคเบิลในสองมิติ	74
รูปที่ 3.2 โครงสร้างสายเคเบิลในสามมิติ	75
รูปที่ 3.3 โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3	76
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการนำไฟล์ที่ออกแบบเข้าสู่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	77
รูปที่ 3.5 เลือกฟังก์ชั่นการใช้งานในการพิจารณาทางด้านไฟฟ้า	79
รูปที่ 3.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางด้านไฟฟ้า	80
รูปที่ 3.7 การกำหนด (Subdomain Settings) ในการพิจารณาทางด้านไฟฟ้า	80
รูปที่ 3.8 การกำหนด Boundary Settings ทางไฟฟ้าของสาย	81
รูปที่ 3.9 เลือกฟังก์ชั่นการใช้งานในการพิจารณาทางความร้อน	83
รูปที่ 3.10 การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางความร้อน	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.11 การกำหนด (Subdomain Settings) ในการพิจารณาทางความร้อน 84

รูปที่ 3.12 การกำหนด Boundary Settings ทางความร้อน 85

รูปที่ 3.13 รูปแบบตัวอย่างการกำหนดค่าขณะมีการป้อนแรงในการดึงปลายสายเคเบิล 89

รูปที่ 3.14 รูปแบบตัวอย่างการกำหนดค่าขณะมีการป้อนแรงในการโค้งงอสายเคเบิล 89

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างแบบจำลองของสายเคเบิลที่ได้ที่มีผลิตใช้ในปัจจุบัน 89

รูปที่ 3.16 ตัวอย่างแบบจำลองของสายเคเบิลที่ออกแบบ 90

รูปที่ 3.17 การเลือกฟังก์ชั่นการใช้งานในการพิจารณาทางกล 90

รูปที่ 3.18 การกำหนด (Subdomain Settings) ในการพิจารณาทางกล 91

รูปที่ 3.19 การกำหนด (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางกล 91

รูปที่ 3.20 การกำหนด (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางกล 92

รูปที่ 3.21 การกำหนด (Edge Settings) ในการพิจารณาทางกล 92

รูปที่ 3.22 การกำหนด (Point Settings) ในการพิจารณาทางกล 93

รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV 95

รูปที่ 4.2 การตี Mash โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 96

รูปที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 97

รูปที่ 4.4 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 98

รูปที่ 4.5 เส้นระดับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 99

รูปที่ 4.6 ทิศทางการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล 100

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล 101

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน
ระหว่าง Copper Tape และ Copper Wire 102

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลใต้ดิน
ระหว่าง Copper Tape และ Copper Wire 103

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาเนื้อฉนวนของสายกับ
ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 104

รูปที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 105

รูปที่ 4.12 เส้นระดับของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 106

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอุณหภูมิในสายเคเบิล 107

รูปที่ 4.14 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 ทิศทางการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 109

รูปที่ 4.16 กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 110

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายนอกสายและความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย โดยเปรียบเทียบระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ออกแบบ 111

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาของอากาศตั้งแต่ 1-100 $W/(m^2.K)$ และความร้อนที่เกิดภายในสาย 111

รูปที่ 4.19 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 112

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงอุณหภูมิในสายเคเบิล 113

รูปที่ 4.21 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 114

รูปที่ 4.22 กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล 115

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำตั้งแต่ 500-10,000 $W/(m^2.K)$ และความร้อนที่เกิดภายในสาย 116

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนที่เกิดจากกระแสและความร้อนที่เกิดภายในสาย 116

รูปที่ 4.25 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลเมื่อถูกแรงดึงที่ปลายสาย 118

รูปที่ 4.26 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลเมื่อถูกโค้งงอสาย 119

รูปที่ 5.1 แผนผังกระบวนการผลิตสายเคเบิล 127

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดงขนาด 240 mm^2 128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

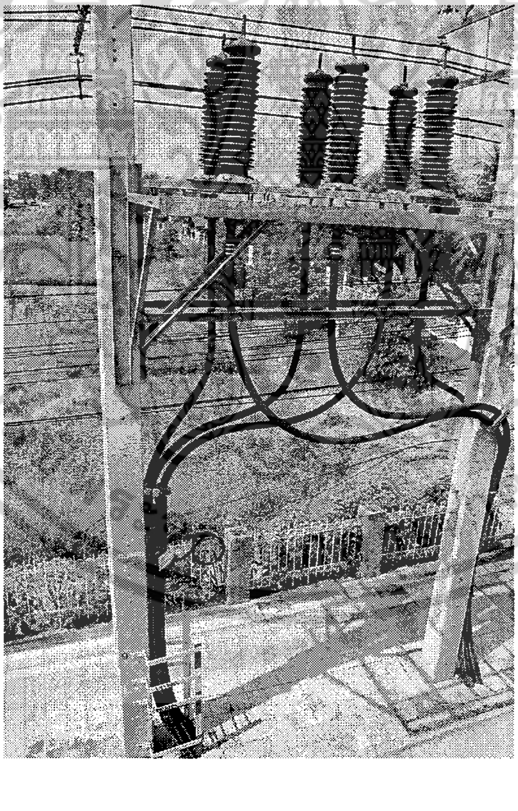
	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 1	8
ตารางที่ 1.2 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 2	9
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงและอลูมิเนียม	14
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE	18
ตารางที่ 2.3 พิกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิลใต้ดิน	33
ตารางที่ 2.4 construction and dimensions	60
ตารางที่ 2.5 พิกัดแรงดันที่ใช้ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC 60502	61
ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำ ที่ 20 $^{\circ}C$	66
ตารางที่ 3.2 Class 2 stranded conductors for single-core and multi-core cables	67
ตารางที่ 3.3 ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำทองแดง	68
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำเมื่อใช้การฉนวนต่างชนิดกัน	69
ตารางที่ 3.5 แสดงค่า Nominal Thickness ของฉนวน XLPE	69
ตารางที่ 3.6 Increase of diameter for concentric conductors and metallic screens	71
ตารางที่ 3.7 ค่าการออกแบบ	72
ตารางที่ 3.8 ค่าการออกแบบสายเคเบิ้ลเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้งานสาย	73
ตารางที่ 3.9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆทางไฟฟ้า	82
ตารางที่ 3.10 แสดงการกำหนด Boundary Settings ทางความร้อน	86
ตารางที่ 3.11 แสดงการกำหนด Subdomain Settings ทางความร้อน	87
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลทางไฟฟ้า	122
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลทางความร้อน เมื่อมีอากาศเป็นตัวพาความร้อน	123
ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลทางความร้อน เมื่อมีน้ำเป็นตัวพาความร้อน	123
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดจากการดึง ระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ทำการออกแบบ	125
ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดจากการหักโค้งสาย ระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ทำการออกแบบ	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

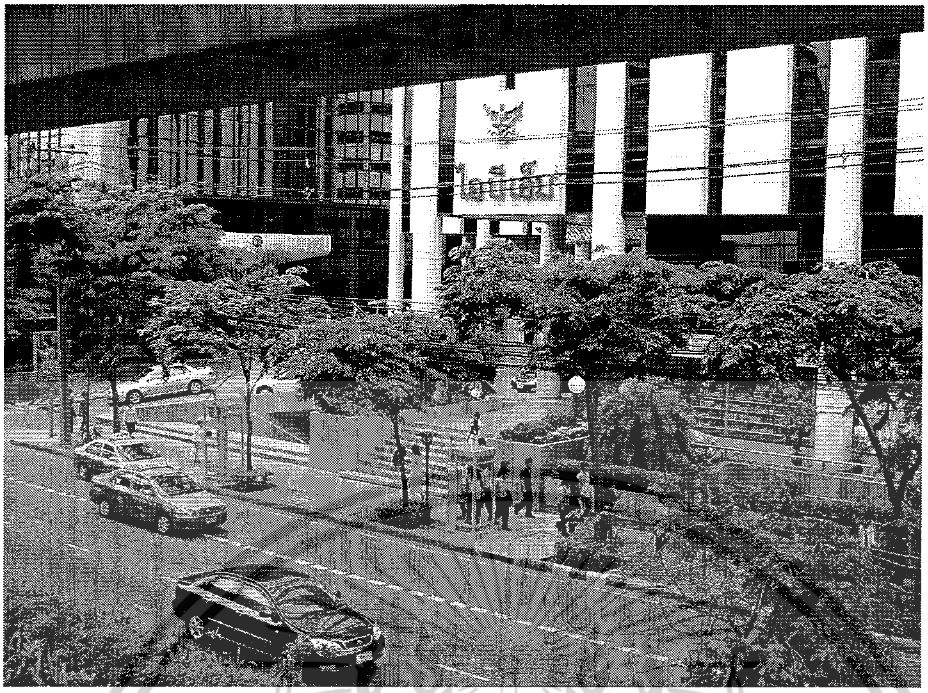
1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการผลิตสายเคเบิลที่ระดับแรงดันปานกลางและแรงดันสูง ด้วยฉนวน XLPE ขึ้นมาใช้ภายในประเทศมากขึ้น และยังมีแนวโน้มในการเลือกใช้สายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ทดแทนการเดินสายในอากาศมากขึ้น เนื่องจากความสวยงามทางภูมิทัศน์ ประกอบกับในบริเวณเมืองหลวงหรือบริเวณที่มีชุมชนหนาแน่น ซึ่งมีพื้นที่ไม่เพียงพอที่จะเดินสายส่งแรงสูงได้ หรือบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดฟ้าผ่า ที่ดินมีราคาแพง และลดปัญหาจากมลภาวะจากสภาพแวดล้อมที่อาจเกิด ตลอดจนเพื่อเพิ่มศักยภาพและความมั่นคงในระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า จึงทำให้ในปัจจุบันการเลือกใช้สายเคเบิลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า และมีการนำมาใช้งานในสถานที่ต่างๆที่มีความสำคัญ เช่น สนามบิน พิพิธภัณฑ์ และ สถานที่ท่องเที่ยวสำคัญๆ อีกด้วย



รูปที่ 1.1 การใช้งานสายเคเบิลแรงสูงในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



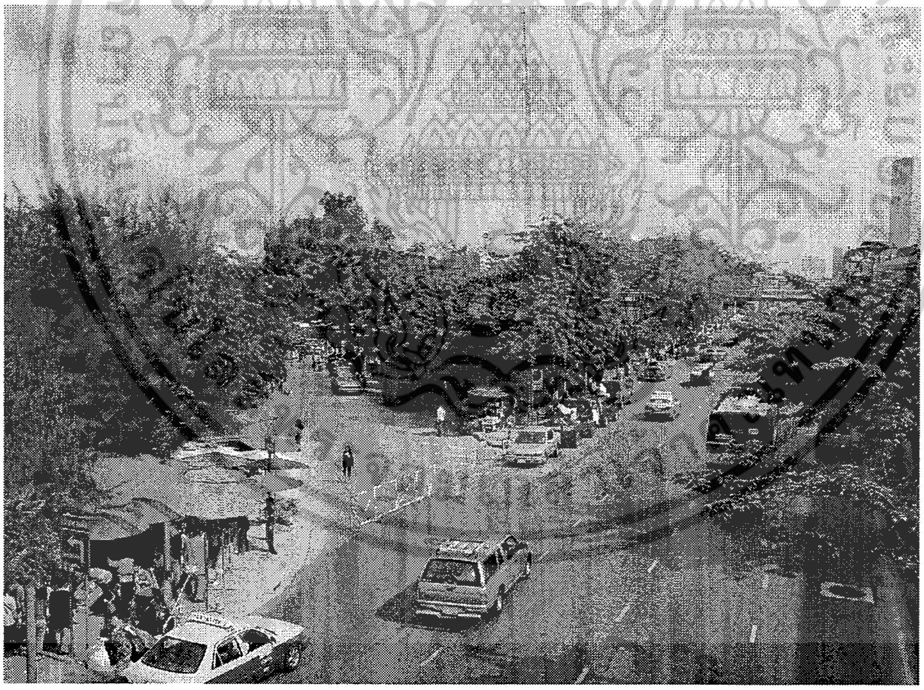
[ก] สภาพภูมิทัศน์ก่อนปรับปรุงระบบส่งจ่ายแบบเดินสายในอากาศ

[ข] สภาพภูมิทัศน์หลังการปรับปรุงระบบส่งจ่ายแบบเดินสายใต้ดิน

รูปที่ 1.2 แนวคิดการปรับปรุงภูมิทัศน์ด้วยการเดินสายเคเบิลใต้ดินในระบบส่งจ่าย แทนสายเดินในอากาศ บริเวณหน้าอาคารไอบีเอ็ม ถนนพหลโยธิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[ก] สภาพภูมิทัศน์ก่อนปรับปรุงระบบส่งจ่ายแบบเดินสายในอากาศ

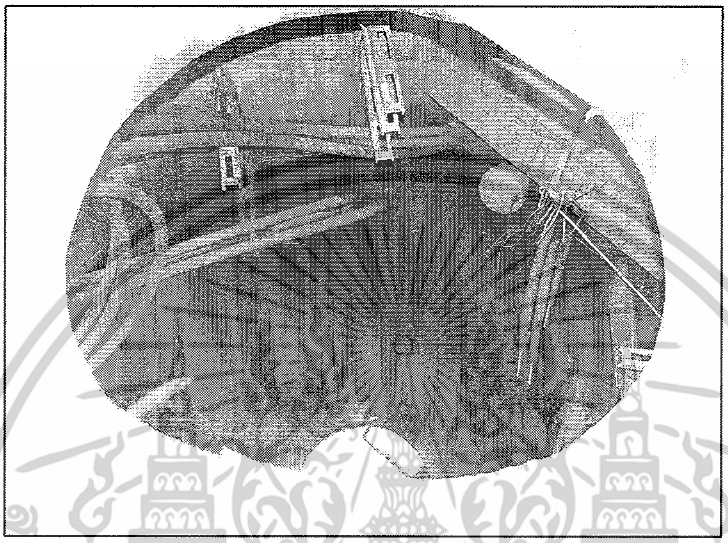


[ข] สภาพภูมิทัศน์หลังการปรับปรุงระบบส่งจ่ายแบบเดินสายใต้ดิน

รูปที่ 1.3 แนวคิดการปรับปรุงภูมิทัศน์ด้วยการเดินสายเคเบิลใต้ดินแทนสายเดินในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

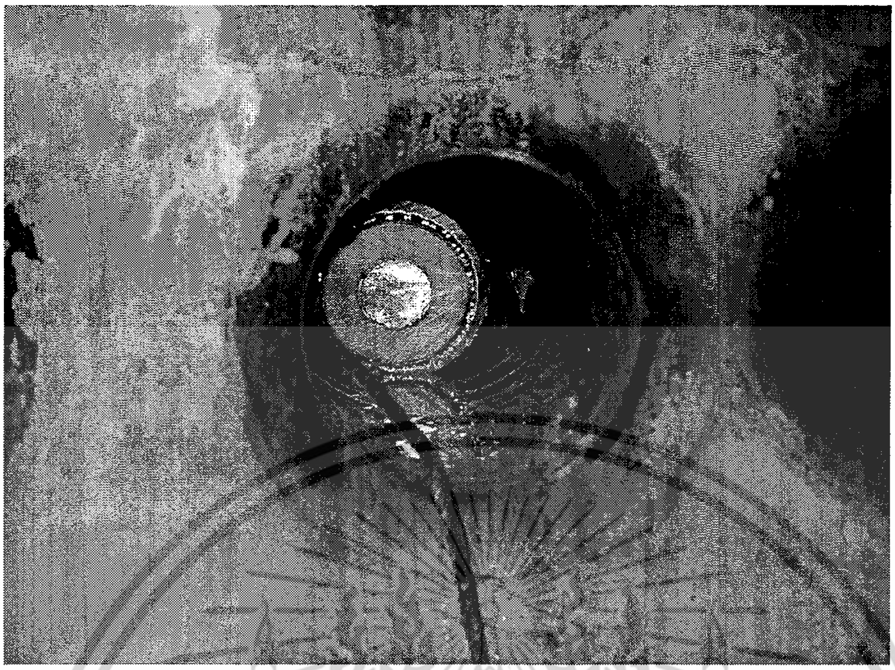
สายเคเบิลที่ใช้ในระดับแรงดันขนาดกลางมักจะประสบปัญหาภายหลังการติดตั้งไปสักระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ โดยส่วนใหญ่เกิดจากปัญหาในกระบวนการติดตั้งที่ไม่เหมาะสม ไม่ว่าจะเกิดจากผู้ติดตั้งขาดความรู้ทักษะ ประสบการณ์ในการติดตั้งสายเคเบิลที่ถูกต้อง รวมถึงการติดตั้งสายเคเบิลในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลไม่ยาวนานเท่าที่ควร ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ถึง 1.7



รูปที่ 1.4 สายเคเบิลใต้ดินภายในบ่อพักสาย (Man Hole) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการติดตั้งภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

รูปที่ 1.5 จุดที่เกิดเหตุการณ์ Trip ภายในบ่อ Man Hole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 สายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุดเมื่อได้ทำการติดตั้งสายภายใน Duct Bank

รูปที่ 1.7 สายเคเบิลใต้ดินที่เกิดการระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

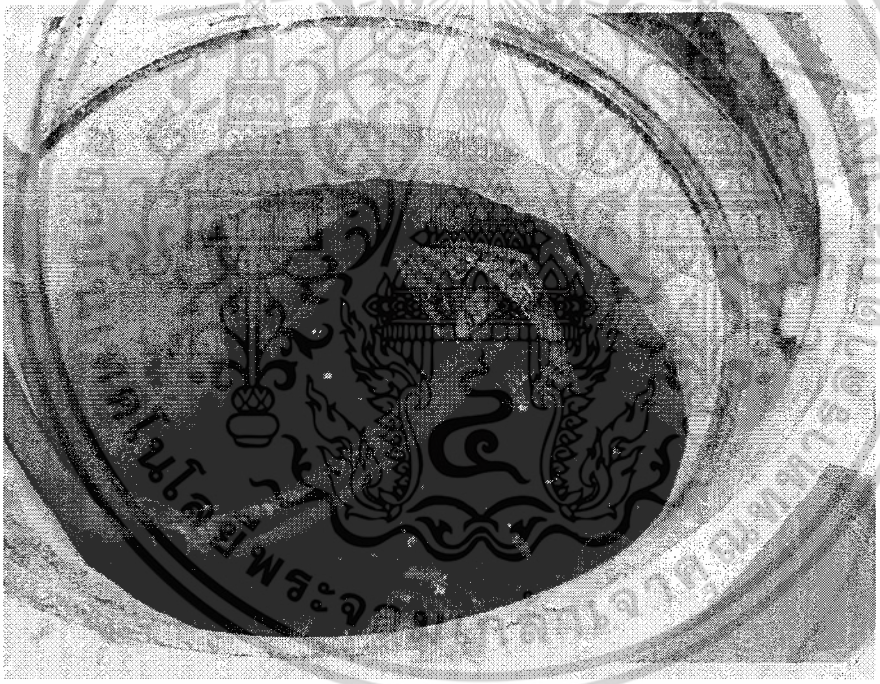
ดังนั้นการศึกษาการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินเพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้งนั้น จึงมีความสำคัญยิ่ง เพื่อเป็นแนวทางให้เกิดการพัฒนาในทางที่ดีขึ้น และลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการนำสายเคเบิลใต้ดินไปใช้งาน ตลอดจนเป็นการพัฒนาความคิดของผู้ทำการศึกษาให้สามารถคิดวิเคราะห์เหตุผลของการออกแบบเพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับสายเคเบิลเมื่อนำไปใช้งานได้อีกด้วย

จากรูปที่ 1.4-1.7 เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงกับสายเคเบิลใต้ดินที่มีพื้นที่หน้าตัดตัวนำขนาด $240mm^2$ เมื่อได้มีการติดตั้งใช้สายไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง สายเคเบิลที่ได้ทำการติดตั้งนั้นได้เกิดการระเบิดขึ้น จากรูปดังกล่าวข้างต้น เราอาจสรุปได้ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นอาจเนื่องมาจาก

1.เกิดจากสายเคเบิล

2.เกิดจากการติดตั้งและวางสายเคเบิล

3.เกิดจากสภาพแวดล้อมที่บริเวณบ่อพักสายเคเบิล



รูปที่ 1.8 สภาพแวดล้อมบริเวณบ่อพักสายเคเบิลที่ไม่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.9 แสดงบริเวณบ่อพักสายเคเบิลปกติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทำความเข้าใจในทฤษฎีและโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV.
2. เพื่อทำการศึกษาหลักการเลือกใช้และทดสอบวัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบรวมถึงการทดสอบที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (2005) ของสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน
3. สามารถออกแบบสายเคเบิล เพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพิจารณาผลทางความร้อนและทางกล เพื่อรักษาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายให้คงที่ได้
4. สามารถสรุป วิเคราะห์ผลการออกแบบ และแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษามาตรฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยทำการสืบค้นจากฐานข้อมูลของ IEEE, IEC, ปริญญานิพนธ์ และวิทยานิพนธ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการศึกษาโปรแกรมที่ต้องใช้ในการออกแบบ และวิเคราะห์การทดลองที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน
2. ศึกษาทฤษฎี หลักการ โครงสร้างของสาย และการทดสอบสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายเคเบิล เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นภายหลังการนำสายเคเบิลไปใช้งาน
3. แสดงถึงข้อดี-ข้อเสีย ของการออกแบบสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบในทางไฟฟ้า ทางความร้อน และทางกล โดยเปรียบเทียบกับสายที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน

1.4 ตารางแสดงแผนงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 1

การทำงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2551					
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1.4.1 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้นที่มีความเกี่ยวข้อง :						
1.4.2 ค้นคว้ามาตรฐานและงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง						
1.4.3 ศึกษาข้อมูลและการโปรแกรม Finite Element เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ผล						
1.4.4 นำข้อมูลที่ได้มาสรุปเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเกี่ยวเนื่องต่างๆเพื่อวางแผนการออกแบบ						
1.4.5 จัดทำข้อมูลนำเสนอผลการศึกษาในภาคเรียนที่ 1						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แสดงแผนงานวิจัยภาคเรียนที่ 2

การทำงาน	ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2551			
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. สรุปข้อมูลการออกแบบและกำหนดแนวทางการออกแบบ				
2. จำลองผลที่ได้โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์				
3. สรุปผลการออกแบบและผลที่ได้จากการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์				
4. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์				

การวางแผน   การปฏิบัติงานจริง

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV. เพื่อแก้ไขปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง เพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

1. เข้าใจใน ทฤษฎี โครงสร้างพื้นฐาน หลักการออกแบบ และการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV.
2. สามารถพัฒนาทักษะความคิดในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้
3. สามารถจำลองสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งทางไฟฟ้า ทางความร้อน และทางกลได้
4. สามารถวิเคราะห์ สรุปผลที่ได้ จากการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสามารถเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างสายที่ได้ทำการออกแบบและสายที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน
5. สามารถนำเสนอถึงปัญหา และแนวทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดทำโครงงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) [9]

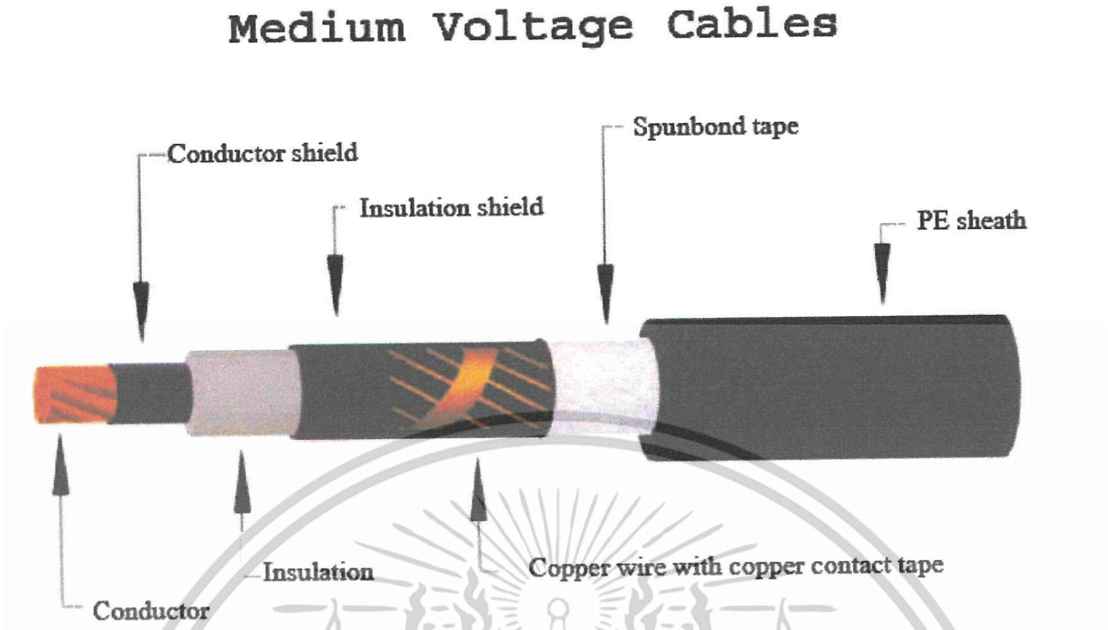
สายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า มีหลากหลายชนิด ซึ่งในช่วงเวลา 10 ปี ก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ใช้ชนิด ฉนวนกระดาษ-น้ำมัน ฉนวนกระดาษและก๊าซ ฉนวน XLPE , PE หรือ EPR แต่ในช่วงหลังนี้ จะหันมานิยมใช้สายเคเบิลชนิดฉนวน XLPE มากขึ้น เดิมสายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวน Low pressure oil fill ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้งานได้อย่างมีความเชื่อถือได้สูงตลอด 40 กว่าปีที่ผ่านมา อย่างไรก็ดีในช่วงการติดตั้งและใช้งานจำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีประสบการณ์สูงและมีระบบการควบคุมที่ยุ่งยาก และเมื่อน้ำมันเกิดรั่วอาจทำให้เกิดการลัดวงจรและเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ฉนวน XLPE จึงถูกนำมาใช้งานมากขึ้นเนื่องจากการติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก ปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินที่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ใช้งานเป็นชนิดฉนวน XLPE ทั้งระดับแรงดันปานกลาง (Medium voltage cables) 22 – 33 kV และแรงดันสูง (High voltage cables) 115 kV

ในโครงงานวิศวกรรมนี้จะทำการศึกษาสายเคเบิลใต้ดิน ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV ตามมาตรฐาน IEC60502-2 ซึ่งเป็นสายเคเบิลใต้ดินตัวนำทองแดง ฉนวน XLPE 1 Core และพิจารณาที่ขนาดหน้าตัดตัวนำ 240 mm^2 ซึ่งรับกระแสสูงสุดประมาณ 400 A [2]

2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน [9]

โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆคือ ตัวนำ ฉนวน เปลือกโลหะ และเปลือกนอก ดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV [9]

2.2.1 ตัวนำ (Conductor)

ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า ทำจากอะลูมิเนียมหรือทองแดง มีหลายลักษณะดังนี้

2.2.1.1 Solid Conductor ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าขนาดเล็ก ไม่นิยมใช้ในสายขนาดใหญ่ เนื่องจากดัดงอได้ยาก

2.2.1.2 Round Strand Conductor (ตัวนำตีเกลียว) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าทั่วๆไปและสายเปลือย

2.2.1.3 Compact Strand Conductor (ตัวนำอัดแน่น) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนทั่วๆไปโดยการนำตัวนำตีเกลียวมาบีบอัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เมื่อนำไปใช้ในสายหุ้มจะช่วยลดวัสดุที่นำมาหุ้มได้

2.2.1.4 Segmental Conductor ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินขนาดใหญ่ที่ต้องการให้มี Current Carrying Capacity สูง แต่ละ Segment จะประกอบด้วยตัวนำตีเกลียวแล้วอัดให้เป็นรูป Segment โดยแต่ละ Segment จะหุ้มด้วยฉนวน ข้อดีของตัวนำชนิดนี้ก็คือมี AC Resistance ต่ำ เนื่องจาก Wire ในแต่ละ Segment มีการ Transpose เข้าออกระหว่างส่วนนอกและส่วนในของตัวนำ ทำให้ Skin Effect Factor ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.5 Hollow Core Conductor ใช้เป็นตัวนำของ Oil Fill Cable โดยใช้ท่อกลางตัวนำในการส่งน้ำมัน ปัจจุบันมีการนำมาใช้กับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ Solid Dielectric ที่ต้องการนำกระแสสูงๆ โดยใช้น้ำหรืออากาศผ่านเข้าไปในท่อกลางตัวนำเพื่อระบายความร้อน

2.2.2 Conductor Screen

ทำจากวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งอาจเป็นผ้าอาบ Carbon หรือเป็น Extrude Layer ของสารสังเคราะห์พวกพลาสติกผสมตัวนำ มีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสของตัวนำกับฉนวนเรียบไม่มีช่องว่างที่มีศักดาไฟฟ้าสูงตกคร่อมซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิด Partial Discharge

2.2.3 Insulation (ฉนวน)

เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลใต้ดินมีหน้าที่กันไม่ให้กระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดการสูญเสียต่อระบบไฟฟ้า และอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่ไปสัมผัสได้ คุณภาพของสายเคเบิล จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวนซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดเช่น Polyvinyl Chloride (PVC) หรือ Polyethylene (PE) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงต่ำ, Oil Impregnated Paper, Crosslinked Polyethylene (XLPE) และ Ethylene Propylene Rubber (EPR) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงสูง

2.2.4 Insulation Screen

ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Conductor Screen คือลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของ Insulation และ Metallic Screen วัสดุที่ใช้ทำ Insulation Screen จะเหมือนกับ Conductor Screen

2.2.5 Metallic Screen

ทำหน้าที่เป็น Ground สำหรับสายไฟฟ้าแรงสูง และเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร บางครั้ง Metallic ยังทำหน้าที่เป็น Mechanical Protection หรือทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) หรือทำหน้าที่รักษาความดันภายในสำหรับ Oil Fill Cable Metallic Screen อาจเป็น Tape หรือ Wire ทำด้วยทองแดงหรืออะลูมิเนียมหรืออาจจะเป็น Lead Sheath (ปลอกตะกั่ว) หรือ Corrugate Aluminium Sheath (ปลอกอะลูมิเนียมลูกฟูก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 Reinforcement หรือ Armour

เป็นชั้นที่เสริมเพื่อให้สายเคเบิลมีความทนทานต่อ Mechanical Force จากภายนอกที่อาจจะทำให้สายเคเบิลชำรุดเสียหาย โดยเฉพาะสายเคเบิลใต้น้ำหรือสายเคเบิลที่ฝังดินโดยตรง บางครั้งยังใช้เป็นตัวรับแรงดึงในการลากสายด้วย วัสดุที่ใช้ทำได้แก่ Steel Tape, Steel Wire หรือ Aluminium Wire

2.2.7 Water Blocking Tape

เป็นชั้นที่เสริมขึ้นมาในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในบริเวณที่ชื้นแฉะ เพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปตามแนวสายเคเบิลในกรณีที่ Jacket ของสายเคเบิล มีการชำรุดจากการลากสายทำให้ส่วนที่เป็นฉนวนสัมผัสกับน้ำเป็นระยะทางยาว สายเคเบิลจึงมีโอกาสชำรุดสูง Water Blocking Tape นี้ทำจากสารสังเคราะห์และมี Swellable Powder (สารที่ดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วขยายตัว มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง) โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างชั้น Insulation Screen กับ Jacket

2.2.8 Laminated Sheath

เป็นชั้นกันน้ำตามแนวขวางในสายเคเบิลแรงสูงมีลักษณะเป็นเทปโลหะหุ้มด้วย Plastic ทั้งสองหน้าจากนั้นนำมาห่อรอบ Ground Screen โดย Plastic ที่ผิวนอกและผิวในของเทปจะถูกละลายให้ติดกันเป็นเนื้อเดียวทำให้สามารถป้องกันไม่ให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเข้าไปยังฉนวนได้

2.2.9 Non Metallic Sheath (Jacket)

หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า Jacket ทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทกเสียดสีต่าง ๆ ขณะติดตั้งสายเคเบิล วัสดุที่ใช้ทำมี PVC (Polyvinyl Chloride), PE (Polyethylene) ก็ได้ขึ้นกับลักษณะงาน ถ้าเป็นงานกลางแจ้ง มักใช้ Polyvinyl Chloride เพราะเฉื่อยต่อการติดไฟ ในขณะที่ Polyethylene มักใช้งานเดินลอย เนื่องจากทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ สายชนิดนี้สามารถเดินลอยในอากาศหรือฝังดินก็ได้ แต่นิยมฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน และสามารถทนต่อความชื้นได้ดี [9]

2.2.10 Protective tape

วัสดุที่ใช้ทำ Protective tape อาจเป็นผ้าหรือ Polyester tape (เช่น Mylar) มีหน้าที่ป้องกันสิ่งต่าง ๆที่จะมีผลต่อสภาพของฉนวนและ Screen นอกจากนั้นยังช่วยรัด Screen ให้แน่นและช่วยให้ Screen ไม่ติดกับเปลือกนอก (Jacket) ทำให้ไม่เกิดร่องที่ด้านในของเปลือกนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Characteristics of Cable Materials

2.3.1 โลหะตัวนำ

โลหะตัวนำโดยพื้นฐานตัดสินใจเลือกจากปัจจัยด้านการนำไฟฟ้า ความสามารถในการทำงาน การคงทนต่อการแตกหัก ความต้านทานทางไฟฟ้าและความร้อน ซึ่งโดยทั่วไปตัวนำที่นิยมใช้กันมากคือ ทองแดง และอลูมิเนียม

ทองแดง มีความนำไฟฟ้าสูงมาก แข็งแรง เหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ข้อเสีย คือ น้ำหนักมาก ราคาแพง จึงไม่เหมาะกับงานแรงดันสูง แต่เหมาะกับงานทั่วไปโดยเฉพาะงานในอาคาร

อลูมิเนียม มีความนำไฟฟ้ารองจากทองแดง แต่เมื่อเทียบกรณีกระแสเท่ากันแล้ว อลูมิเนียมจะเบาและราคาถูกกว่า จึงเหมาะกับงานนอกอาคารและแรงดันสูง อลูมิเนียมถ้าทิ้งไว้ในอากาศ จะเกิดออกไซด์เป็นฉนวนฟิล์มบาง ๆ ป้องกันการสึกกร่อน ทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงและอลูมิเนียม [5]

คุณสมบัติ	ทองแดง	อลูมิเนียม
ความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์	100	61
สภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ $20^{\circ}C$ $(\Omega m \times 10^{-8})$	1.724	2.803
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน $(per^{\circ}C \times 10^{-6})$	17	23
จุดหลอมเหลว $(^{\circ}C)$	1083	659
ความนำความร้อน $(W/cm^{\circ}C)$	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ $20^{\circ}C$ (g/cm^3)	8.89	2.7

2.3.2 วัสดุกึ่งตัวนำ (Semi conductive) [16]

สารกึ่งตัวนำหุ้มตัวนำ มีจุดประสงค์เพื่อกระตุ้นความต่างศักย์ให้สม่ำเสมอทั่วผิวของตัวนำ ปิดผนึกระหว่างตัวนำและฉนวนที่อยู่ติดกัน ช่วยกระจายความเครียดทางไฟฟ้าเพื่อลด Partial discharge และสำหรับสารกึ่งตัวนำหุ้มฉนวนนี้มีจุดประสงค์เพื่อหุ้มผิวฉนวนภายนอกระหว่างชั้นฉนวนและกราวด์ของระบบ ช่วยให้สนามไฟฟ้าของตัวนำแผ่จากศูนย์กลางอย่างสมมาตรและเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับขอบเขตของฉนวนฉนวน ป้องกัน partial discharge ภายในโพรงอากาศ ระหว่างฉนวนและภายนอกที่หุ้มโลหะกราวด์ รวมถึงการป้องกันศักย์ทางไฟฟ้าที่อาจจะมีผลต่อภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความนำไฟฟ้าของวัสดุกึ่งตัวนำโพลีเอทีลีน ผันแปรโดยการบรรจุคาร์บอนดำ ทั้งนี้วัสดุอื่นเช่น Polyvinyl Chloride (PVC) , Ethylene-Propylene-Rubber (EPR) ,และ Irradiated Polyolefins สามารถใส่สารกึ่งตัวนำได้ด้วย เราอาจเลือกใช้วัสดุ thermoplastic หรือ thermosetting มาเป็นสารกึ่งตัวนำได้เช่นกัน

ซึ่งวัสดุสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปจัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติกหรือ สารกึ่งตัวนำ PE copolymers ของ EEA (ethylene ethyl acrylate) หรือ EEVA (ethylene ethyl vinyl acetate) ซึ่งมีการปรับองค์ประกอบทางเคมี เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับที่หุ้มกึ่งตัวนำ ตัวอย่างเช่น เตรียมให้มีการเกาะติดอย่างแข็งแรงของชั้นหุ้มตัวนำและฉนวน

ความนำไฟฟ้าของอนุภาคคาร์บอนที่เติมลงโพลีเมอร์ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณที่เติมลงไป ลักษณะทางเรขาคณิตและขนาดของอนุภาคที่เติมลงไป วิธีการรวมตัวทางฟิสิกส์ของสารที่เติมลงไปร่วมกับโพลีเมอร์ และวิธีการผสม ซึ่งจะก่อให้เกิดการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

โดยพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวัสดุกึ่งตัวนำ จะถูกกำหนดในรูปแบบของปริมาตรและความนำไฟฟ้าเชิงผิวหรือความต้านทาน ที่เป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิและสนามไฟฟ้า รวมถึงอิทธิพลที่มีต่อการดูดซับความชื้นบนพื้นผิว ซึ่งการวัดปริมาณความต้านทานของวัสดุกึ่งตัวนำโดยทั่วไปจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D257 และการวัดความต้านทานผิวจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D991 หรือ D4496 มาตรฐานที่กล่าวถึงนี้เป็นมาตํรฐานที่ใช้สำหรับการหาค่าปริมาณของความต้านทานของวัสดุกึ่งตัวนำในทิศทางรัศมี

2.3.3 วัสดุฉนวน [5]

ทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรง ระหว่างตัวนำ หรือตัวนำกับส่วนที่ต่อลงดิน ในระหว่างที่ตัวนำ นำกระแสไฟฟ้า จะเกิดพลังงานสูญเสีย ในรูปความร้อน ซึ่งจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวน ความสามารถในการทนต่อความร้อน ของฉนวน จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายไฟฟ้านั่นเอง การเลือกใช้ชนิดของฉนวน จะขึ้นกับอุณหภูมิใช้งาน แรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมในการติดตั้ง วัสดุที่นิยมใช้เป็น ฉนวนมากที่สุดในขณะนี้คือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene (XLPE)

พลาสติกที่ใช้ทำฉนวน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) และ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) นอกจากจะใช้เป็นฉนวนหลักแล้ว พลาสติกเหล่านี้ยังใช้ทำเปลือกหุ้มและวัสดุประกอบอื่นๆ คุณสมบัติของพลาสติกทั้งสองมีดังนี้

2.3.3.1. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

เป็นพลาสติกเมื่อนำมาหลอมเหลวหรือขึ้นรูปแล้วจะคงรูปอยู่ถาวร ไม่สามารถนำมาทำการหลอมหรือขึ้นรูปใหม่ได้ พลาสติกเทอร์โมเซตติงใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลักของสายเคเบิลที่สำคัญคือ XLPE (Cross-link polyethylene)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XLPE สามารถทำให้หลอมเหลวด้วยความร้อนและจะคงรูปอยู่อย่างถาวรด้วยการ Set หรือ Cured ด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือความร้อน ซึ่งจะทำให้เป็นโครงข่ายที่ไขว้กัน (Cross-link) กลายเป็นโมเลกุลใหญ่ เมื่อเกิดความร้อนจนอุณหภูมิสูงเกิดขีดจำกัด XLPE จะสลายตัว หรือเกิดการไหม้จนไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีก

เหตุผลที่นิยมใช้ XLPE เป็นฉนวนของสายเคเบิล

1.ราคาไม่แพงจนเกินไป

2.มีความสามารถในขบวนการผลิตง่าย

3.มีคุณลักษณะเด่นทางไฟฟ้าคือ

- ค่าความต้านทานของฉนวนสูง
- ค่าความคงทนต่อความเครียดไฟฟ้าสูง
- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน(ε_r) ต่ำ
- ค่าความสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำที่ทุกความถี่

4.มีคุณลักษณะเด่นทางกายภาพคือ

- การดูดซึมน้ำต่ำมาก
- มีความต้านทานต่อสารเคมีดีมาก
- มีความต้านทานต่อการทำให้สูญเสียรูปด้วยความร้อนดี
- มีความต้านทานอุณหภูมิต่ำ

แต่อย่างไรก็ตามเราต้องคำนึงถึง

- สิ่งสกปรก
- ช่องว่างและความชื้นภายในเนื้อฉนวน
- ความขรุขระที่รอยต่อ

ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจก่อให้เกิด

- ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงผิดปกติที่บริเวณดังกล่าวซึ่งนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial Discharge : PD) ที่อาจเป็น Water tree หรือ Electric tree และท้ายที่สุดอาจทำให้ฉนวนเบรกดาวน์ได้

การแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆที่ถูกกล่าวถึง ทำได้ดังนี้

- พัฒนาให้ชั้น Semi Conductive shield เรียบมากขึ้น
- หุ้มชั้นทั้งสามชั้นร่วมกัน
- ใช้วิธีบ่มแห้ง Cross-linking
- พัฒนาการใช้ Super-clean PE
- ใช้กระบวนการหุ้มที่เป็นระบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3.3.2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

พลาสติกประเภทนี้สามารถทำให้หลอมเหลวและเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน เมื่อนำมาขึ้นรูปแล้วปล่อยให้เย็นลงก็จะมีลักษณะตามที่ขึ้นรูปไว้ พลาสติกนี้สามารถทำให้หลอมเหลวอีกครั้งเพื่อนำมาขึ้นรูปใหม่ได้ แต่วัสดุที่ใช้ในการผลิตสายไฟฟ้า จะใช้พลาสติกที่ผลิตขึ้นมาครั้งแรกเท่านั้น พลาสติกที่นิยมใช้คือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Polyethylene (PE)

คุณสมบัติที่สำคัญของ PVC [5]

- เหนียว ขึ้นรูปในลักษณะต่างๆได้ง่าย
- ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด ด่าง
- ไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และน้ำยาสารละลายอินทรีย์
- อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 60 $^{\circ}C$
- มีความคงทนต่อสนามไฟฟ้าสูงถึง 425-1300 V/mil (1 mil = 0.001 นิ้ว)
- มีค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (ε_r) 5.0-7.0
- ค่า Tan δ ประมาณ 0.08-0.13

ถ้า PVC มีปริมาณคลอรีน (Cl) มากจะทำให้ติดไฟยากและป้องกันสารเคมีได้ดีนอกจากนี้ PVC ยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถผสมได้กับสารอื่นๆ ทำให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพของ PVC ให้ดียิ่งขึ้นได้

Polyethylene (PE)

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ PEความหนาแน่นต่ำ (LDPE) PEความหนาแน่นและความดันต่ำ (LLDPE) และ PEความหนาแน่นสูง (HDPE)

คุณสมบัติที่สำคัญของ PE [5]

- ทนต่อความชื้นสูง
- ทนต่อปฏิกิริยาเคมี
- มีค่าความต้านทานจำเพาะสูง
- มีความคงทนต่อสนามไฟฟ้าสูงถึง 200-400 kV/cm
- มีค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (ε_r) 2.25-2.35
- ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 75 $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
104091

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE [5]

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน ($^{\circ}C$)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร ($^{\circ}C$)	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	6	2.4
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.4	0.92
ความนำความร้อน (cal/cm.sec ^{o}C)	3.5	8
ความทนทานต่อแรงดึง (kg/mm^2)	2.5	3

2.3.4 ฉนวน XLPE

เนื่องจากสายเคเบิลใต้ดินที่ กฟภ. จัดหามาใช้งานเป็นแบบฉนวน XLPE ทั้งหมด (ไม่นับรวมสาย Submarine Cable) ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงในเรื่องของฉนวน XLPE เท่านั้น ฉนวน XLPE ได้จากการนำ Polyethylene (PE) ซึ่งเป็น Thermoplastic มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในทำให้เกิดการเกาะตัวกันระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจาก Thermoplastic ไปเป็น Thermosetting ซึ่งเป็นผลให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหลายอย่าง วิธีการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Crosslinking

ปกติโมเลกุลของ PE จะประกอบด้วยคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) ยึดเกาะกันเป็นสายยาวโดยไม่มีการยึดเกาะกันระหว่างสาย ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนสายโมเลกุลของ C-H นี้จะเคลื่อนที่ไปมาได้ (เพราะไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุล) เป็นผลให้เกิดละลายขึ้นนั่นเอง เมื่อทำให้เกิด Crosslink (ทำได้หลายวิธีเช่น การใช้สารเคมีเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา หรือใช้ Radiation เป็นต้น) คือทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene แรงยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุลนี้เองที่เป็นตัวทำให้ XLPE ไม่ละลายเมื่อได้รับความร้อน

ข้อดีของฉนวน XLPE [5]

- ทนอุณหภูมิได้สูงคือ 90 $^{\circ}C$
- มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีคือ มี Dielectric Loss ต่ำ และมี Dielectric Strength สูง
- มีคุณสมบัติทางกลที่ดีทนต่อแรงกระทำภายนอก
- ทนต่อสารเคมีดีกว่า PE/PVC
- ไม่เป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.1 การเปลี่ยนฉนวน PE เป็น XLPE [9]

ในการเปลี่ยนฉนวน PE เป็น XLPE นั้น มีใช้วิธีการที่ใช้กันมากเรียกว่า Peroxide Crosslinking โดยความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ Peroxide Crosslinking นี้มี 2 วิธี

2.3.4.1.1 วิธี Steam Cure

สิ่งสำคัญในการผลิตสายไฟฟ้าคือ ฉนวนของสายไฟฟ้าจะต้องเป็น Thermoplastic เพราะจะต้อง Extrude (หลอมละลายและฉีดออกมา) เพื่อหุ้มสายไฟฟ้า ดังนั้นในกระบวนการผลิตสาย XLPE จึงต้องแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ

1.ขั้นตอนของการ Extrude

โดยวัตถุดิบสำหรับการผลิตฉนวน XLPE จะมีลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกที่หลอมละลายได้ (PE + สารพวก Peroxide ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยา) โดยเม็ดพลาสติกนี้จะถูกหลอมละลายและฉีดออกมาหุ้มสายไฟฟ้าเช่นเดียวกับการผลิตสายไฟฟ้าฉนวน PE หรือ PVC โดยทั่วไป จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนฉนวนให้เป็น Thermosetting

2.ขั้นตอนการนำสายไฟฟ้าที่ได้ไปผ่านในท่อที่มีไอน้ำอุณหภูมิสูง

การนำสายไฟฟ้าที่ได้ไปผ่านในท่อที่มีไอน้ำอุณหภูมิสูงถึง 2000 $^{\circ}C$ และความดันสูงที่ 20 Bar ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนโมเลกุลของ PE ให้เป็น XLPE (ส่วนนี้จะเรียกว่า Curing Zone หรือ Valcanizing Zone) จากนั้นสายไฟฟ้าจะถูกลดอุณหภูมิให้ต่ำลงโดยการหล่อน้ำในท่ออีกส่วนหนึ่งซึ่งเรียกว่า Cooling Zone

สาเหตุที่ใช้ไอน้ำหรือน้ำเป็นตัวกลางถ่ายเทอุณหภูมิก็เพราะว่าน้ำและไอน้ำมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้การถ่ายเทและระบายความร้อนได้รวดเร็วนั่นเอง ในกรณีใช้ท่อ Curing ในแนวตั้งกระบวนการผลิตนี้เรียกว่าวิธี Vertical Continuous Valcanization (VCV) ซึ่งส่วนมากจะใช้ในการผลิตสายเคเบิลใต้ดิน แต่ถ้าใช้ท่อเอียงลาดจะเรียกกันว่า Catenary Continuous Valcanization (CCV)

ข้อดีของการผลิตแบบ VCV คือสายไฟฟ้าที่ได้จะมีตัวนำอยู่ตรงกลางไม่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง (Excentric) ความหนาของฉนวนเท่ากันตลอดความยาวสาย แต่ค่าลงทุนในการก่อสร้างสูงเพราะจะต้องทำเป็นหอสูง (Tower) ถ้าใช้วิธี CCV ค่าก่อสร้างจะต่ำกว่าแต่ก็มีข้อจำกัดไม่สามารถผลิตสายไฟฟ้าแรงสูงที่มีความหนาของฉนวนมาก ๆได้เพราะจะเกิดการ Excentric ได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

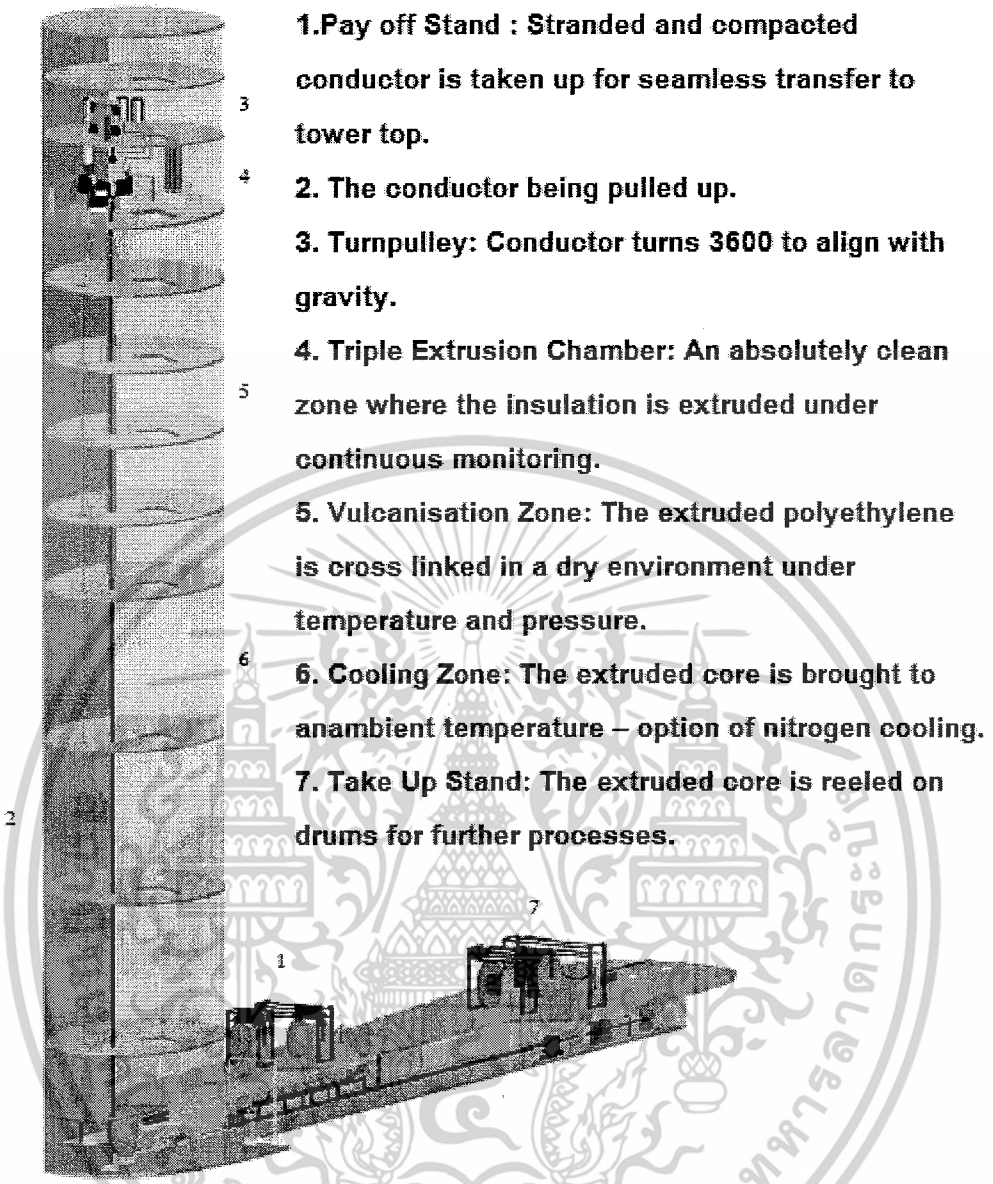
2.3.4.1.2 วิธี Dry Cure

หลังจาก XLPE CABLE ชนิด Steam Cure ใช้งานไประยะหนึ่งพบว่ามีการชำรุดของเคเบิลเร็วกว่าเวลาที่คาดหมายไว้คือชำรุดในเวลาเพียง 10 ปี แทนที่จะใช้งานได้ไม่ต่ำกว่า 20 ปี ประมาณปี ค.ศ. 1969 ก็พบว่าสาเหตุของการชำรุดเกิดมาจาก Water Tree โดยมีน้ำ สนามไฟฟ้า และช่องว่างหรือสิ่งแปลกปลอมในฉนวนเป็นสาเหตุ กล่าวคือขณะที่ Curing โดยใช้ไอน้ำนั้นอุณหภูมิของฉนวนจะสูงโมเลกุลของน้ำส่วนหนึ่งจะเคลื่อนตัวเข้าไปในฉนวนด้วยวิธีการแพร่กระจาย(จากที่มีความหนาแน่นของโมเลกุลของน้ำมากไปสู่ที่มีความหนาแน่นของโมเลกุลของน้ำน้อย) เกิดเป็นช่องว่างขึ้นภายในฉนวน เมื่ออุณหภูมิต่ำลงก็จะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำตกค้างอยู่ภายในช่องว่างในฉนวนนั้นภายหลังกระบวนการผลิต เมื่อปล่อยสายเคเบิลทิ้งไว้น้ำจะระเหยผ่านฉนวนออกมาทำให้เกิดเป็นช่องว่าง(Void) อยู่ในฉนวนจำนวนหนึ่งเมื่อมีการนำเคเบิลไปใช้งานในที่ที่มีความชื้นสูงไอน้ำจากภายนอกจะแพร่กลับไปในฉนวนเหล่านั้น เนื่องจากมีช่องว่างอยู่มากปริมาณไอน้ำในฉนวนก็จะมากตามไปด้วยและเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นทำให้เกิด Water Tree ขึ้นได้ ซึ่งสาเหตุของการเกิด Water Tree นั้นเชื่อว่ามีสาเหตุมาจากปัจจัย 3 ประการคือ

1) ความชื้น
2) ช่องว่างหรือสิ่งแปลกปลอมในฉนวน
3) สนามไฟฟ้าความเข้มสูง

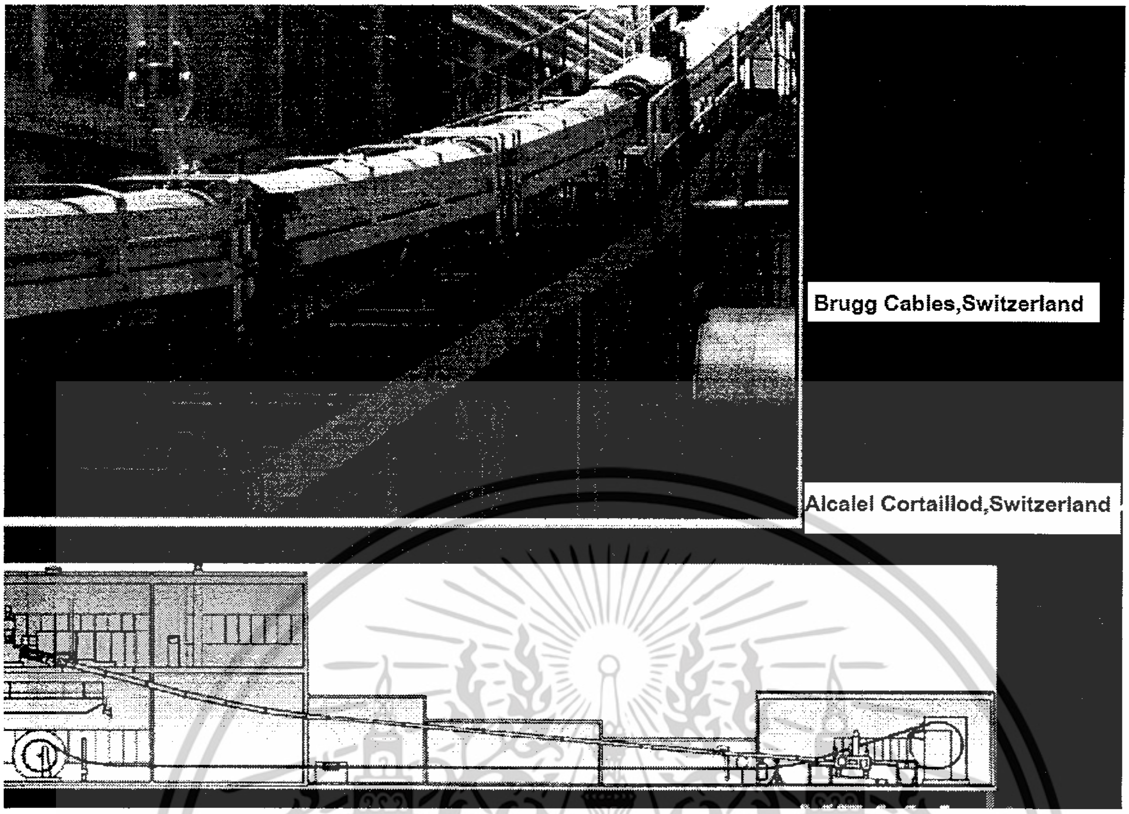
จึงได้มีความพยายามที่จะผลิตสายเคเบิลฉนวน XLPE โดยหลีกเลี่ยงการใช้ไอน้ำทำให้เกิดกระบวนการผลิตแบบใหม่ขึ้นมาโดยไม่ใช้ไอน้ำในการ Cure เรียกว่า Dry Cure โดยผู้ผลิตสายเคเบิลบางรายจะใช้ ก๊าซไนโตรเจนแทน แต่เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีเท่าไอน้ำจึงต้องมี Pump เพื่อเพิ่มความเร็วในการสัมผัสระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับ XLPE ฉนวนที่ได้จากวิธีการ Dry Cure นี้จะมีช่องว่างอยู่น้อยกว่าและมีขนาดเล็กกว่าวิธีการ Steam Cure มาก จึงเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การผลิตสายเคเบิลโดยวิธี Vertical Continuous Vulcanization (VCV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การผลิตสายเคเบิลใต้ดินโดยวิธี
Catenary Continuous Vulcanization (CCV)

2.4 ส่วนประกอบของระบบเคเบิลใต้ดิน [9]

2.4.1 รูปแบบการก่อสร้าง

ระบบเคเบิลใต้ดินในปัจจุบันจะมีลักษณะการก่อสร้างอยู่สองลักษณะ คือ แบบเปิดหน้าดินและ แบบไม่เปิดหน้าดิน โดยการก่อสร้างจะขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัยและองค์ประกอบ และมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

2.4.1.1 แบบเปิดหน้าดิน

2.4.1.1.1 กลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต (Concrete Encased Duct Bank)

ใช้ได้ทั้งระบบจ่ายและระบบส่ง ลักษณะการก่อสร้างเป็นแบบใช้ท่อ HDPE (High Density Polyethylene) หรือท่อ RTRC (Reinforced Thermosetting Resin Conduit) แล้วหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งจะช่วยป้องกันผลกระทบทางกล(Mechanical Protection)ให้กับสายเคเบิลได้อย่างดี การก่อสร้างกลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต (Duct Bank) นี้จะต้องมีบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (Manhole หรือ Handhole) เป็นระยะๆ สำหรับใช้ในการชักลากสาย ต่อสาย ต่อแยกสาย หรือใช้ในกรณีที่แนวเคเบิลหักมุมซึ่งควรมีหลักบอกแนวสายเคเบิลใต้ดิน (Cable Route Marker) แสดงตามแนว Duct Bank ด้วย การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อดี-ข้อเสียดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

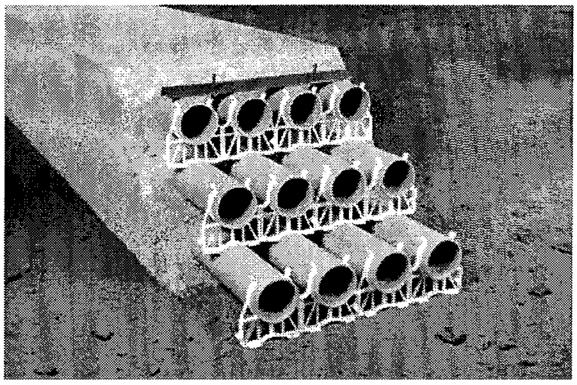
ข้อดี

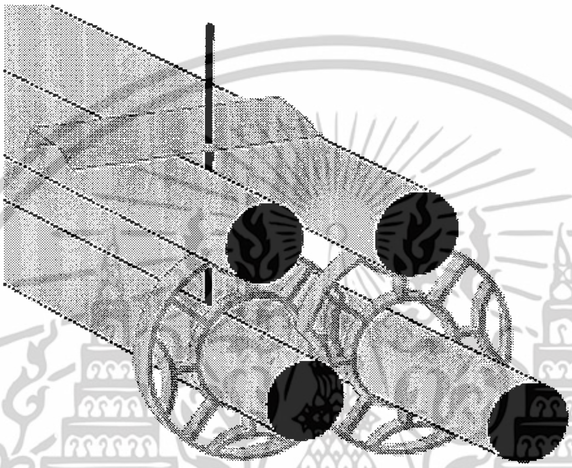
1) ความปลอดภัยของสายเคเบิลใต้ดินสูงมาก เนื่องจาก Duct Bank อาจได้รับความเสียหายจากการขุดเจาะ แต่คอนกรีตเสริมเหล็กที่หุ้มท่ออยู่จะช่วยป้องกันท่อร้อยสายรวมทั้งสายเคเบิลใต้ดินได้ ทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ (Reliability) สูง
2) จัดวางสายเคเบิลใต้ดินเป็นจำนวนมากๆ ได้ง่ายกว่า
3) การเปลี่ยนขนาดสายเคเบิลใต้ดิน การเปลี่ยนสายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุดและการเพิ่มจำนวนวงจร สามารถทำได้สะดวกโดยการลากสายเคเบิลใต้ดินใหม่ในท่อ Spare ที่ออกแบบเตรียมไว้
4) เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขึ้น เนื่องจากท่อถูกหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีความแข็งแรงทนทาน ทำให้สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดแก่สายเคเบิลใต้ดินได้ ไม่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินอื่นๆ ที่วางใกล้กันเสียหาย

ข้อเสีย

1) มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง เนื่องจากท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินทั้งหมดหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กและจำเป็นต้องมีบ่อพักสาย เพื่อให้ลากสายเคเบิลใต้ดินได้ นอกจากนี้ยังต้องขุดร่องขนาดกว้างเพราะโครงสร้างของท่อร้อยสายมีขนาดใหญ่
2) ความสามารถในการระบายความร้อนต่ำ จึงมีผลทำให้สายเคเบิลใต้ดินนำกระแสได้ต่ำ
3) ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างนานมาก
4) การดัดโค้งเมื่อพบอุปสรรค ทำได้ลำบากมาก (ต้องใช้ระยะทางยาว)
5) ในกรณีที่ใช้ท่อ HDPE เป็นท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในสายเคเบิลใต้ดินจะเกิดความร้อนสูง ทำให้ท่อหลอมละลายรวมกับสายเคเบิลใต้ดิน เกิดความเสียหายได้ ซึ่งมีผลทำให้เกิดความยากต่อการบำรุงรักษาเนื่องจากไม่สามารถลากสายเคเบิลใต้ดินออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



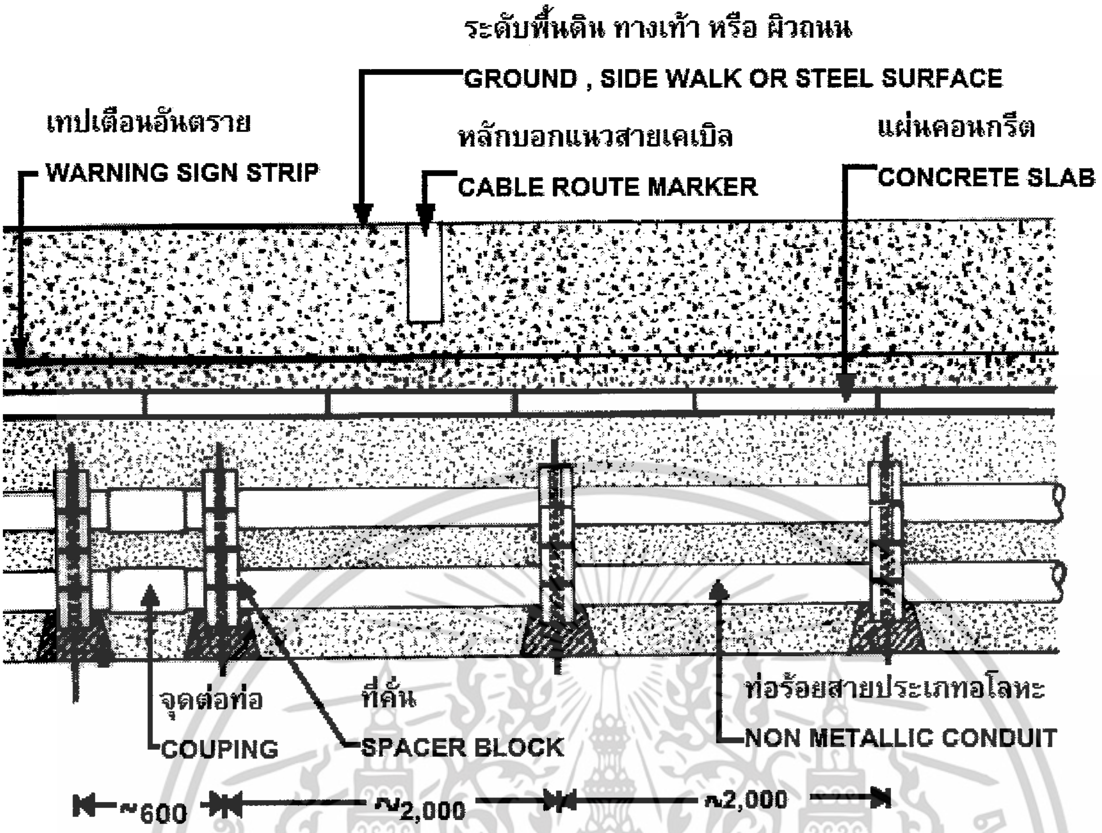


รูปที่ 2.4 Concrete Encased Duct Bank และวิธีจัดวางก่อนเทคอนกรีต

2.4.1.1.2 ร้อยท่อฝังดิน (Semi – Direct Burial)

การก่อสร้างวิธีนี้ใช้กับงานก่อสร้างระบบจำหน่ายและระบบส่งโดยนำท่อที่สามารถดัดงอได้ (Flexible) มาใช้คือ ท่อ Corrugated หรือใช้ท่อ HDPE หรือท่อ RTRC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ร้อยท่อฝังดิน (Semi – Direct Burial)

ลักษณะการก่อสร้างจะใช้ Concrete Spacer Block บังคับท่อดังกล่าวเป็นระยะๆ เพื่อช่วยรักษาระยะห่างระหว่างท่อให้สม่ำเสมอกัน การก่อสร้างวิธีนี้จะไม่มีการหุ้มท่อร้อยสายด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Slab) ปิดป้องกันอยู่ด้านบน และจำเป็นต้องมีบ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (Manhole and Handhole) เช่นเดียวกันกับกลุ่มท่อหุ้มคอนกรีต (Concrete Encased Duct Bank) มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

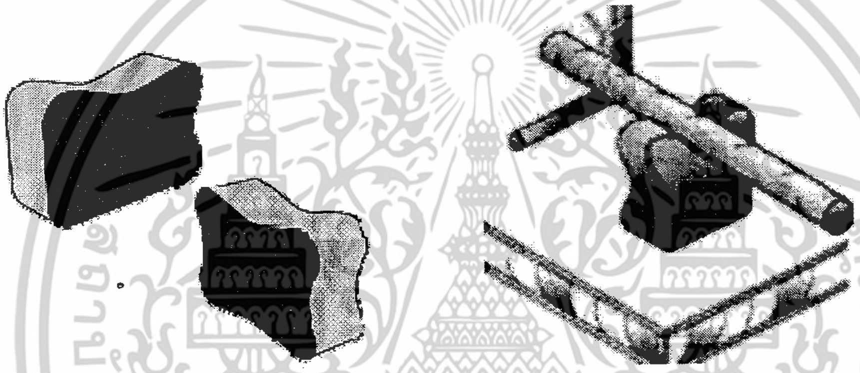
1) มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างค่อนข้างสูงเนื่องจากท่อ High Density Polyethylene (HDPE) และอุปกรณ์ที่ใช้ค่อนข้างมีราคาแพง แต่ถูกกว่าการก่อสร้างประเภท Duct Bank
2) ระยะเวลาในการก่อสร้าง น้อยกว่าการก่อสร้างประเภท Duct Bank
3) ความสามารถในการระบายความร้อนดีกว่าการก่อสร้างประเภท Duct Bank
4) ในกรณีที่ใช้ท่อ Corrugated การดัดโค้งเมื่อพบอุปสรรคจะทำได้ง่ายกว่าการก่อสร้างประเภท Duct Bank
5) การเปลี่ยนขนาดสายเคเบิลใต้ดิน การเปลี่ยนสายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุดและการเพิ่มจำนวนวงจร สามารถทำได้สะดวกโดยการลากสายเคเบิลใต้ดินใหม่ในท่อ Spare ที่ออกแบบเตรียมไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขึ้น ไม่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินอื่นๆ ที่วางใกล้กันเสียหาย

ข้อเสีย

1) ท่อร้อยสายอาจได้รับความเสียหายจากการถูกขุดเจาะ รวมทั้งการเกิดการ Slide ของดิน ทำให้ท่อร้อยสายเสียหายได้ แต่ก็ยังสามารถช่วยป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับสายเคเบิลใต้ดินได้พอควร
2) ในกรณีที่ใช้ท่อ High Density Polyethylene (HDPE) เป็นท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในสายเคเบิลใต้ดินจะเกิดความร้อนสูง สามารถทำให้ท่อหลอมละลาย เกิดความเสียหายและยากต่อการบำรุงรักษาเนื่องจากไม่สามารถลากสายเคเบิลใต้ดินออกมาได้

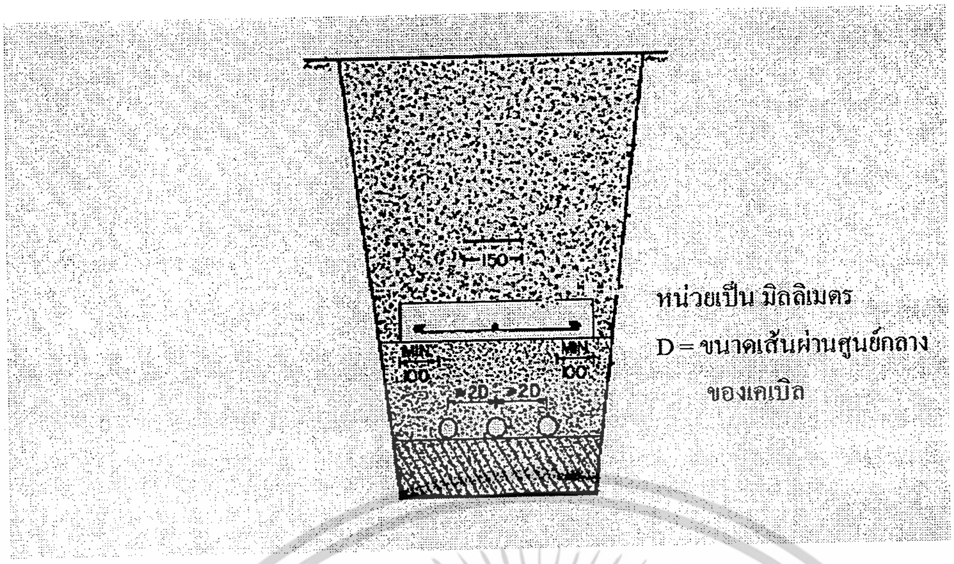


รูปที่ 2.6 Concrete Spacer Block และลักษณะการใช้งาน

2.4.1.1.3 ฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

การก่อสร้างโดยการฝังดินโดยตรงจะใช้ในการจำหน่ายไฟฟ้า โดยการติดตั้งไม่ใช้ท่อร้อยสายและไม่มีการหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ใช้วิธีฝังสายเคเบิลใต้ดินให้ได้ความลึกตามมาตรฐาน ซึ่งมีการวางแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Slab) และเทปเตือนอันตราย (Warning Sign Strip)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

ข้อดี

1) มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำที่สุดเนื่องจากไม่ต้องเสียค่าท่อร้อยสายและจำนวนบ่อพักและอุปกรณ์ต่อสายก็มีน้อยด้วย
2) ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างน้อยที่สุด สามารถดำเนินการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว และทำให้ลดปัญหาเกี่ยวกับการจราจรได้ เนื่องจากใช้เวลาในการขุดถนนไม่นานนัก แต่ต้องขุดยาวเป็นช่วง ๆ
3) ความสามารถในการระบายความร้อนดีที่สุด ดังนั้นจึงนำกระแสได้ดีที่สุด
4) การดัดโค้งเมื่อพบอุปสรรคทำได้ง่ายที่สุด

ข้อเสีย

1) ความปลอดภัยของสายเคเบิลใต้ดินต่ำที่สุด เนื่องจากมีเพียงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Slab) เท่านั้นที่ป้องกันสายเคเบิลใต้ดิน นอกจากนี้แนวสายเคเบิลใต้ดินอาจเบี่ยงเบนได้โดยอิสระ เพราะไม่มีอุปกรณ์จับยึดสายเคเบิลใต้ดินไว้ ทำให้มีความมั่นคง (Reliability) ของระบบต่ำ
2) การเปลี่ยนขนาดของสายเคเบิลใต้ดิน หรือการเปลี่ยนสายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุด และการเพิ่มจำนวนวงจร ต้องดำเนินการขุดวางสายเคเบิลใต้ดินใหม่ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง
3) จะต้องดำเนินการวางสายเคเบิลใต้ดินให้เสร็จในคราวเดียว หากเกิดปัญหาในบริเวณที่ไม่สามารถวางสายเคเบิลใต้ดินในระยะทางยาวๆได้ อาจเนื่องจากสภาพภูมิศาสตร์ เช่นบนทางเท้าซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการปฏิบัติงานเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นได้
4) เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขึ้น อาจจะทำให้เกิดสายเคเบิลใต้ดินที่อยู่ข้างเคียงเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) เหมาะกับการก่อสร้างที่มีจำนวนวงจรน้อย เช่น 1 หรือ 2 วงจร เนื่องจากถ้ามีจำนวน วงจรมากๆ ร่องที่ขุดต้องมีความกว้างมาก และการบำรุงรักษายาก

2.4.1.1.3.1 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้แบบการก่อสร้างระบบเคเบิลใต้ดินแบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

1) สภาพภูมิศาสตร์ในสถานที่ที่ก่อสร้าง

เนื่องจากการก่อสร้างระบบเคเบิลใต้ดินแบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial) นั้น จำเป็นต้องฝังสายเคเบิลใต้ดินเป็นแนวยาวตลอด จึงจำเป็นต้องดำเนินการให้เสร็จอย่างรวดเร็ว โดยเลือกสถานที่ที่มีสภาพเนื้อดินแข็งพอควร เพื่อให้สามารถขุดร่องเป็นแนวยาวได้โดยไม่ต้องปัก Sheet Pile

2) จำนวนวงจร

วิธีนี้เหมาะกับการก่อสร้างที่มีจำนวนวงจรน้อย เช่น 1 หรือ 2 วงจรทั้งนี้ เนื่องจากการก่อสร้างระบบเคเบิลใต้ดินแบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial) ไม่มีอุปกรณ์สำหรับจับยึดเลย และนอกจากนี้ส่วนใหญ่ Right of Way ของการฝังสายเคเบิลใต้ดินจะแคบ หากมีการก่อสร้างหลายวงจรแล้ว เมื่อสายเคเบิลใต้ดินเกิดลัดวงจรขึ้นทำให้สายเคเบิลใต้ดินใกล้เคียงเสียหายได้

3) สถานที่ในการก่อสร้าง

เนื่องจากข้อเสียของการฝังสายเคเบิลใต้ดินแบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial) คือ ไม่มีการป้องกันอันตรายต่อสายเคเบิลใต้ดินอย่างเพียงพอ จึงควรเลือกใช้การก่อสร้างแบบนี้ในบริเวณของผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งสามารถลดอันตรายที่อาจถูกขุดเจาะโดยสายเคเบิลใต้ดิน นอกจากนี้ควรมี Cable Route Marker เพื่อให้สามารถทราบแนวของการฝังสายเคเบิลใต้ดินอีกด้วย

4) ระยะทางในการฝังสายเคเบิลใต้ดิน

เนื่องจากการฝังสายเคเบิลใต้ดินแบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial) จำเป็นต้องมีจุดต่อแยกสายให้น้อยที่สุด เพื่อให้สามารถดำเนินการให้เสร็จอย่างรวดเร็ว จึงต้องฝังสายเคเบิลใต้ดินให้เป็นแนวยาวต่อเนื่องกันโดยตลอด

2.4.1.2 แบบไม่เปิดหน้าดิน

2.4.1.2.1 Pipe Jacking

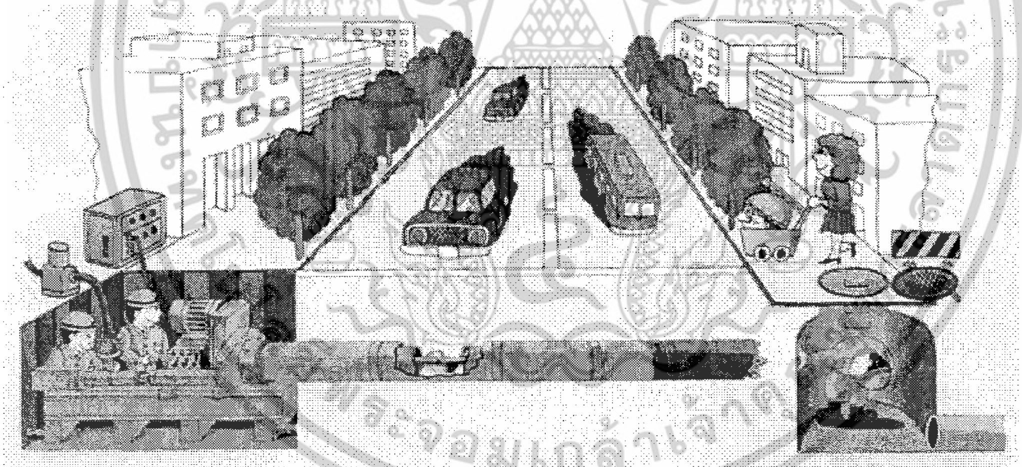
เป็นวิธีก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินโดยที่ไม่ต้องขุดเปิดผิวดินตลอดความยาวของท่ออีกวิธีหนึ่งหรือเรียกว่าวิธีการดันท่อ จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ดันท่อที่เรียกว่า Jacking Frame และจำเป็นต้องมีพื้นที่สำหรับติดตั้ง Jacking Frame

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การเปลี่ยนขนาดสายเคเบิลใต้ดิน การเปลี่ยนสายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุดและการเพิ่มจำนวนวงจร สามารถทำได้สะดวกโดยการลากสายเคเบิลใต้ดินใหม่ร้อยในท่อ Spare ที่ออกแบบเตรียมไว้
5) เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขึ้น เนื่องจากท่อถูกหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีความแข็งแรงทนทาน ทำให้สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดแก่สายเคเบิลใต้ดินได้ ไม่ทำให้เคเบิลอื่นๆ ที่วางใกล้กันเสียหาย

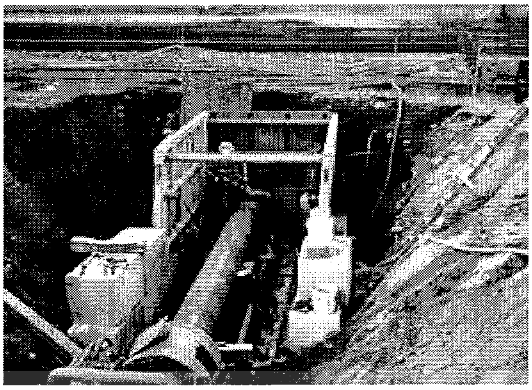
ข้อเสีย

1) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง เนื่องจากต้องใช้เครื่องจักรเฉพาะ และอุปกรณ์ที่ใช้ค่อนข้างมีราคาแพง
2) ความสามารถในการระบายความร้อนต่ำ จึงมีผลทำให้สายเคเบิลใต้ดินนำกระแสได้ต่ำ
3) การดัดโค้งเมื่อพบอุปสรรค ทำได้ลำบากมาก (ต้องใช้ระยะทางยาว)
4) ในกรณีที่ใช้ท่อ HDPE เป็นท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในสายเคเบิลใต้ดินจะเกิดความร้อนสูง สามารถทำให้ท่อหลอมละลาย เกิดความเสียหายและยากต่อการบำรุงรักษาเนื่องจากไม่สามารถลากสายเคเบิลใต้ดินออกมาได้



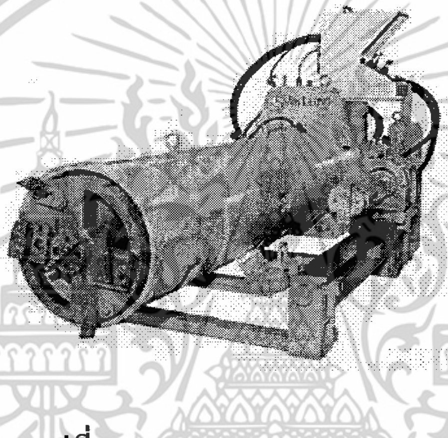
[ก]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ข]

รูปที่ 2.8 รูปจำลอง Pipe Jacking ผ่านใต้ถนน และ การ Pipe Jacking



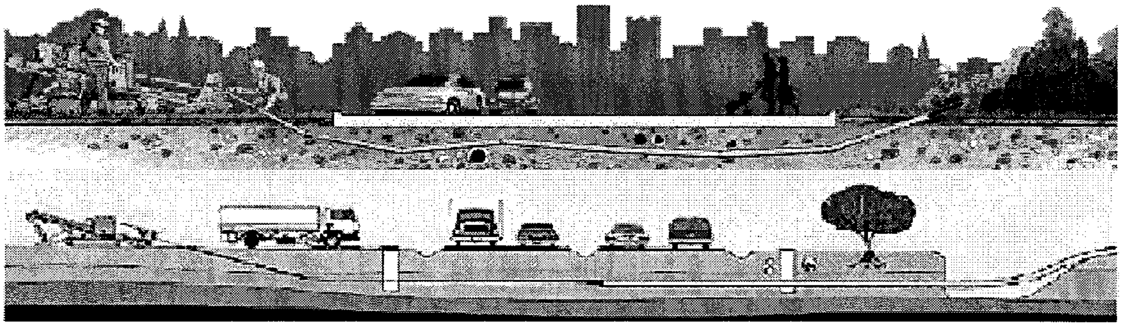
รูปที่ 2.9 Pipe Jacking Machine

โดยวิธีติดตั้งนี้จำเป็นต้องมีบ่อพักสาย (Manhole or Handhole) และบนพื้นดินจะต้องมีหลักบอกแนวท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน (Cable Route Marker) แสดงไว้ตามแนวท่อด้วย สำหรับวิธีนี้ตลอดความยาวของแนวท่อจะเป็นแนวตรงตลอดแต่อาจจะเป็นแนวโค้งได้เพียงเล็กน้อย

2.4.1.2.2 Horizontal Directional Drilling (HDD)

เป็นวิธีการก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินโดยที่ไม่ต้องขุดเปิดผิวดินตลอดความยาวของท่อซึ่งเมื่อพิจารณาถึงเรื่องของความสะดวกคล่องตัวในการทำงานแล้ว ระบบ Directional Drills นี้จะมีขีดความสามารถที่กว้างขวางกว่าวิธีการอื่นๆมาก กลุ่มท่อที่ก่อสร้างมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ซึ่งความสามารถในการควบคุมความลึกและทิศทาง รวมถึงความสามารถเจาะลากท่อในแนวโค้งหลบหลีกอุปสรรคสิ่งกีดขวางได้ จึงเป็นวิธีการวางท่อใต้ดินที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Horizontal Directional Drilling (HDD)

ข้อดี

1) เนื่องจากสามารถดำเนินการก่อสร้างเป็นช่วงๆได้ และไม่ต้องขุดร่อง จึงทำให้ลดปัญหาเกี่ยวกับการจราจรได้
2) ระยะเวลาในการก่อสร้าง น้อยกว่าการก่อสร้างประเภท Duct Bank
3) ความสามารถในการระบายความร้อนดีกว่าการก่อสร้างประเภท Duct Bank
4) การเปลี่ยนขนาดสายเคเบิลใต้ดิน การเปลี่ยนสายเคเบิลใต้ดินที่ชำรุด และการเพิ่มจำนวนวงจร สามารถทำได้สะดวกกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีฝังดินโดยตรง โดยการลากสายเคเบิลใต้ดินใหม่ในท่อ Spare ที่เตรียมไว้
5) เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขึ้น ไม่ทำให้เคเบิลอื่นๆ ที่วางใกล้กันเสียหาย

ข้อเสีย

1) มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง เนื่องจากต้องใช้เครื่องจักรเฉพาะ และอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาค่อนข้างแพง
2) เหมาะกับการก่อสร้างที่มีจำนวนวงจรน้อยๆทั้งนี้จำนวนวงจรขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องจักรในการลากท่อ
3) ท่อร้อยสายอาจได้รับความเสียหายจากการถูกขุดเจาะ รวมทั้งการเกิดการพังทลายของดิน ทำให้ท่อร้อยสายเสียหายได้ แต่ก็ยังสามารถช่วยป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับสายเคเบิลใต้ดินได้พอสมควร
4) เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในสายเคเบิลใต้ดินจะเกิดความร้อนสูง สามารถทำให้ท่อหลอมละลาย เกิดความเสียหายและยากต่อการบำรุงรักษาเนื่องจากไม่สามารถลากสายเคเบิลใต้ดินออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 บ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (Manhole and Handhole)

บ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน (Manhole and Handhole) สร้างขึ้นด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่วนใหญ่จะก่อสร้างอยู่ใต้ผิวถนนที่มีการจราจรของยานพาหนะต่างๆ และจะต้องรับน้ำหนักสูงสุดได้ 18 ตัน (Ton) ผนังด้านนอกของบ่อพักส่วนบนจะต้องอยู่ใต้ระดับผิวถนนไม่น้อยกว่า 40 ซม.บ่อพักจะมีฝาปิด (Manhole Frame and Cover) ทำด้วยเหล็ก ที่ก้นของบ่อพักจะต้องทำเป็นอ่างน้ำ (Sump) ไว้สำหรับสูบน้ำออกเมื่อเวลาจะทำงานในบ่อพัก ลักษณะของการจัดหน้าต่างของบ่อพักขึ้นอยู่กับการวางท่อที่จะออกจากบ่อพักนั้น ๆ บ่อพักที่มีขนาดเล็ก ๆ เราสามารถจะหล่อสำเร็จรูป และยกลงมาวางในที่ที่จะติดตั้ง แต่ถ้าเป็นบ่อพักขนาดใหญ่จำเป็นต้องก่อสร้างในที่ที่จะใช้งานเพราะน้ำหนักมาก สำหรับอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องติดตั้งพร้อมกับตัวบ่อพักมีดังนี้

1) Pulling Iron เป็นตัวช่วยในการลากสายเคเบิล
2) Anchor Bolt เป็นตัวยึด Cable Rack
3) Manhole Entrance Step เป็นตัวช่วยอำนวยความสะดวกในการลงไปปฏิบัติงานในบ่อพัก
4) Drive Hook มีลักษณะเป็นตะขอติดอยู่บนเพดานบ่อ มีไว้อำนวยความสะดวกในขณะทำงาน
5) Ground Rod เป็นตัวที่ใช้สำหรับต่อ Shield ของสายเคเบิลลงดินเพื่อลดอันตรายเนื่องจากสนามไฟฟ้า
6) อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

2.5 การเลือกขนาดสายเคเบิลใต้ดิน [9]

การเลือกขนาดสายเคเบิลใต้ดินจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับกระแสไหลผ่านตัวมัน ว่าเคเบิลนั้นสามารถรับกระแสได้เท่าไร สายเคเบิลใต้ดินแต่ละชนิดจะมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งการเลือกใช้สายเคเบิลใต้ดินแต่ละชนิดจะต้องหาค่าพิกัดกระแสที่เหมาะสมเพื่อการใช้งานที่ถูกต้องเหมาะสมกับโหลด ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดินมีอยู่ 3 อย่างคือ

1) อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้ โดยที่ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย ไม่เสียหาย สำหรับสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ในสภาวะจ่ายกระแสต่อเนื่อง ปกติสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 90 $^{\circ}C$ และในสภาวะฉุกเฉินสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 130 $^{\circ}C$
2) ความสามารถในการแพร่กระจายความร้อนของสายเคเบิลใต้ดิน ถ้าสายเคเบิลใต้ดินยิ่งมีองค์ประกอบมากชั้นยิ่งทำให้การแพร่กระจายความร้อนไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การติดตั้งและเงื่อนไขภายนอกอื่นๆเช่น

3.1) ความลึกในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

3.2) จำนวนวงจรที่อยู่ใกล้เคียง

3.3) อุณหภูมิแวดล้อม

3.4) ค่าความต้านทานความร้อนของดิน (Soil Thermal Resistivity)

3.5) รูปแบบของการต่อลงดินของสายเคเบิลใต้ดิน

จากตัวแปรต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้สายเคเบิลใต้ดินขนาดเดียวกันแต่ถ้าการติดตั้งและเงื่อนไขภายนอกอื่นๆต่างกัน ก็มีพิกัดกระแสไม่เท่ากันดังตารางที่ 2.3 โดยการคำนวณหาค่ากระแสใช้งานในตารางที่ 2.3 เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 287 โดยมีเงื่อนไขที่กำหนดดังนี้

1) ค่าโหลดแฟคเตอร์ 100%

2) อุณหภูมิตัวนำสูงสุด 90 $^{\circ}C$

3) อุณหภูมิโดยรอบ 30 $^{\circ}C$

4) ค่าความต้านทานความร้อนของดิน 1.2 K.m/W

5) การต่อลงดินเป็นแบบต่อลงดินทั้งสองปลาย

ตารางที่ 2.3 พิกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิลใต้ดิน ระบบจำหน่าย 22 และ 33 kV (ฉนวน XLPE) [9]

จำนวนวงจรทั้งหมด	กระแสที่กำหนดต่อวงจร (แอมป์)									
	ความลึกจากระดับดินถึงเคเบิล									
	ขนาดสาย 240 mm^2					ขนาดสาย 400 mm^2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	402	384	374	367	362	510	485	470	462	456
2	342	320	310	302	296	430	402	387	378	370
3	302	280	270	262	257	378	350	336	327	320
4	281	258	246	240	234	350	320	307	297	290
5	260	237	226	220	214	323	295	280	272	265
6	245	223	212	205	200	305	277	263	254	248
7	233	210	200	193	188	290	262	248	240	233
8	221	200	190	183	178	275	248	235	227	220
9	212	190	180	175	170	263	237	224	216	210
10	204	184	174	168	163	253	228	215	207	201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 แรงดึงในสายเคเบิลใต้ดิน (Pulling Tensions)

การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินในช่องเดินสายไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเป็นท่อและ เคเบิลเทรย์ จำเป็นจะต้องคำนึงถึงแรงดึง (Pulling Tensions) และแรงกดด้านข้าง (Sidewall Pressure) ทั้งนี้เพราะในการดึงสายเคเบิลใต้ดินไม่ว่าจะเป็นในแนวตรงหรือทางโค้ง อาจจะมีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินจนทำให้เคเบิลเสียหาย ซึ่งอาจจะส่งผลอันตรายตามมาภายหลัง จึงนับได้ว่าการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน จำเป็นที่จะต้องรู้เทคนิคและวิธีการเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าผู้ผลิตสายตัวนำที่มีฉนวนหุ้มจะได้ทำการผลิตสายตัวนำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ใช้งานแล้ว ยังมีความต้องการที่จะให้อายุการใช้งานของสายมีอายุที่ยาวนาน และยังต้องการให้การทำงานในการนำไฟฟ้าเป็นไปอย่างสมบูรณ์แต่ในบางครั้งด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของผู้ใช้บางรายอาจทำให้การติดตั้งสายตัวนำดังกล่าวเกิดความเสียหายขึ้นดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินอย่างถูกต้อง

2.6.1 ข้อจำกัดของการออกแบบในการติดตั้ง

2.6.1.1 แรงดึงในสายเคเบิลใต้ดิน (Pulling Tension)

เมื่อท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินได้ผ่านการตรวจสอบว่าใช้งานได้แล้ว ขั้นต่อไปก็คือการลากสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งแรงดึงในการลากสายเคเบิลใต้ดินขึ้นอยู่กับ

- ขนาดของสายเคเบิลใต้ดิน สายขนาดใหญ่หรือสายที่มีน้ำหนักมากย่อมต้องใช้แรงดึงมากกว่าสายขนาดเล็ก
- ขนาดของท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน ท่อขนาดใหญ่ย่อมลากสายได้ง่ายและใช้แรงดึงน้อยกว่าท่อขนาดเล็ก
- ความยาวของท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน ความยาวมากย่อมใช้แรงดึงมากตามไปด้วย
- แนวของท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน ท่อร้อยสายที่คดเคี้ยว จะต้องใช้แรงดึงมากกว่าท่อตรง

2.6.1.2 การลากสายเคเบิลใต้ดิน ทำได้ 2 วิธี คือ

2.6.1.2.1 ใช้พูลลิ่งอาย (Pulling Eye)

เหมาะสำหรับลากสายขนาดใหญ่ที่ต้องใช้แรงดึงมากๆ โดยจะบัดกรีพูลลิ่งอายติดกับสายตัวนำของสายเคเบิลใต้ดินหรือเป็นแบบอื่นๆก็ตาม แรงดึงที่มากที่สุดเมื่อลากโดยใช้พูลลิ่งอาย จะมุ่งประเด็นไปที่ต้องการให้สายตัวนำมีความปลอดภัยมากที่สุดเมื่อเกิดมีการดึงขึ้นโดยปกติแล้วค่าแรงดึงจะขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของตัวนำ ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน และวิธีในการดึงสายเคเบิลใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ตัวนำเป็นทองแดง จะมีค่าดังนี้

$$T_m = 0.008 \cdot NA_{CM}$$ หน่วย (ปอนด์ : lb) (2.1)

$$T_m = 7.162 \cdot NA_{mm}$$ หน่วย (กิโลกรัม : kg) (2.2)

ในกรณีที่ตัวนำเป็นอะลูมิเนียม จะมีค่าดังนี้

$$T_m = 0.004 \cdot NA_{CM}$$ หน่วย (ปอนด์ : lb) (2.3)

$$T_m = 3.581 \cdot NA_{mm}$$ หน่วย (กิโลกรัม : kg) (2.4)

โดยที่ T_m หมายถึง แรงดึงสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ (ปอนด์หรือกิโลกรัม)

A_{CM} หมายถึง พื้นที่หน้าตัด (circular mils)

A_{mm^2} หมายถึง พื้นที่หน้าตัด (mm^2)

N หมายถึง จำนวนตัวนำ

ในกรณีที่ดึงสายตัวนำเดี่ยวจำนวน 3 เส้น ค่า N จะมีค่าเท่ากับ 2 และในกรณีที่ดึงสายตัวนำเดี่ยวมากกว่า 3 เส้นขึ้นไป ที่มีขนาดเดียวกัน แรงดึงในสายไม่ควรเกิน 60% ของแรงดึงสูงสุดในแต่ละตัวนำ ดังนั้นจะได้ว่า

ในกรณีที่ตัวนำเป็นทองแดง จะมีค่าดังนี้

$$T_m = 0.0048 \cdot NA_{CM}$$ หน่วย (ปอนด์ : lb) (2.5)

$$T_m = 4.297 \cdot NA_{mm}$$ หน่วย (กิโลกรัม : kg) (2.6)

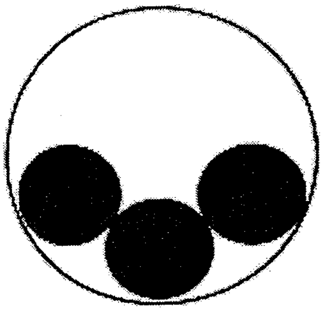
ในกรณีที่ตัวนำเป็นอะลูมิเนียม จะมีค่าดังนี้

$$T_m = 0.0024 \cdot NA_{CM}$$ หน่วย (ปอนด์ : lb) (2.7)

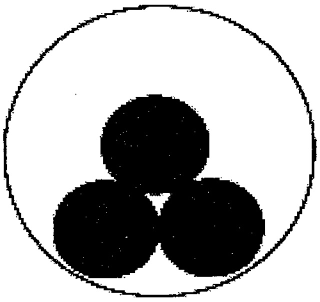
$$T_m = 2.148 \cdot NA_{mm}$$ หน่วย (กิโลกรัม : kg) (2.8)

ทั้งนี้ค่าแรงดึงสูงสุดสำหรับสายตัวนำแกนเดียวจำนวน 1 เส้นทุกกรณีดังกล่าวข้างต้น ไม่ควรมีค่าเกินกว่า 5,000 ปอนด์ (2,268 กิโลกรัม) และในกรณีที่มีสายตัวนำมากกว่าสองเส้นขึ้นไป ค่าแรงดึงสูงสุดไม่ควรมีค่าเกิน 6,000 ปอนด์ (2,722 กิโลกรัม) แต่ถ้าจะใช้ค่าแรงดึงในสายที่มากกว่าค่าลิมิตที่กำหนดไว้นี้ จะต้องได้รับการรับรองและยืนยันจากบริษัทผู้ผลิตก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) การจัดวางแบบกระทะหงาย



ข) การจัดวางแบบรูปสามเหลี่ยม

รูปที่ 2.11 การจัดวางสายเคเบิลใต้ดิน ภายในท่อร้อยสาย

2.6.1.2.2 ใช้พูลลิ่งกริป (Pulling Grip or Basket Grip)

แบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

2.6.1.2.2.1 สายเคเบิลใต้ดิน ชนิดที่มีปลอกตะกั่วหุ้ม

(Lead – sheathed cable) โดยใช้ชนิด basket-weave เป็นตัวจับ แรงดึงไม่ควรเกิน 1,500 ปอนด์ (680 กิโลกรัม) ต่อเส้น โดยที่ความหนาของเปลือกสายเคเบิลใต้ดินจะหาได้จากสูตร

$$T_m = K_m \pi t(D-t) \quad \text{หน่วย ปอนด์} \tag{2.9}$$

โดยที่	T_m	หมายถึง	แรงดึงสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ (ปอนด์หรือกิโลกรัม)
	t	หมายถึง	ความหนาของปลอกตะกั่ว (นิ้ว)
	D	หมายถึง	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิลใต้ดินฯ (นิ้ว)
	π	มีค่าคงที่เท่ากับ 3.14	
	K_m	มีค่า 200 – 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ขึ้นอยู่กับ Lead alloy)	

สำหรับสายเคเบิลใต้ดิน มีเปลือกสายเป็น นีโอพรีน (Neoprene jackets) ค่าแรงดึงสูงสุด จะ มีค่าไม่เกิน 1,000 ปอนด์ (453 กิโลกรัม)

2.6.1.2.2.2 สายเคเบิลใต้ดิน ชนิดที่เปลือกสายไม่ใช่ตะกั่ว

(Nonleaded jacketed cable) เช่น PVC และ PE เป็นต้น มีค่าแรงดึงสูงสุดเป็น

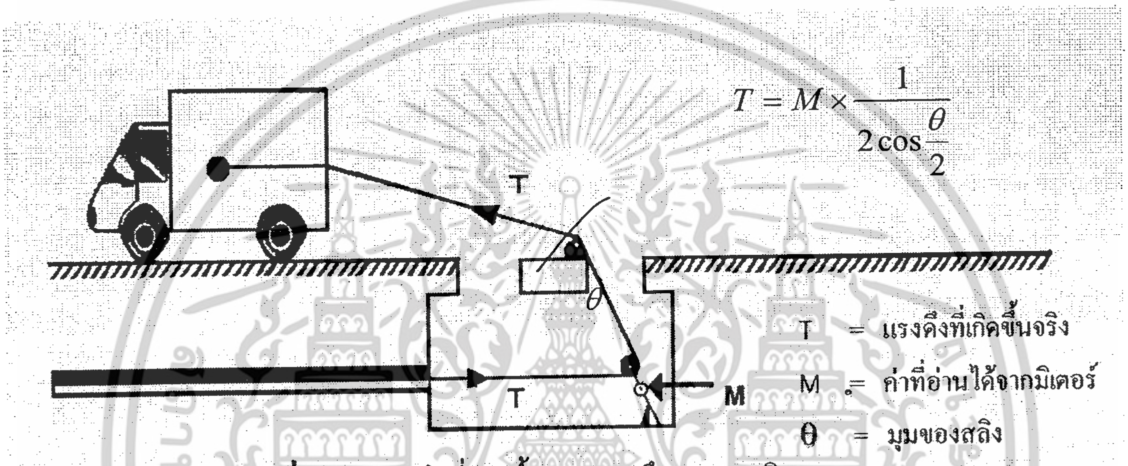
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_m = 1{,}000 \text{ ปอนด์ (453 กิโลกรัม) / เส้น} \quad (2.10)$$

ตามข้อ 2.6.1.2.2.1 และ 2.6.1.2.2.2 เป็นแรงดึงสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ ถือว่าเป็นค่าที่ปลอดภัยในการลากสายเคเบิลใต้ดิน โดยที่สายเคเบิลใต้ดินไม่เป็นอันตรายเนื่องจากการยืดตัวของสายตัวนำหรือเปลือกสาย ซึ่งจะมีผลทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลใต้ดินสั้นลง

2.6.1.3 สำหรับสายเคเบิลใต้ดินชนิด โคแอ๊คเชียล (Coaxial) ไทรแอ๊คเชียล (Triaxial) และชนิดพิเศษอื่น ๆ (Special cable)

แรงดึงสายเคเบิลใต้ดิน ควรจะเป็นไปตามข้อแนะนำของบริษัทผู้ผลิต



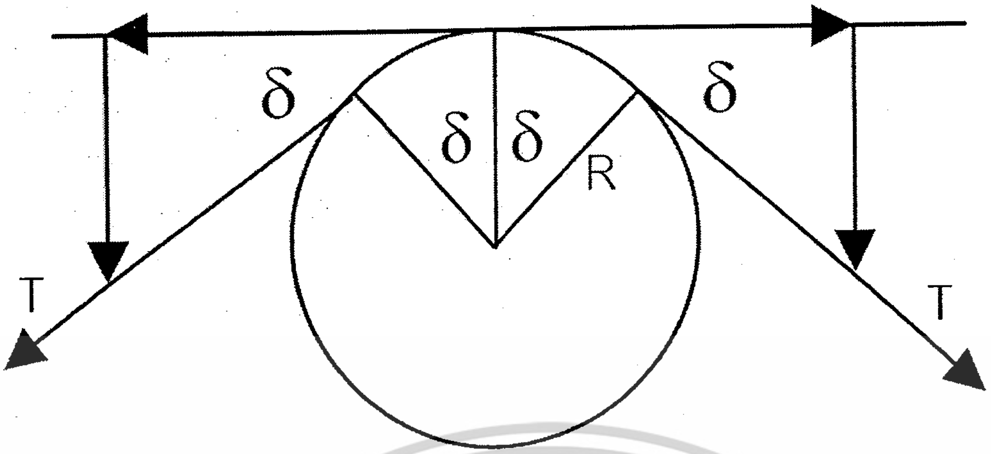
รูปที่ 2.12 แรงดึงที่เกิดขึ้นจากการดึงสายเคเบิล

2.6.1.4 แรงกดด้านข้าง (Side Wall Pressure)

เมื่อทำการดึงสายเคเบิลใต้ดิน ผ่านส่วนที่เป็นโค้งของช่องเดินสายไฟฟ้า เช่น ท่อร้อยสาย หรือกรณีที่ต้องการม้วนสายในล้อ ในกรณีดังกล่าวจะทำให้เกิดความดันขึ้นระหว่างสายเคเบิลใต้ดินฯ และท่อร้อยสายหรือล้อ ซึ่งแรงดันดังกล่าวจะอธิบายในเทอมของแรงดึงหารด้วยรัศมีความโค้ง หรือ T/R ถ้ามีแรงกดมากๆ จะทำให้ดึงลากเคเบิลลำบากหรือถ้าฝืนลากเคเบิลโดยใช้แรงดึงที่มากเกินค่าที่กำหนดไว้ จะทำให้เปลือกนอกของเคเบิลชำรุดได้

สำหรับตัวนำเดี่ยวแรงกดด้านข้างสูงสุดที่ยอมรับได้ จะมีค่า 300 ปอนด์/ฟุต (446.48 กิโลกรัม/เมตร กฟภ. จะใช้ค่าเป็น 450 กิโลกรัม/เมตร) นอกจากนี้ค่า T/R จะไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนมุมของทิศทาง เช่น การโค้งของตัวท่อร้อยสาย แต่จะขึ้นอยู่กับแรงดึงออกจากข้องอและรัศมีของการโค้งงอ ซึ่งรัศมีดังกล่าวก็คือ รัศมีด้านในของท่อนั่นเองโดยจะพิจารณาได้จากรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แรงกดด้านข้าง

แรงกดด้านข้าง (T/R) = แรงต่อหนึ่งหน่วยความยาว = $2T\sin\frac{\delta}{2R\delta}$ (2.11)

ในกรณีที่ δ มีค่าน้อย ทำให้ค่า sin δ มีค่าเท่ากับ δ ดังนั้น

$$2T\sin\frac{\delta}{2R\delta}=\frac{T}{R} \quad (2.12)$$

สามารถสรุปค่าแรงกดด้านข้างของสายเคเบิลใต้ดิน ที่ใช้ภายใน กฟภ. ได้ดังนี้

- ดึงเคเบิล 1 เส้น/ท่อ

$$SWP = \frac{T_{out}}{R} \quad (2.13)$$

- ดึงเคเบิล 3 เส้น/ท่อ (กรณีสายเคเบิลใต้ดิน วางแบบ Cradled)

$$SWP = (3C-2)\frac{T_{out}}{3R} \quad (2.14)$$

- ดึงเคเบิล 3 เส้น/ท่อ (กรณีสายเคเบิลใต้ดิน วางแบบ Triangular)

$$SWP = C\frac{T_{out}}{2R} \quad (2.15)$$

โดยที่ T_{out} หมายถึง แรงดึงที่ออกจากท่อโค้ง (ปอนด์หรือกิโลกรัม)

R หมายถึง รัศมีด้านในของท่อ (ฟุตหรือเมตร)

C หมายถึง Weight-correction factor

2.6.1.5 Jam ratio หรือเรียกว่า Jamming

เป็นค่าที่จะประเมินได้ว่าสายเคเบิลใต้ดิน ที่ร้อยอยู่ในท่อร้อยสาย เมื่อดึงลากสายแล้ว มีโอกาสที่จะเกิดการไขว้ตัวหรือพันกันจนไม่สามารถดึงสายต่อไปได้หรือไม่ และยังใช้เป็นค่าสำหรับพิจารณาความประหยัดและความสะดวกในการดึงสาย ซึ่งสามารถสรุปเป็นสูตรได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายเคเบิลใต้ดิน จำนวนไม่เกิน 3 เส้น ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน ร้อยอยู่ภายในท่อเดียวกัน

$$\text{Jam ratio} = 1.05\frac{D}{d} \tag{2.16}$$

โดยที่ d = เส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลใต้ดิน (มม.)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อร้อยสายไฟฟ้า (มม.)

- สายเคเบิลใต้ดิน จำนวนมากกว่า 3 เส้น ร้อยอยู่ภายในท่อเดียวกัน

$$\text{Jam ratio} = \frac{3D}{(n_1d_1 + n_2d_2 + n_3d_3 + ... + ..)} \tag{2.17}$$

โดยที่ D หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อร้อยสายไฟฟ้า (มม.)

$n_1, n_2, n_3, ...$ หมายถึง จำนวนสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 2, 3, ...

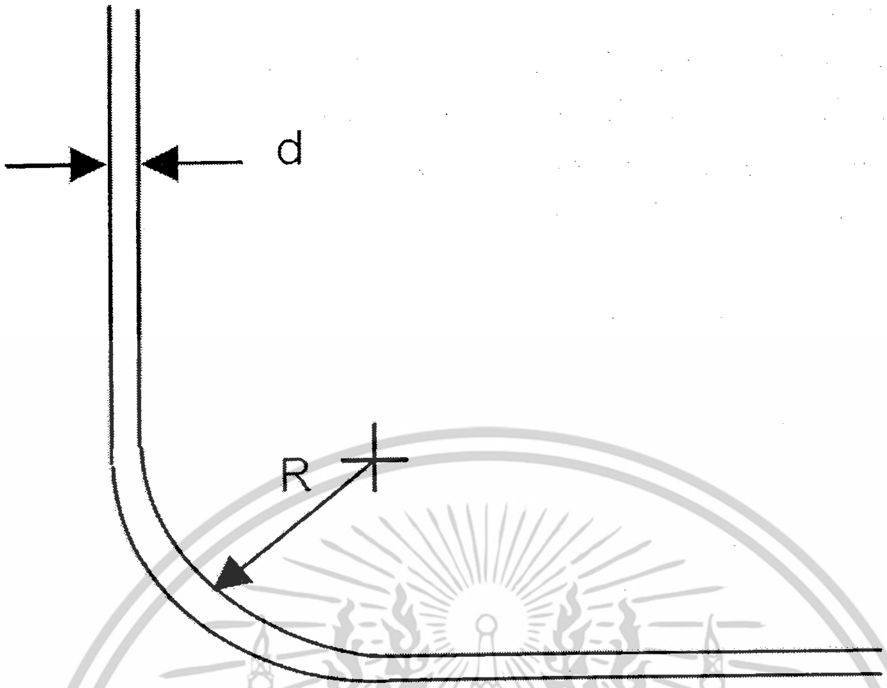
$d_1, d_2, d_3, ...$ หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลใต้ดิน กลุ่มที่ 1, 2, 3, ..

ซึ่งค่า Jamming ratio จะลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนสายเคเบิลใต้ดิน โดยปกติแล้ว Jam ratio ที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.8 – 3.0 เป็นช่วงค่าที่ไม่เหมาะสมสำหรับการดึงลากสาย และถ้า Jam ratio มีค่าต่ำกว่านี้แล้ว เมื่อมีการดึงสายเคเบิลใต้ดิน ย่อมจะเกิดอันตรายต่อสายเคเบิลใต้ดิน ค่าที่ต่ำกว่า 2.8 จึงยิ่งไม่สมควรให้ใช้งาน แต่จะมีความเหมาะสมใช้งานได้ที่ค่า jamming ratio มีค่ามากกว่า 3.0 เท่านั้น (ร้อยสายได้ง่าย) ซึ่งปัจจุบัน กฟภ. ได้กำหนดเป็นตารางการใช้งานท่อร้อยสายกับสายเคเบิลใต้ดิน ที่เหมาะสมไว้แล้ว ซึ่งจะมีค่า Jam ratio มากกว่า 3.0

2.6.1.6 การโค้งงอของสายเคเบิลใต้ดิน (Cable Bending)

การดึงลากสายเคเบิลใต้ดิน ภายในท่อช่วงทางโค้ง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสายเคเบิลใต้ดิน และยิ่งติดตั้งในเคเบิลเทรย์หรือแร็ค การดึงลากสายย่อมจะก่อให้เกิดความเสียหายมากขึ้น ทั้งนี้เพราะเป็นแผ่นโลหะ (Sheet metal) และมีสกรูหรือโบลต์ที่เป็นตัวทำให้ฉนวนเสียหายได้ เป็นผลให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายเคเบิลใต้ดินเสื่อมสภาพอันเกิดจากแรงดึงหรือแรงกดที่กระทำต่อด้านข้าง (Side Wall Pressure) ดังนั้นสิ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ คือ รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลใต้ดิน โดยยิ่งมีค่ามาก ค่าแรงกดที่กระทำต่อด้านข้างยิ่งลดลง ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายเคเบิลใต้ดิน ให้ดียิ่งขึ้นตามที่ได้กล่าวมาแล้ว รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลใต้ดิน จะมีความสำคัญอย่างยิ่งในการดึงลากสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่ง กฟภ.ได้กำหนดเป็นค่ามาตรฐานใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การโค้งงอของสายเคเบิลใต้ดิน

2.6.1.5.1 สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงต่ำและคอนโทรลเคเบิล

R (รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลใต้ดิน) อย่างน้อยเท่ากับ 12 d

2.6.1.5.2 สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง

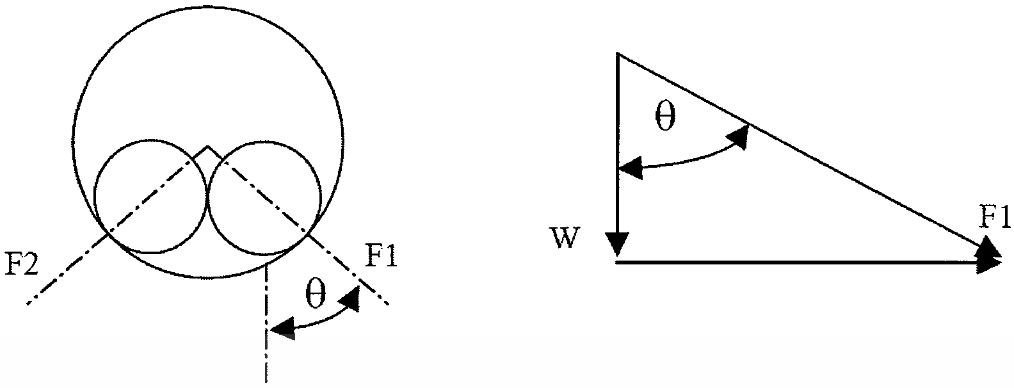
R (รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลใต้ดิน) อย่างน้อยเท่ากับ 15 d

โดยที่ d หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสายเคเบิลใต้ดิน (OD) (มม.)

2.6.1.6 Weight - Correction Factor (C)

เมื่อมีการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินในช่องเดินสายไฟฟ้า และมีจำนวนของสายเคเบิลใต้ดินมากกว่าหนึ่งเส้น ในกรณีเช่นนี้จะมีแรงลัพธ์เกิดขึ้น โดยแรงลัพธ์ทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่ระหว่างสายเคเบิลใต้ดิน กับท่อร้อยสาย ซึ่งจะมีค่ามากกว่าน้ำหนักรวมทั้งหมดของสายเคเบิลใต้ดิน ดังนั้น Weight - Correction Factor จะกำหนดได้จาก Sum(F) / Sum(w) โดยที่ W จะหมายถึงน้ำหนักของสายเคเบิลใต้ดิน ในรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงถึงการคำนวณ Weight Correction Factor ของสายเคเบิลใต้ดิน สองเส้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน

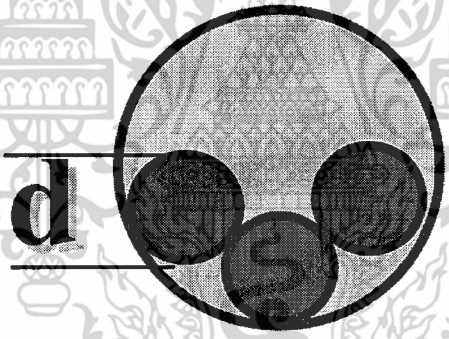
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



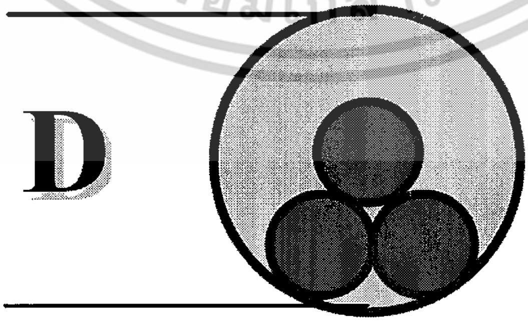
โดยที่ $F_1 = \frac{W}{\cos\theta} = F_2$ ดังนั้น $\frac{(F_1 + F_2)}{2W} = C$

รูปที่ 2.15 การหาค่า Weight - Correction Factor (C) ของสายเคเบิลใต้ดิน 2 เส้น

สำหรับการคำนวณค่า Weight - Correction Factor ภายในการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) จะสรุปค่าที่นำไปใช้งาน โดยจำนวนสายเคเบิลใต้ดิน ภายในท่อไม่เกิน 3 เส้นเท่านั้น ซึ่งสรุปได้ดังนี้



แบบ Cradled : $C = 1 + \left(\frac{4}{3}\right)\left[\frac{d}{D-d}\right]^2$ (2.18)



แบบ Triangular : $C = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{d}{D-d}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$ (2.19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ d หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสายเคเบิลใต้ดิน (OD) (มม.)

D หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อร้อยสาย (ID) (มม.)

การจะเลือกใช้ค่า C แบบใดนั้นจะต้องหาอัตราส่วนระหว่าง D/d ก่อน นั่นคือ หาก D/d > 3.0 ค่า C จะใช้เป็นกรณีแบบ Cradled และ D/d < 2.5 ค่า C จะใช้เป็นกรณีแบบ Triangular ค่าอัตราส่วนระหว่าง D/d ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 2.5 - 3.0 จะทำให้เกิด Jamming ในการออกแบบควรหลีกเลี่ยงไม่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่าง D/d อยู่ในช่วงค่าดังกล่าว

2.7 การดึงสายเคเบิล

1.จากการตรวจสอบจะเห็นว่าทิศทางการดึงลากสายเคเบิลใต้ดินที่แตกต่างกัน จะทำให้ได้ค่าแรงดึงใช้งานที่แตกต่างกันและมีผลทำให้สายอาจชำรุดได้

2.ส่วนใหญ่ค่าแรงดึงที่ใช้งานจะไม่เกินค่าแรงดึงสูงสุดของสายเคเบิลใต้ดิน แต่ปัญหาที่พบบ่อยๆ และเป็นจุดสำคัญ (แต่มักมองข้าม) คือ ค่าแรงกดที่สายเคเบิลใต้ดินกระทำกับผนังภายในท่อ (Side wall Pressure) เพราะส่วนใหญ่ในช่วงเข้าโค้ง ถ้ารัศมีช่วงเข้าโค้งสั้นๆ จะมีปัญหานี้เกิดขึ้นทันที อีกประเด็นหนึ่งก็คือ ทิศทางที่ป้อนสายควรจะป้อนในจุดที่ใกล้ช่วงทางโค้งหรือที่จุดโค้งจะทำให้ลดแรงกดที่ผนังท่อด้านในได้มาก

2.8 ความปลอดภัยในการปฏิบัติงานระบบเคเบิลใต้ดิน

งานใดก็ตามเมื่อทำเสร็จและมีความปลอดภัยด้วย ย่อมนำความสบายใจมาให้ผู้ปฏิบัติงาน ในทางตรงข้ามงานใดก็ตามเมื่อทำเสร็จแล้วแต่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้นในงานนั้น ย่อมนำความยุ่งยากลำบากใจมาให้ผู้ปฏิบัติงาน การปฏิบัติงานระบบเคเบิลใต้ดินเป็นงานที่มีอันตรายปะปนอยู่ทุกขั้นตอนของการดำเนินงาน อันตรายซึ่งจะมาจากบุคคลภายนอกที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยเป็นไปได้เสมอ เช่น ผู้ขับขี่ยวดยานพาหนะขับรถมาชนขณะปฏิบัติงานอยู่กลางถนน หรือจากเพื่อนพนักงานจากหน่วยงานอื่นที่มาทำงานเกี่ยวข้องกันอาจสับสวิตช์จ่ายไฟฟ้าเข้าไปในสายเคเบิลดิน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานที่สายเคเบิลดิน ได้รับอันตราย ซึ่งนอกจากที่กล่าวแล้ว อันตรายอาจเกิดขึ้นจากผู้ทำงานสายเคเบิลดินโดยทำงานไว้ไม่เรียบร้อย เมื่อใช้งานในระยะหนึ่งสายเคเบิ้ลดินนั้นอาจเกิดชำรุด ทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจร ระเบิดขึ้นได้ขณะมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ใกล้ๆ ทำให้ได้รับอันตรายได้ ดังนั้น การปฏิบัติงานใดๆ ก็ตาม ประการแรกก็จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยที่จะเกิดขึ้นทั้งในระหว่างปัจจุบันและอนาคตด้วยเสมอ การป้องกันที่ดีประการหนึ่งคือ การทำงานอย่างมีขั้นตอน มีระบบการตรวจวัดได้ มีการทดสอบที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

2.9.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

มาตรฐาน IEC 60520-1 :

สำหรับทดสอบสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดตั้งแต่ 0.6/1 kV ถึง 1.8/3 kV

มาตรฐาน IEC 60520-2 :

สำหรับทดสอบสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดตั้งแต่ 3.6/6 kV ถึง 18/30 kV

มาตรฐาน IEC 60840 :

สำหรับทดสอบสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดเกินกว่า 30 kV (Um= 36 kV) ถึง 150 kV (Um= 170 kV)

มาตรฐาน มอก. 2202-2547 :

สำหรับทดสอบสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดเกินกว่า 30 kV (Um= 36 kV) ถึง 150 kV (Um= 170 kV)

หมายเหตุ : โดยมาตรฐานของตัวนำเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60228

2.10 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60520-2

1. Partial Discharge Test:

ทดสอบที่แรงดัน 1.73Uo และค่า PD ต้องไม่เกิน 5 pC

2. Bending Test: Followed by a Partial Discharge Test:

การทดสอบจะดัดโค้งงอในทิศทางไปและกลับ 3 ครั้ง และนำไปทดสอบ PD ตามข้อ 1

3. Tan Delta Measurement:

ทำการ Heating ตัวนำให้ได้อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการวัดค่า Tan Delta

4. Heating Cycle Test: Followed by a Partial Discharge Test:

ทำการ Heating ตัวนำให้ได้อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาในการ Heating 8 ชั่วโมง และมีระยะเวลาในการปล่อยให้ตัวนำเย็นลงหรือ Cooling อย่างน้อย 3 ชั่วโมง โดยทำการ Heating และ Cooling 20 รอบ

5. Impulse Test: Followed by a A.C Voltage Test:

ทำการ Heating ตัวนำให้ได้อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส และทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบอย่างละ 10 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Voltage Test for 4h:

จ่ายแรงดันไฟฟ้า $4U_0$ 4 ชั่วโมง โดยผลการทดสอบจะต้องไม่เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนเกิดขึ้น

2.11 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดินที่ดำเนินการโดยโรงงานผู้ผลิต

ได้มีการแบ่งประเภทของการทดสอบออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.11.1 การทดสอบแบบเฉพาะหรือการทดสอบรับรอง (Type Test)

2.11.2 การทดสอบแบบประจำ (Routine Test)

2.11.3 การทดสอบแบบสุ่มตัวอย่าง (Sample Test)

2.11.1 การทดสอบแบบเฉพาะหรือการทดสอบรับรอง (Type Test)

เป็นการทดสอบที่ทำก่อนนำผลิตภัณฑ์เข้าสู่ท้องตลาด เพื่อแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่เป็นน่าพอใจ ซึ่งต้องการการทดสอบที่สมบูรณ์เป็นหลักฐานเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องทดสอบซ้ำ ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในวัสดุประกอบของสายไฟฟ้า หรือการออกแบบ หรือกระบวนการผลิต ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

2.11.1.1 Partial discharge test (PD Test)

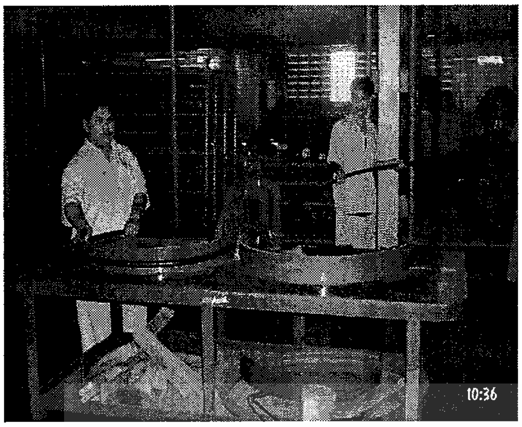
การทดสอบปฏิบัติตาม IEC 60885-2 ก่อนทำการทดสอบให้ทำการ Calibrate เครื่องมือวัด PD ด้วยPD Calibrator 5 pC ให้เรียบร้อยก่อนป้อนแรงดันทดสอบเพิ่มถึง 2 U_0 แล้วลดลงมาอยู่ที่ 1.73U_0 จึงวัดค่า PD ในการทดสอบต้องให้แน่ใจว่าไม่ทำการทดสอบในขณะที่มี PD Background (Harmonic หรือ Noise ในระบบ) ในระดับสูง โดยปกติจะทำในระหว่างการทำ Routine test เมื่อผลิตเสร็จ **เกณฑ์ตัดสินต้องมีค่า PD ไม่เกิน 5 pC**

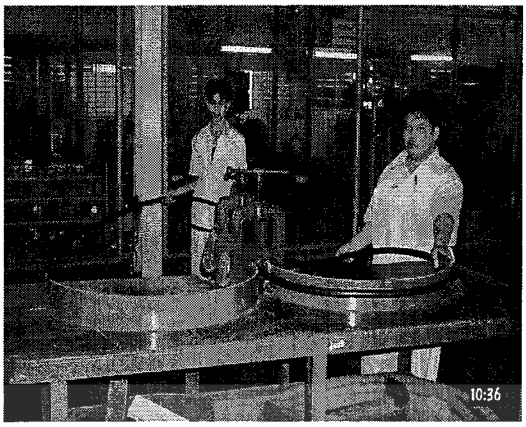
2.11.1.2 Bending test

เป็นการทดสอบจำลองสภาพการติดตั้งใช้งาน โดยใช้ตัวอย่างสายเคเบิลใต้ดินยาวอย่างน้อย 10 เมตรมาดัดโค้งงอรอบทรงกระบอก ที่อุณหภูมิห้องทดสอบอย่างน้อย 1 รอบทรงกระบอก หลังจากนั้นคลายออกแล้วดัดโค้งงอรอบทรงกระบอก ในทิศทางตรงกันข้ามนับเป็น 1 ครั้ง จะต้องดัดโค้งงอทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำตัวอย่างที่ทดสอบความโค้งงอแล้ว มาวัดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial discharge) เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอกที่ใช้ทดสอบต้องไม่น้อยกว่า

- 25(d+D) + 5 % สำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่มีตัวป้องกันน้ำโดยรอบเป็นตะกั่ว ตะกั่วเจือโลหะลูกฟูก หรือห่อด้วยเทปโลหะบางตลอดความยาว
- 20(d+D) + 5 % สำหรับสายเคเบิลใต้ดินประเภทอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.16 การโค้งงอสายเคเบิลในทิศทางไปและกลับ 1 รอบ จำนวน 3 ครั้ง ตามมาตรฐาน IEC 60502-2

2.11.1.3 Tan δ Measurement

การวัดค่า ทำที่อุณหภูมิระหว่าง 95-100 องศาเซลเซียส โดยป้อนแรงดันอย่างต่ำ 2 kV (แนะนำให้ใช้แรงดันเท่ากับ U_0) ค่าที่ได้ต้องไม่มากกว่า 1×10^{-4} ที่ค่า 80×10^{-4} เป็นค่าที่สูงเกินไป

2.11.1.4 Heating cycle test

ใช้ Current transformer ป้อนกระแสเข้าตัวนำเป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของตัวนำอยู่ระหว่าง 95-100 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 2 ชั่วโมงสุดท้าย (ชั่วโมงที่ 7-8) อุณหภูมิต้องอยู่ในช่วงที่กำหนด โดยหลังจากป้อนกระแสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วตัดกระแสออก ปล่อยให้ตัวอย่างสายเคเบิลใต้ดินเย็นลงอย่างน้อย 3 ชั่วโมง ทำอย่างนี้ 20 รอบ (ไม่มีการป้อนแรงดันในขณะที่ป้อนกระแส และไม่มีการกำหนดช่วงเวลาและอุณหภูมิการปล่อยให้เย็นตัวของสายเคเบิลใต้ดินหลังจากทำครบ 20 รอบ ซึ่งต่างจากใน IEC 60840 หรือ มาตรฐานอื่นๆที่มีการกำหนด) หลังจากนั้นให้ทำการทดสอบ Partial discharge test อีกครั้ง

2.11.1.5 Impulse voltage test, followed by power frequency voltage test

เป็นการทดสอบแรงดัน Impulse ที่กำหนด ทางบวกและทางลบอย่างละ 10 ครั้ง (125 kV และ 170 kV สำหรับสายเคเบิลใต้ดิน 22 kV และ 33 kV ตามลำดับ) ในขณะที่สายเคเบิลใต้ดินมีอุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส สายเคเบิลใต้ดินต้องไม่มีการ breakdown ระหว่างการทดสอบ แล้วทำการทดสอบ voltage test ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะต้องปล่อยสายเคเบิลใต้ดินเย็นลงโดยทิ้งไว้อย่างน้อย 3 ชั่วโมงหลังจากทดสอบ Impulse แล้วป้อน A.C. Voltage ที่ $3.5U_0$ เป็นเวลา 15 นาที เพื่อตรวจสอบการ Breakdown ภายหลังจากทดสอบ Impulse voltage test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 การทดสอบความทนทานไฟฟ้าหลังจากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์

รูปที่ 2.18 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

รูปที่ 2.19 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.1.6 Voltage test for 4 hours

เป็นการป้อนแรงดันทดสอบในเวลานานๆ จะต้องกระทำในทุกงวดการผลิตโดยตัวอย่างที่ทดสอบต้องมีความยาวอย่างต่ำ 5 ม. ค่อยๆ เพิ่มแรงดันทดสอบจนถึงค่า $4U_0$ คงแรงดันไว้ 4 ชั่วโมง **ต้องไม่เกิดการ Breakdown** การทดสอบนี้จะทำให้อายุของสายเคเบิลใต้ดินสั้นลงกว่าที่คาดการณ์ไว้ ถ้าทำกับสายเคเบิลใต้ดินทั้งเส้น

2.11.1.7 Resistivity of semi-conducting screens

ทำการวัดค่าความต้านทานของ Conductor Screen และ Insulation Screen ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทั้งก่อนและหลังเร่งอายุโดยการนำตัวอย่างใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที แล้วจึงวัดขนาดของชิ้นตัวอย่างและคำนวณตามวิธีที่มาตรฐานกำหนด เพื่อหาค่าสภาพต้านทาน

ค่า resistivity ของ conductor screen ต้องมีค่าน้อยกว่า 1000 Ω-m

ค่า resistivity ของ insulation screen ต้องมีค่าน้อยกว่า 500 Ω-m

2.11.1.8 Measurement of dimensions

ทำการวัดค่าความหนาของชั้นฉนวนและส่วนประกอบต่างๆ เพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างที่ทดสอบเป็นสายเคเบิลใต้ดินปกติที่ไม่ได้มีการปรับเพิ่มเพื่อให้ผ่านการทดสอบ และในระหว่างการตรวจวัดมิติ ขนาดต่างๆ จะต้องตรวจสอบวัสดุที่ใช้ทำด้วย (Raw Material)

2.11.1.9 Test for determining the mechanical properties of insulation before and after ageing.

เป็นการตรวจสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของฉนวน (Tensile strength & Elongation, at break) ก่อนและหลังการเร่งอายุใช้งาน

2.11.1.10 Test for determining the mechanical properties of non–metallic sheath before and after ageing

เป็นการตรวจสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของ non – metallic sheath (Tensile strength & Elongation ,at break) ก่อนและหลังการเร่งอายุใช้งาน

2.11.1.11 Water absorption test on insulation

การทดสอบนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อจะดูว่าฉนวนจะมีการดูดซึมน้ำหรือไม่ โดยนำตัวอย่างฉนวนมาชั่งหาน้ำหนักอย่างละเอียดก่อน แล้วจุ่มลงในน้ำร้อนในระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นนำมาวัดน้ำหนักของฉนวนอีกครั้ง ซึ่งจะรวมการดูดซึมของน้ำไว้แล้ว โดยปกติผลการทดสอบจะได้ค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 การทดสอบประจำ (Routine Tests)

เป็นการทดสอบที่ทำโดยผู้ผลิตบนความยาวแต่ละความยาวของสายเคเบิลใต้ดินที่ผลิตแต่ละเส้น เพื่อตรวจสอบว่าตลอดความยาวของสายเคเบิลใต้ดินทั้งหมดที่ผลิตแต่ละเส้นเป็นไปตามข้อกำหนดRoutine tests

2.11.2.1 Measurement of the conductor resistance

การทดสอบนี้กระทำทุกๆ ความยาวที่ผลิต ทำการวัดเมื่อสายเคเบิลใต้ดินมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม โดยจะต้องนำสายเคเบิลใต้ดินที่จะวัดไปวางในห้องที่มีอุณหภูมิคงที่เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ค่าความต้านทานตัวนำที่วัดได้ต้องทำการแปรผันไปที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความยาว 1 กิโลเมตร การแปรค่าความต้านทานเป็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำได้จากสูตร

$$R_{20} = \frac{R_t \times 245.5}{(234.5+t)} \times \frac{1000}{L} \quad \text{หน่วย } \Omega\text{/km for Cu}$$

$$R_{20} = \frac{R_t \times 248}{(228+t)} \times \frac{1000}{L} \quad \text{หน่วย } \Omega\text{/km for Al}$$

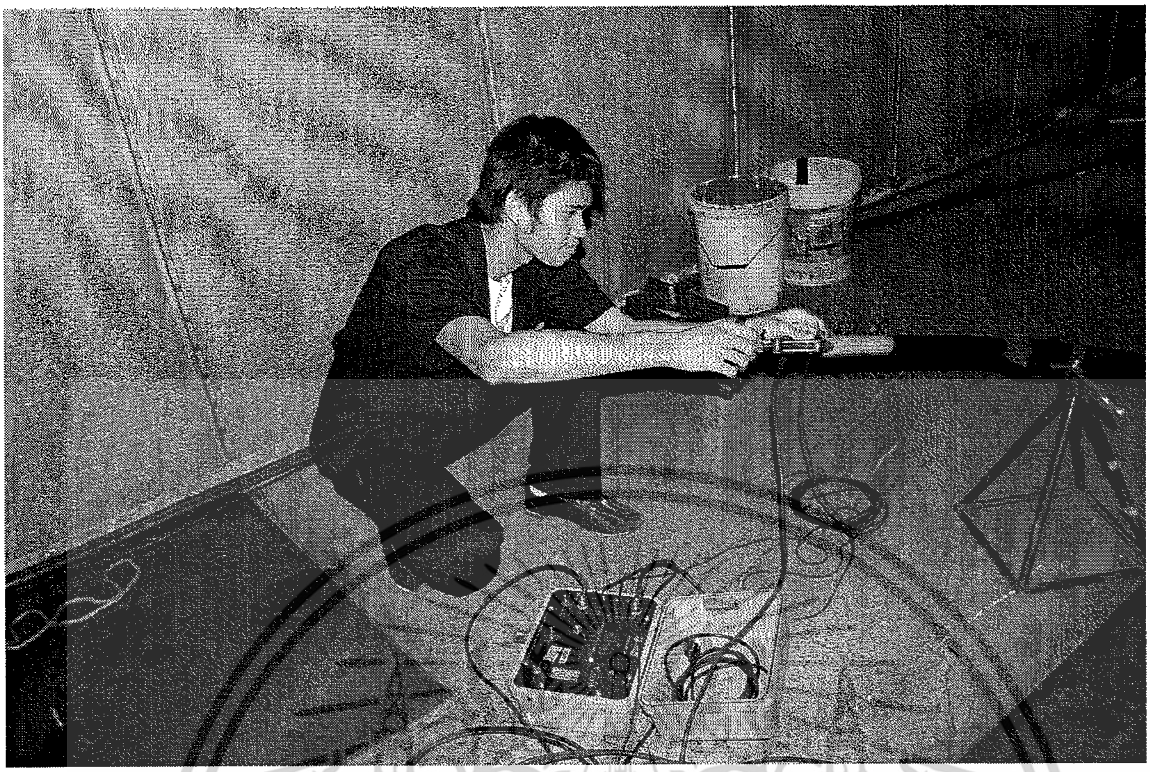
โดยที่ R_t = ความต้านทานของสายเคเบิลใต้ดินยาว L เมตรที่อุณหภูมิ t หน่วย Ω/km

t = อุณหภูมิของสายเคเบิลใต้ดินขณะที่วัด หน่วย เซลเซียส

L = ความยาวสายเคเบิลใต้ดินที่ทำการวัด หน่วย เมตร

ค่า Correction factor สำหรับปรับอุณหภูมิ ดูเพิ่มเติมใน IEC 60228

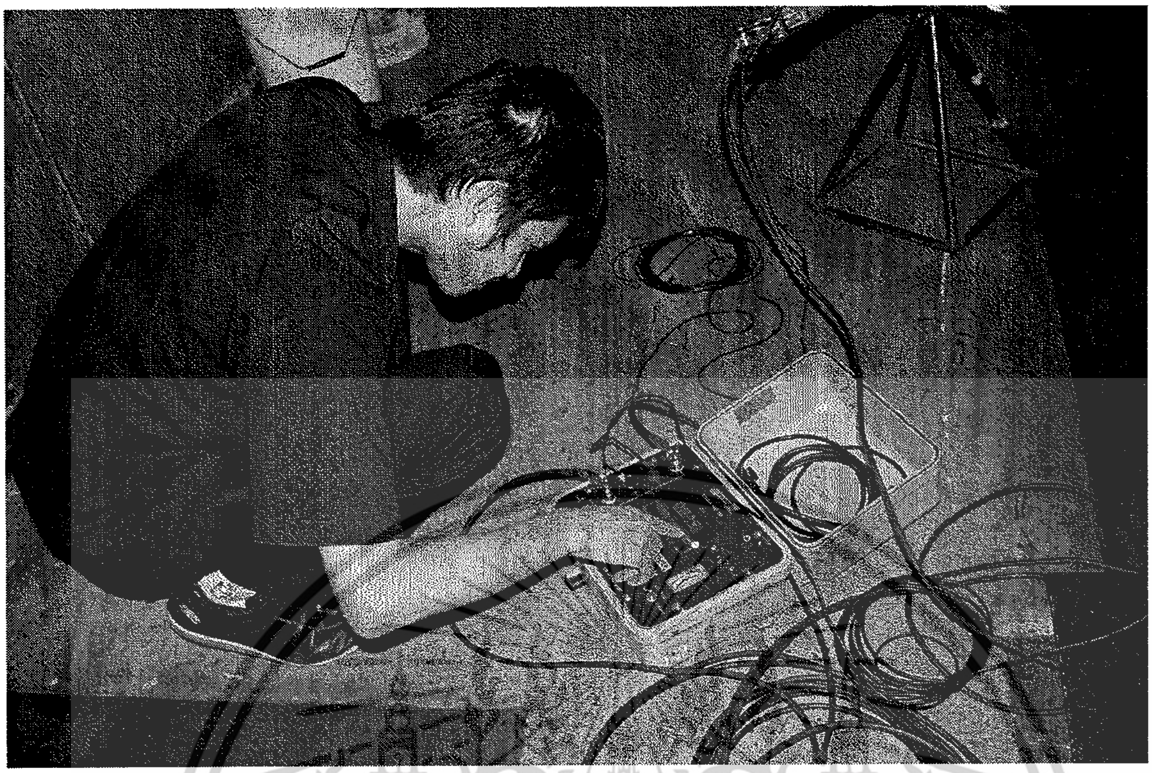
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



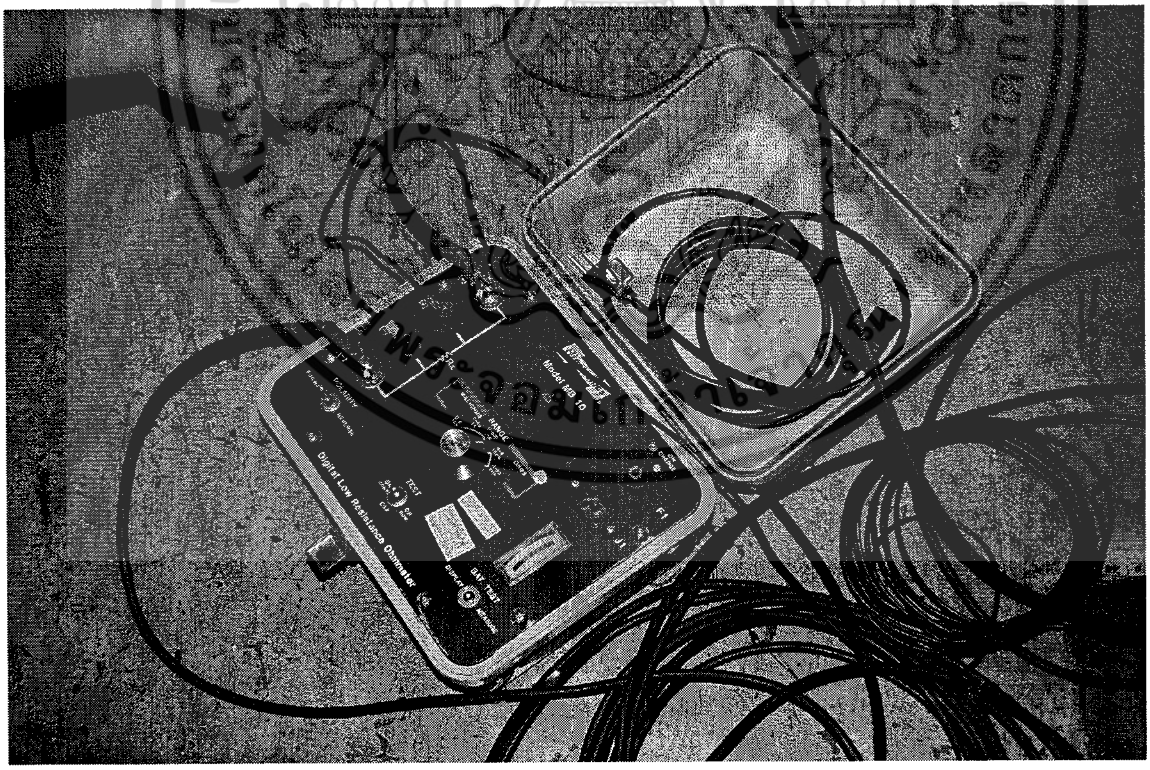
[ก]

[ข]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ค]



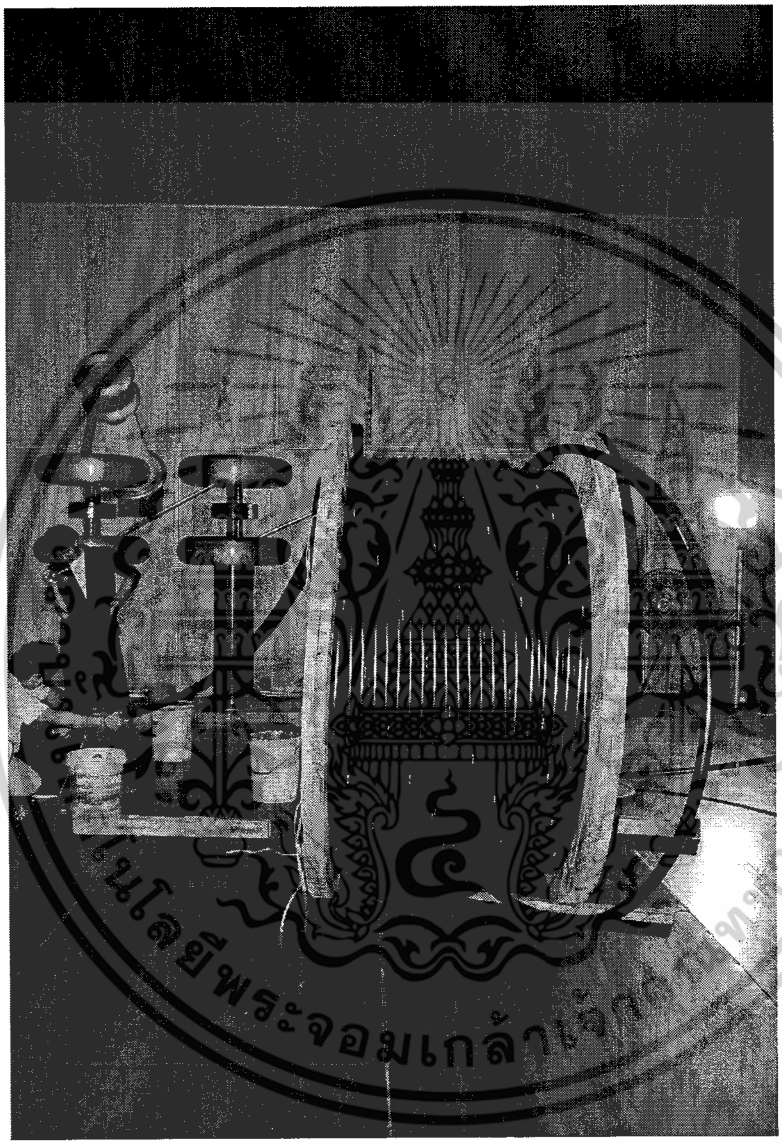
[ง]

รูปที่ 2.20 การวัดค่าความต้านทานของตัวนำทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2.2 Partial discharge test

การทดสอบจะทำเหมือนกันทุกประการกับการทดสอบใน Type test การวัดจะวัดตลอดความยาวสาย **ค่า PD สูงสุดต้องไม่เกิน 10 pC** แต่ค่านี้ค่อนข้างจะสูงไป โดยปกติเคเบิลที่วัด PD แล้วมีค่าสูงๆ จะต้องสงสัยตั้งข้อสังเกตไว้ก่อน



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบ

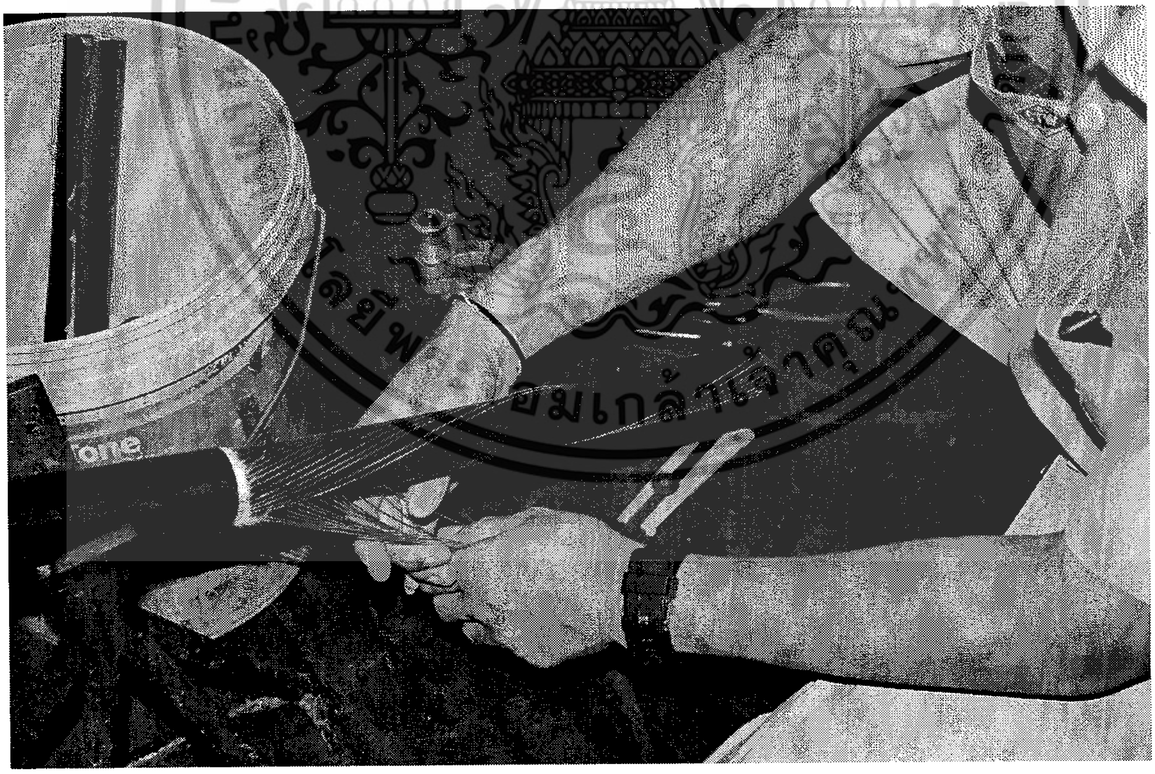
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[ก] ขั้นตอนการปอกเปลือกนอก (Jacket) ของสายเคเบิล

[ข] สายเคเบิลเมื่อปอกชั้นเปลือกนอกออกแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

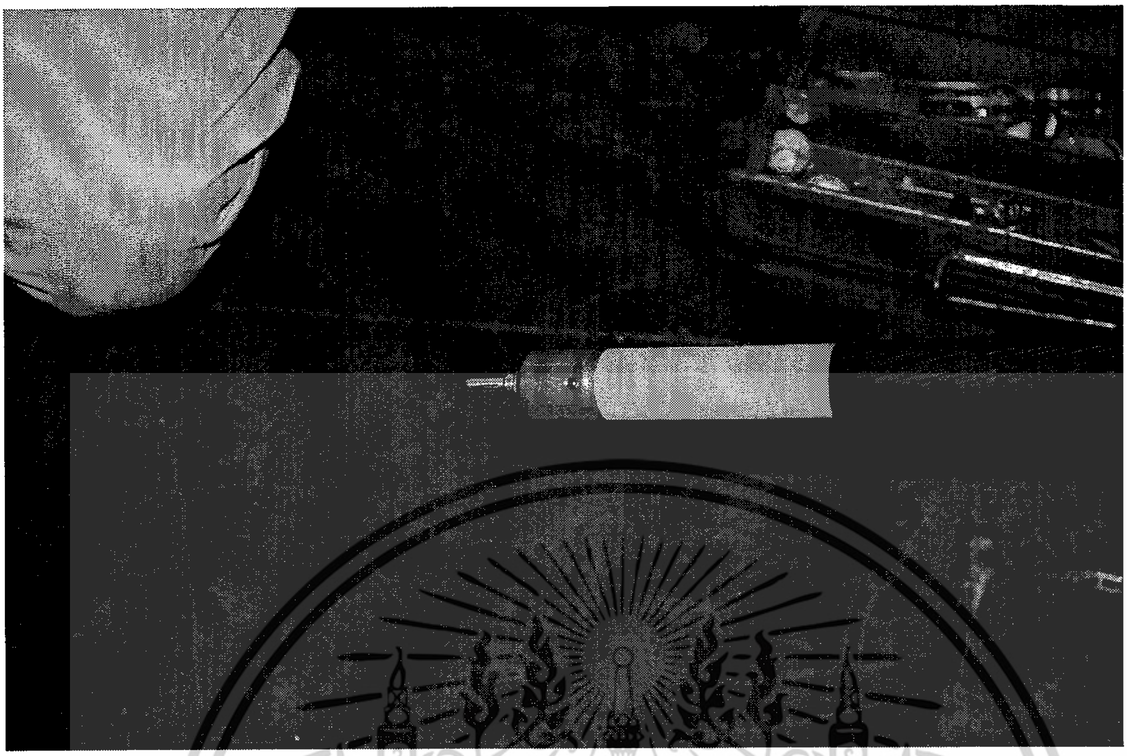
[ค] การลอกชั้น Protective tape



[ง] การเก็บสายกราวด์ของเคเบิลเพื่อเตรียมการทดสอบ

รูปที่ 2.22 การปอกสายเคเบิลเพื่อทำการทดสอบ

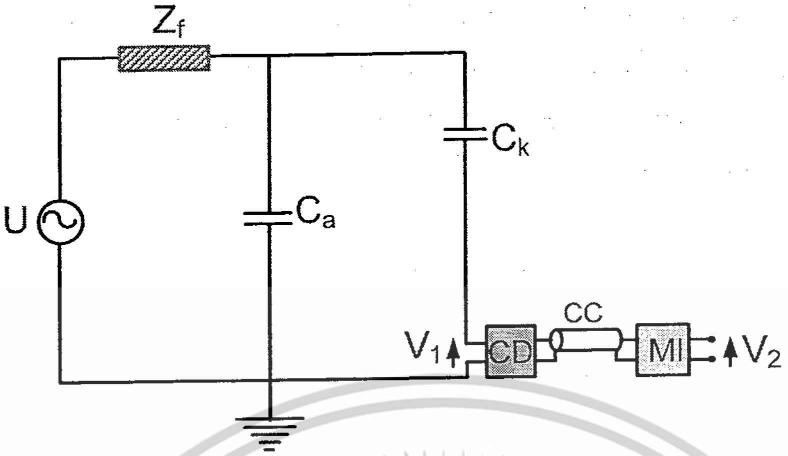
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 หัวต่อสายเคเบิลประกอบเข้ากับสายเคเบิล

รูปที่ 2.24 การต่อปลายสายเคเบิลภายในหัวต่อสายชนิดน้ำมัน เพื่อลดโคโรน่าขณะทดสอบ

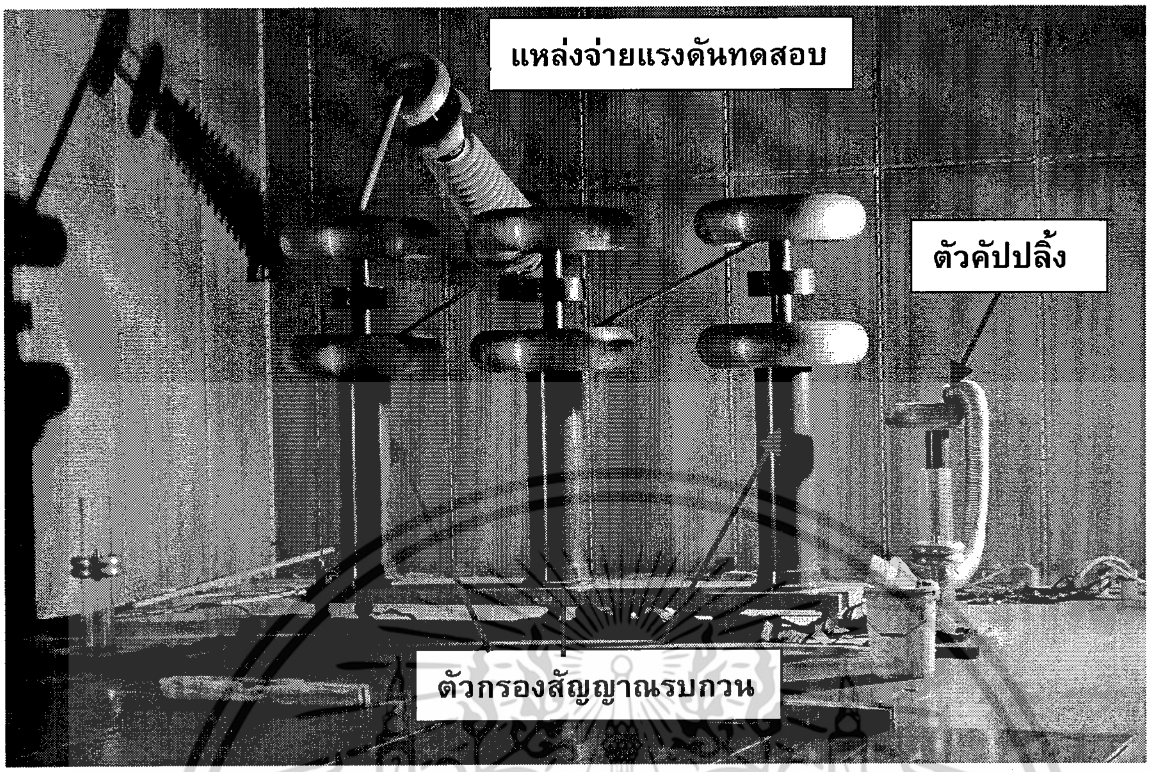
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 วงจรพื้นฐานสำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

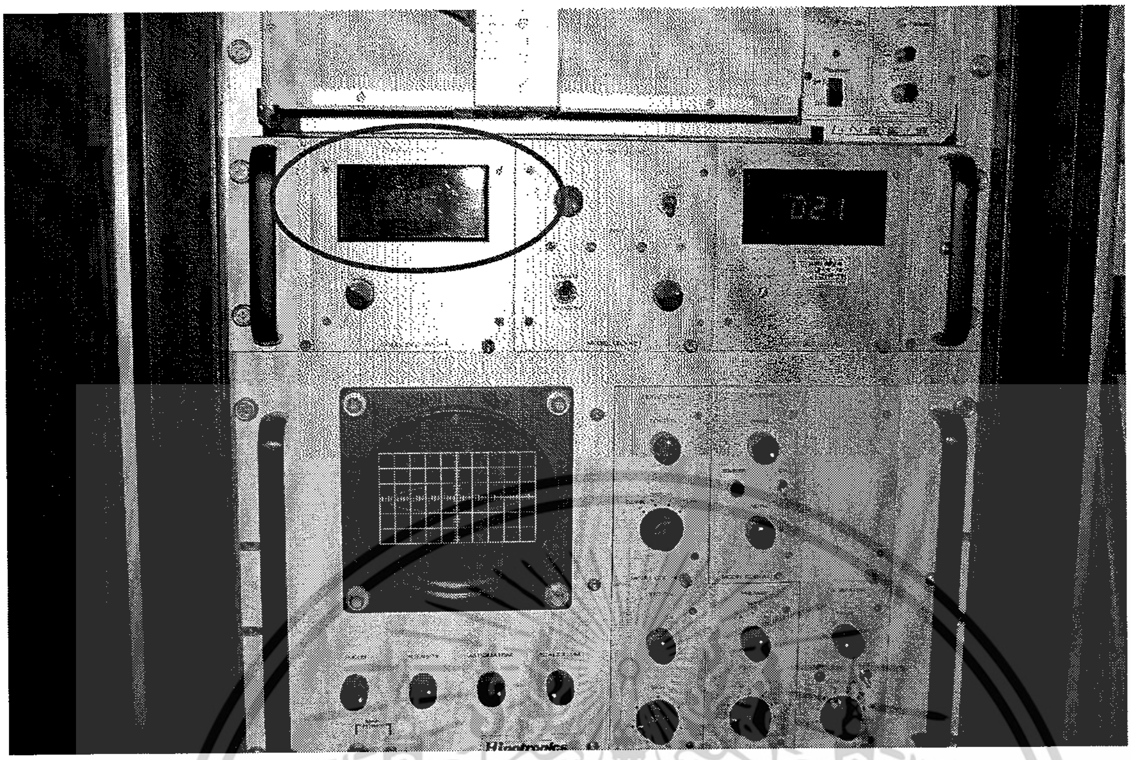
U	=	แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ
Z_f	=	ตัวกรองสัญญาณรบกวน
C_a	=	วัสดุทดสอบ
C_k	=	ตัวคัปปลิ้ง
CD	=	ตัวรับสัญญาณ
CC	=	สายส่งสัญญาณ
MI	=	เครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

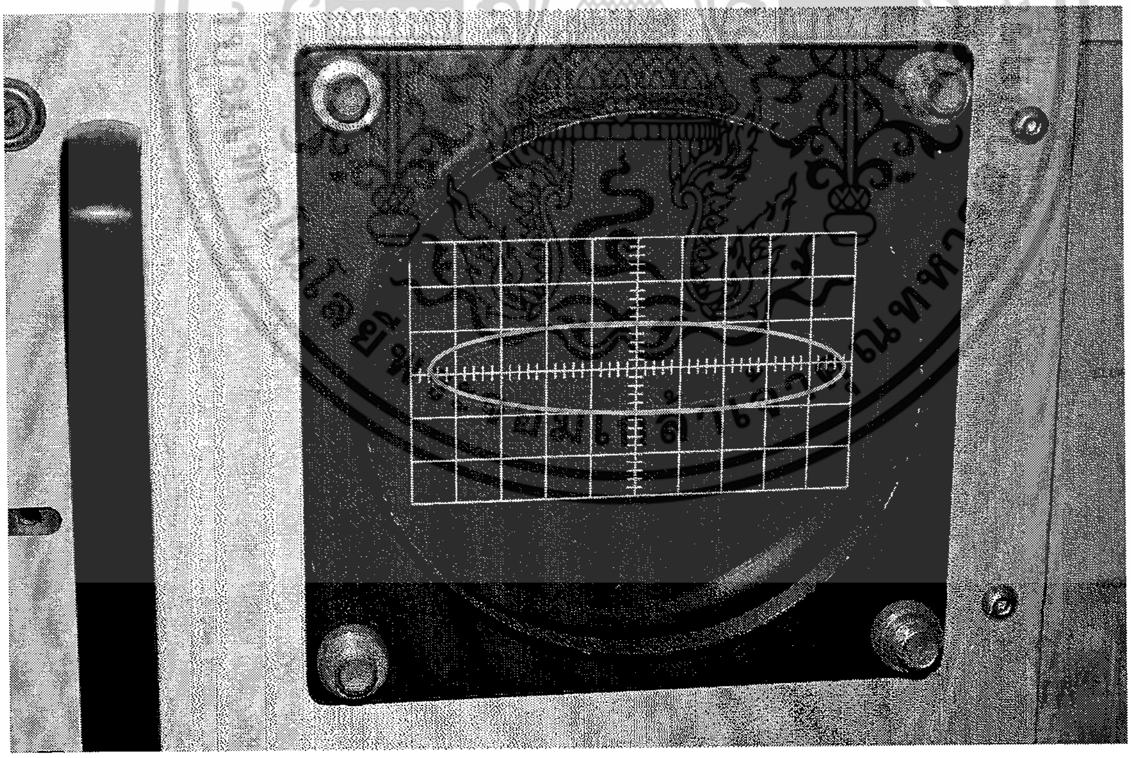


รูปที่ 2.26 รูปวงจรการทดสอบ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ค่า PD ที่ได้จากการทดสอบ

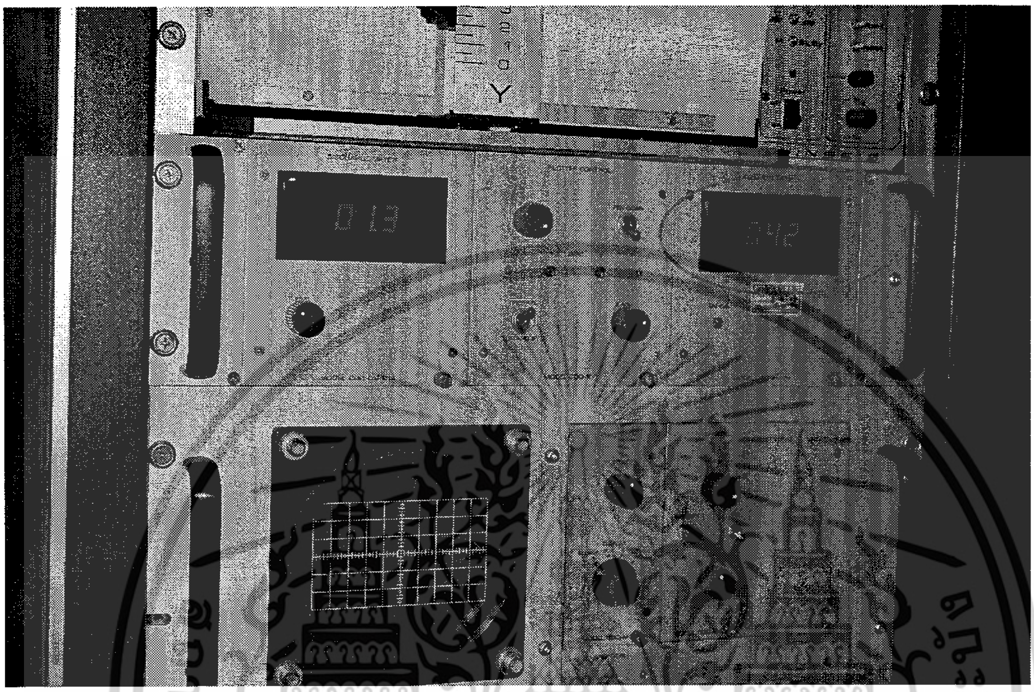


รูปที่ 2.28 สัญญาณ PD ที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2.3 Voltage test

จะทำทุกๆ ความยาวสายทุก Reel โดยค่อยๆ เพิ่มป้อนแรงดันระหว่างตัวนำและสาย Shield จนถึงค่า $3.5U_0$ แล้วคงแรงดันไว้ **เป็นเวลา 5 นาที ต้องไม่เกิดการ Breakdown**



รูปที่ 2.29 ค่าแรงดันที่ป้อน เพื่อทดสอบ AC Withstand

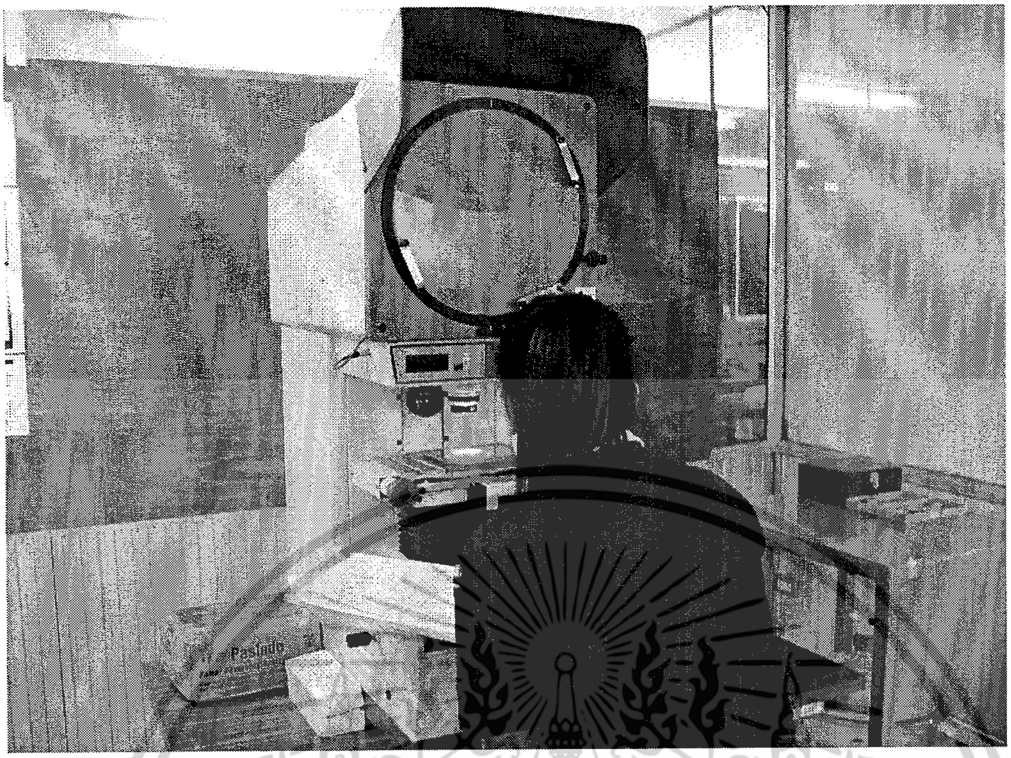
2.11.3 การทดสอบตัวอย่าง (Sample Tests)

เป็นการทดสอบที่ทำกับตัวอย่างสายเคเบิลใต้ดินในแต่ละแบบและครั้งที่ทำการผลิต

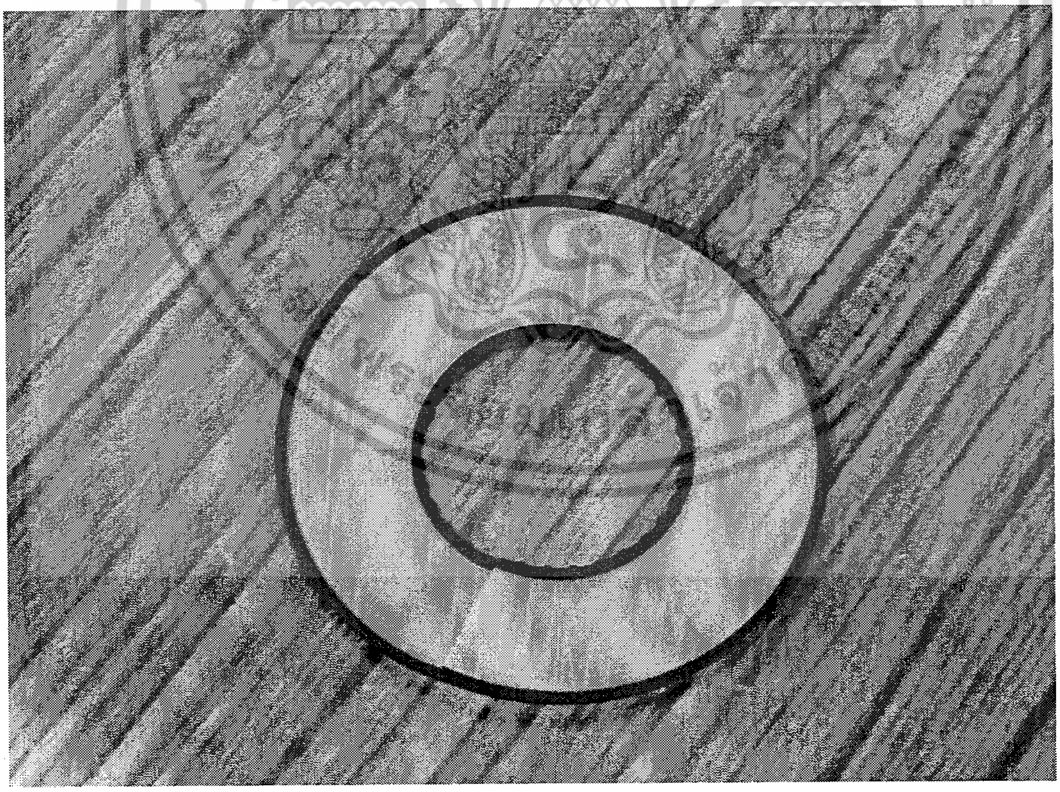
2.11.3.1 Check of construction and dimensions

ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและขนาดมิติของตัวอย่างเทียบกับค่าที่กำหนดอย่างน้อยหนึ่งตัวอย่างต่อการผลิตแต่ละงวด จำนวนที่ตรวจสอบไม่เกิน 10% ของความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 การวัดความหนาฉนวนและชั้นเครื่องป้องกันตัวนำและฉนวน



รูปที่ 2.31 ชิ้นตัวอย่างในการนำมาตรวจสอบขนาดความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 construction and dimensions

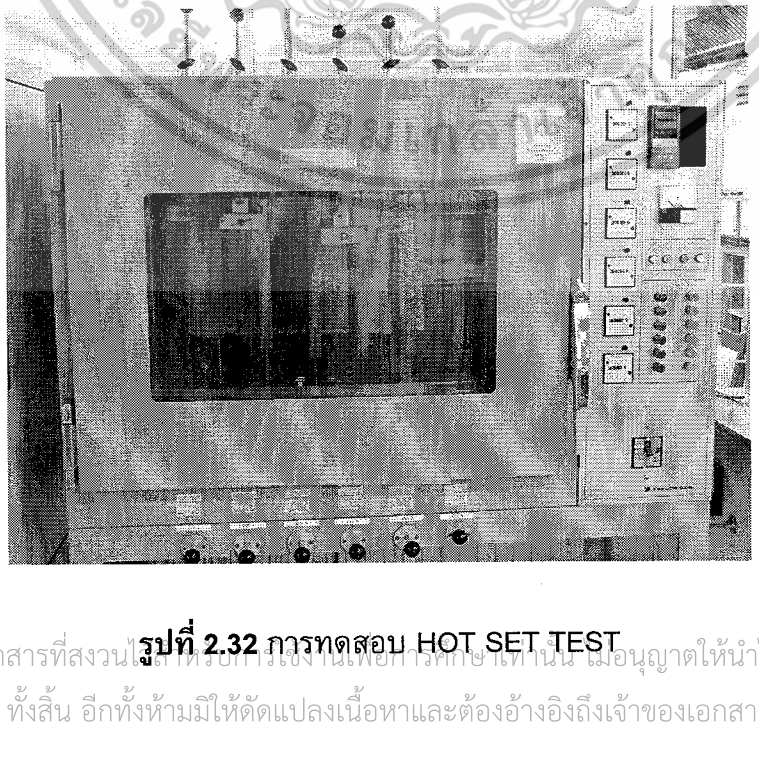
ความยาวสายทั้งหมด (เมตร)	ความยาวสายต่อรีล (เมตร)	10 % (เมตร)	จำนวนรีลที่สุ่มเลือก
6000	500	600	2
3000	500	300	1

2.11.3.2 Voltage test for 4 hours

เป็นการป้อนแรงดันทดสอบในเวลานานๆ จะต้องกระทำในทุกงวดการผลิตโดยตัวอย่างทดสอบต้องมีความยาวอย่างต่ำ 5 เมตร. ค่อยๆ เพิ่มแรงดันทดสอบจนถึงค่า $4U_0$ คงแรงดันไว้ 4 ชั่วโมง ต้องไม่เกิดการ Breakdown การทดสอบนี้จะทำให้อายุของสายเคเบิลใต้ดินสั้นลงกว่าที่คาดการณ์ไว้ ถ้าทำกับสายเคเบิลใต้ดินทั้งเส้น

2.11.3.3 Hot-set test

การทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบการทำ Cross-linking ว่าดีพอหรือไม่ หากวัสดุมีการ Cross-linking ที่ดีก็จะมีคุณสมบัติทนอุณหภูมิใช้งานที่สูง โดยการนำตัวอย่างจากบริเวณชั้นใน กลาง และ นอก ของฉนวน นำมาถ่วงน้ำหนัก 20 N/cm^2 และนำเข้าเตาอบที่ อุณหภูมิ 200 ± 3 องศาเซลเซียส ถ้าวัสดุมีการ Cross-linking ไม่ดีจะมีค่า elongation เกินกว่าที่กำหนด (เช่น ตัวอย่างอาจขาด) โดยปกติส่วนของฉนวนที่มี Cross-linking ต่ำจะเป็นส่วนชั้นในที่ใกล้ตัวนำที่สุด อย่างไรก็ตามหากในระหว่างการผลิตมีการให้ความร้อนกับตัวนำ ฉนวนส่วนกลางจะมี Cross-linking ต่ำ



รูปที่ 2.32 การทดสอบ HOT SET TEST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 Repetition of tests

ในกรณีที่ตัวอย่างที่ทดสอบแล้วไม่ผ่านจะต้องสุ่มเพิ่มเป็น 2 เท่า จากตัวอย่างที่ผลิตในงวดเดียวกัน และจะต้องส่งผลการทดสอบเช่นเดียวกับในรายการที่ทดสอบไม่ผ่าน ถ้าตัวอย่างที่สุ่มเพิ่มเติมผ่านการทดสอบ จึงจะยอมรับ แต่ถ้า 1 หรือ 2 ตัวอย่างในจำนวนที่สุ่มเพิ่มเติมนี้ไม่ผ่านการทดสอบถือว่าไม่ผ่านการทดสอบ อย่างไรก็ตามการยอมรับหรือไม่ขึ้นอยู่กับการเจรจากันระหว่างผู้ผลิตและลูกค้า โดยปกติเพื่อให้การทดสอบยอมรับกันทั้งสองฝ่าย จะมีการสุ่มตัวอย่างเพิ่มมากกว่า 2 ตัวอย่าง

2.13 พิกัดแรงดันที่ใช้ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC 60502 มีดังนี้

ตารางที่ 2.5 พิกัดแรงดันที่ใช้ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC 60502 [16]

U_0 (kV)	3.6	6	8	12	18
U (kV)	6	10	5	20	30
U_m (kV)	7.2	12	17.5	24	36

U_0 = แรงดันเฟสเทียบกับกราวด์

U = แรงดันเฟส-เฟส

U_m = แรงดันสูงสุดของระบบ

2.14 ไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น

FEM หรือ Finite Element Method เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้หาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำตอบที่ได้สามารถนำไปใช้ในงานวิเคราะห์และออกแบบได้หลายแขนงสาขา เช่น

- วิศวกรรมโยธา: truss, beam, frame, plate, dam, vibration, earthquake
- วิศวกรรมเครื่องกล: heat transfer, machine, vehicle
- CFD: การไหลของของเหลว และก๊าซ, อากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ และเครื่องบิน
- วิศวกรรมไฟฟ้า: electromagnetic, piezoelectric
- โลหะการ: metal forming
- การแพทย์: biomechanics

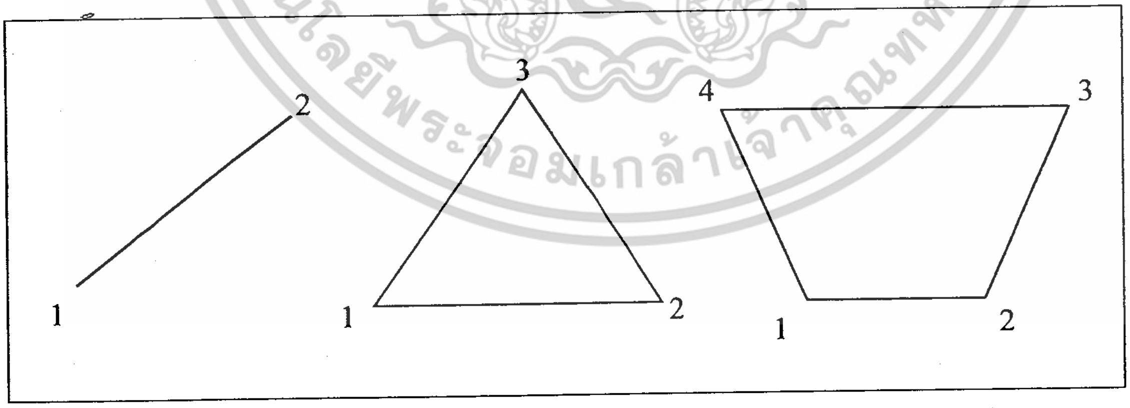
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วย FEM

1) ระบุและทำความเข้าใจกับปัญหาให้ชัดเจน ปัญหามีกี่มิติ , เกี่ยวกับเวลาหรือไม่ , เงื่อนไขขอบเป็นอย่างไร ฯลฯ
2) เลือกสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาดังกล่าว เพราะสมการเชิงอนุพันธ์จะเป็นตัวกำหนดชนิดของ solver FEM ที่เลือกใช้
3) ทำความเข้าใจกับหน่วยของปริมาณ และ material property ที่เกี่ยวข้องในสมการ
4) สร้างรูปเรขาคณิต ปกติจะใช้โปรแกรมตระกูล CAD
5) สร้างเอลิเมนต์ย่อย หรือ mesh แบบ { 1, 2, 3 } มิติให้สอดคล้องกับปัญหา
6) กำหนดค่า material property โดยต้องรัดกุมเกี่ยวกับหน่วยของปริมาณ
7) กำหนด boundary condition
8) หาคำตอบโดยใช้โปรแกรม FEM
9) ทำการแปลความหมายผลลัพธ์ ตรวจสอบความถูกต้อง visualization ก่อนนำข้อมูลไปใช้งาน Analysis/design

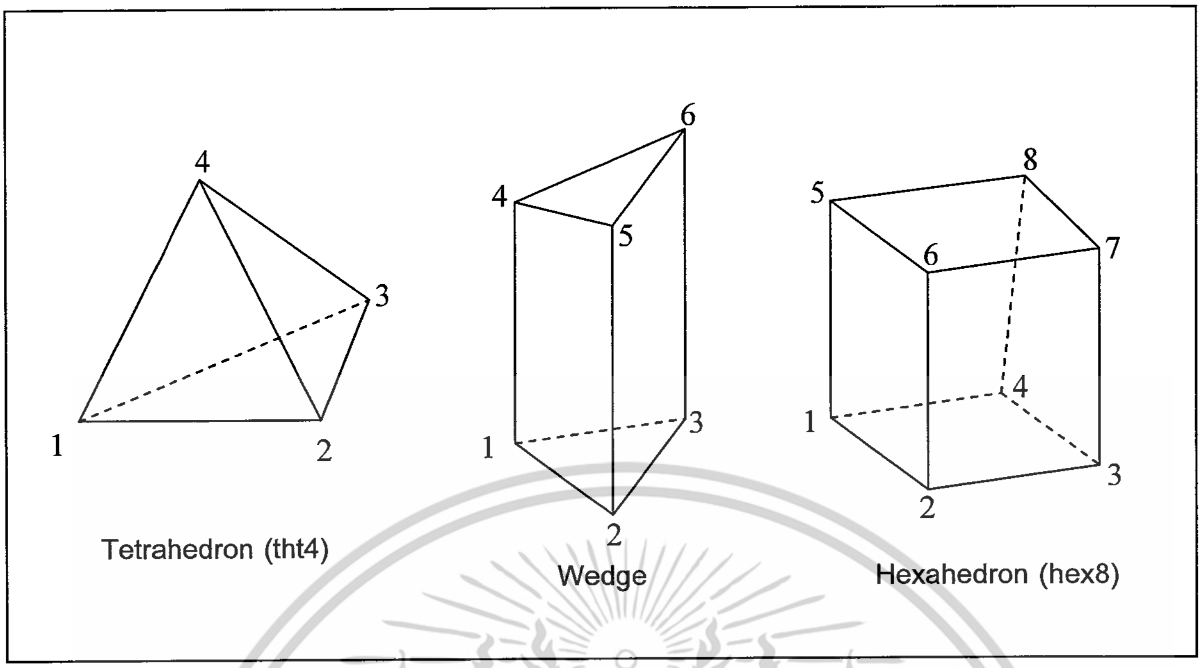
2.14.2 เอลิเมนต์คืออะไร

เอลิเมนต์ หมายถึง หน่วยย่อยของรูปเรขาคณิตที่เป็นโดเมนของปัญหา บางครั้งอาจเรียกว่า mesh หรือ grid ซึ่งในวิธี FEM จะแยกคิดทีละเอลิเมนต์ย่อยก่อน จากนั้นจึงนำแต่ละเอลิเมนต์ย่อยกลับไปประกอบเป็นรูปเรขาคณิตที่ต้องการ การแยกรูปเรขาคณิตออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยเป็นเทคนิคทำให้การหาคำตอบทำได้ง่ายขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มงานในการสร้าง mesh



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 1 มิติ และ 2 มิติ

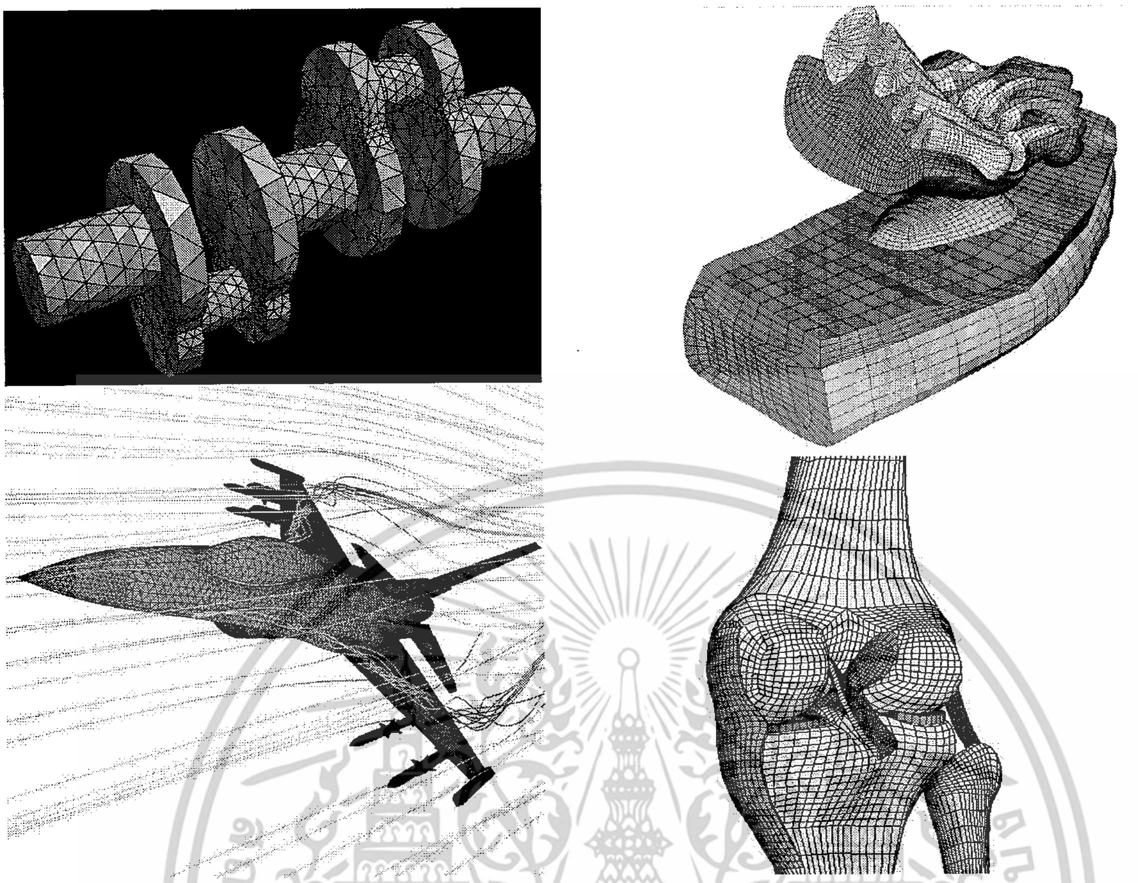
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

รูปที่ 2.35 ตัวอย่าง mesh 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 ตัวอย่าง mesh 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและแนวทางการออกแบบ

3. ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้สำหรับการออกแบบ

3.1 ตัวนำ [15]

เราพิจารณาการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60228(2004): Conductors of insulated cables

3.1.1 Nominal cross-section area:

ให้ขนาดของตัวนำเป็นไปตามค่าที่ถูกระบุ โดยอาจไม่ได้มาจากการวัดโดยตรง

3.1.2 Classification

สำหรับตัวนำทองแดงที่ใช้ในการออกแบบนี้อยู่ใน Class 2: Stranded conductors. เป็น fixed installations

3.1.2.1 โครงสร้างของ Stranded compacted circular conductors and stranded conductors (class 2)

วัสดุจะต้องประกอบด้วยวัสดุที่ได้จาก

- Plain or metal-coated annealed copper
- Aluminium or aluminium alloy

ในที่นี้เลือกวัสดุแบบ Plain or metal-coated annealed copper โดยหน้าตัดตัวนำทองแดงที่ถูกระบุจะต้องไม่น้อยกว่า 25 mm^2

- ค่า Ratio ของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดทั้งสองในตัวนำชนิดเดียวกันต้องไม่แตกต่างกัน
- จำนวนของขดลวดในตัวนำต้องไม่น้อยกว่าจำนวนค่าประมาณต่ำที่สุดในตารางที่ 3.2

3.1.2.2 ความต้านทานของตัวนำ

ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}C$ ถูกกำหนดให้เป็นไปตามตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวนำ ที่ 20 $^{\circ}C$ [15]

1	2	3
Nominal cross-sectional area (mm^2)	Maximum resistance of conductor at 20 $^{\circ}C$	
	Circular , annealed copper conductors	
	Plain (Ω/km)	Metal-Coated (Ω/km)
0.5	36.0	36.7
0.75	24.5	24.8
1.0	18.1	18.2
1.5	12.1	12.2
2.5	7.41	7.56
4	4.61	4.70
6	3.08	3.11
10	1.83	1.84
16	1.15	1.16
25	0.727^b	-
35	0.524^b	-
50	0.387^b	-
70	0.268^b	-
95	0.193^b	-
120	0.153^b	-
150	0.124^b	-
185	0.101^b	-
240	0.0775^b	-
300	0.0620^b	-
400	0.0465^b	-

หมายเหตุ: b: ตัวนำทองแดงที่มีหน้าตัดตัวนำมากกว่า 25 mm^2 จะมีการหุ้มฉนวนเพิ่มด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 Class 2 stranded conductors for single-core and multi-core cables [15]

Nominal cross-sectional area (mm^2)	Minimum number of wires in the conductor			Maximum resistance of conductor at 20°C	
	Circular	Circular Compact	Shaped	Annealed copper conductor	
	Cu	Cu	Cu	Plain wires (Ω/km)	Metal-coated wires (Ω/km)
0.5	7	-	-	36.0	36.7
0.75	7	-	-	24.5	24.8
1.0	7	-	-	18.1	18.2
1.5	7	6	-	12.1	12.2
2.5	7	6	-	7.41	7.56
4	7	6	-	4.61	4.70
6	7	6	-	3.08	3.11
10	7	6	-	1.83	1.84
16	7	6	-	1.15	1.16
25	7	6	6	0.727	0.734
35	7	6	6	0.524	0.529
50	19	6	6	0.387	0.391
70	19	12	12	0.268	0.270
95	19	15	15	0.193	0.195
120	37	18	18	0.153	0.154
150	37	18	18	0.124	0.126
185	37	30	30	0.0991	0.100
240	37	34	34	0.0754	0.0763
300	61	34	34	0.0601	0.0607
400	61	53	53	0.0470	0.0475
500	61	53	53	0.0366	0.0369
630	91	53	53	0.0283	0.0286
800	91	53	-	0.0221	0.0224
1000	91	53	-	0.0176	0.0177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 Guidance on the dimensional limits of circular conductors.[15]

Dimensional limits for stranded compacted circular copper conductor.

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำทองแดงจะต้องไม่มากกว่าค่าสูงสุด และไม่น้อยน้อยกว่าค่าต่ำสุดจากตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำทองแดง [15]

1	2	3
Nominal cross-sectional area (mm^2)	Stranded compacted circular conductor.(Class2)	
	Minimum diameter (mm)	Maximum diameter (mm)
10	3.6	4.0
16	4.6	5.2
25	5.6	6.5
35	6.6	7.5
50	7.7	8.6
70	9.3	10.2
95	11.0	12.0
120	12.3	13.5
150	13.7	15.0
185	15.3	16.8
240	17.6	19.2
300	19.7	21.6
400	22.3	24.6
500	25.3	27.6
630	28.7	32.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ฉนวน XLPE (Cross-linked polyethylene) [16]

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำเมื่อใช้การฉนวนต่างชนิดกัน [16]

Insulating compound	Maximum conductor temperature $(^{\circ}C)$	
	Normal operation	Short-circuit (5 s Maximum duration)
PVC Conductor cross-section $\leq 300mm^2$ Conductor cross-section $> 300mm^2$	 70 70	 160 140
XLPE	90	250
EPR and HEPR (Ethylene propylene rubber)	90	250

ค่าอุณหภูมิในตารางขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุฉนวน และเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสพิกัด

3.2.1 ความหนาของชั้นฉนวน XLPE

ตารางที่ 3.5 แสดงค่า Nominal Thickness ของฉนวน XLPE [16]

Nominal cross-sectional area of conductor (mm^2)	Nominal thickness of insulation at rated voltage $U_0/U(U_m)$
	12/20 (24) kV mm
10	-
16	-
25	-
35	5.5
50 to 185	5.5
240	5.5
300	5.5
400	5.5
500 to 1600	5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำมีขนาดเล็กกว่าค่าที่กำหนดให้ในตาราง จะไม่แนะนำ แต่หากมีการใช้พื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กกว่าค่าที่ให้ในตาราง แนะนำให้เพิ่มความหนาในส่วนของชั้นป้องกันตัวนำ (Conductor Screen) หรืออาจเพิ่มความหนาของชั้นฉนวน (Insulation) เพื่อให้อยู่ภายใต้ขอบเขตถึงค่าหน้าตัดต่ำสุดของขนาดตัวนำในตาราง โดยที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนต้องอยู่ภายใต้ค่าแรงดันทดสอบ

ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของตัวนำมีขนาดใหญ่กว่า 1000 mm^2 ความหนาในชั้นฉนวนอาจเพิ่มขึ้นได้ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากแรงทางกลในการติดตั้ง

ค่าความหนาของฉนวนต่ำที่สุดมีค่าเป็น 90% ของค่าที่ถูกระบุ (Nominal value) คือ $\frac{90}{100}\times 5.5 = 4.95mm$ เป็นค่าความหนาน้อยที่สุดของชั้นฉนวน แต่ในทางปฏิบัติค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นฉนวนที่ใช้จะไม่ต่ำกว่าค่าที่ถูกระบุ คือไม่ต่ำกว่า 5.5 mm.

3.3 Screening

ประกอบด้วย 1. Conductor Screen 2. Insulation Screen

3.3.1 Conductor Screen

เป็น Non-metallic และประกอบด้วยส่วนยื่นของสารประกอบกึ่งตัวนำ (An extruded semi-conducting compound) โดยส่วนยื่นของสารกึ่งตัวนำจะต้องถูกเชื่อมเข้ากับชั้นของฉนวนอย่างสมบูรณ์

3.3.2 Insulation Screen

เป็น Non-metallic โดยชั้นของสารกึ่งตัวนำจะต้องรวมเข้ากับชั้นของเครื่องป้องกันโลหะ (Metallic layer) โดยเครื่องป้องกันฉนวน (Insulation Screen) จะยื่นออกมาเป็นส่วนยื่นของสารกึ่งตัวนำจากชั้นฉนวน

โดยชั้นของ Screening ทั้งสองจากข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวงที่ Specification No.418 ได้กำหนดขนาดของความหนาต่ำที่สุดของชั้น Conductor Screen และ Insulation Screen ที่ 0.0635 mm.

3.4 Metallic Screen

แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ 1.แบบ Copper Tape 2.แบบ Copper Wires

การเลือกชนิดของ Metallic Screen ต้องพิจารณาถึงการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้น ไม่เพียงแต่คำนึงถึงความปลอดภัยจากแรงทางกล ยังต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยทางด้านไฟฟ้าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 Increase of diameter for concentric conductors and metallic screens [16]

Nominal cross-section of concentric conductor or metallic screen (mm^2)	Increase in diameter mm.
1.5	0.5
2.5	0.5
4	0.5
6	0.6
10	0.8
16	1.1
25	1.2
35	1.4
50	1.7
70	2.0
95	2.4
120	2.7
150	3.0
185	4.0
240	5.0
300	6.0

3.5 Oversheath หรือ Jacket

อาจเลือกใช้ PE หรือ PVC ขึ้นกับความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน ในที่นี้เลือกใช้ PE เป็นเปลือกนอก เนื่องจาก PE สามารถเดินลอยในอากาศหรือฝังดินก็ได้ แต่นิยมฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน และสามารถทนต่อความชื้นได้ดี

- ความหนาของเปลือกนอกต่ำที่สุดคิดเป็น 80% ของค่าที่ถูกระบุ (Nominal value)
- ค่าความหนาเฉลี่ยของเปลือกนอกจะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่ถูกระบุ (Nominal value)
- โดยทั่วไปชั้นเปลือกนอกมีสีดำ แต่อาจมีสีอื่นได้ขึ้นกับข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อ
- ต้องมีความเหมาะสมสำหรับการทนอุณหภูมิของตัวนำสูงสุดที่ $90^{\circ}C$
- มีความคงทนต่อ น้ำมัน ความเป็นกรด-ด่าง และการป้องกันอื่นๆ เช่น ปลวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ความหนาของชั้นเปลือกนอก (t_s)

$$t_s = 0.035D + 1.0 \qquad (3.1)$$

D คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสมมุติจนถึงก่อนชั้นเปลือกนอก ในหน่วยมิลลิเมตร

สำหรับสายเคเบิลที่มีชั้นของ Metallic Screen ค่าความหนาที่ถูกระบุจะต้องไม่น้อยกว่า 1.8 มิลลิเมตร

3.6 การออกแบบสายเคเบิล

จากการศึกษามาตรฐานต่าง ๆที่ใช้กับการออกแบบสายเคเบิลใต้ดิน รวมถึงจากการศึกษากระบวนการผลิตและการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินจากผู้ผลิต อีกทั้งการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิล จึงได้ทำการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV ชนิด Single Core Cu/XLPE/Cu Wire or Tape/PE เพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้งได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.7 ค่าการออกแบบ [10,13]

หัวข้อ	มาตรฐาน	กระบวนการผลิต
ค่าที่ระบุของพื้นที่หน้าตัดตัวนำ (mm^2)	240	240
เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	$18.47 \pm 1\%$	18.65
จำนวนเส้นลวดตัวนำ (เส้น)	34	37
ความหนาต่ำสุดของชั้นป้องกันตัวนำ (mm)	0.0635	0.70
ความหนาของชั้นฉนวน(Nominal value) (mm)	5.50	5.80
ความหนาต่ำสุดของชั้นป้องกันฉนวน (mm)	0.0635	1.00
จำนวนน้อยที่สุดของ Wire screen	20	30
เส้นผ่านศูนย์กลางของ Copper wire screen (mm)	$1.03 \pm 1\%$	1.03
เทปกันน้ำสังเคราะห์ชนิดไร้สารกึ่งตัวนำ (mm)	0.50	0.50
ความหนาน้อยที่สุดของชั้นเปลือกนอก (mm)	1.76	2.30

หมายเหตุ: ค่าต่าง ๆพิจารณาให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC60502-2 (2005) , PEA Specification No. RCBL-035/2549 (R-777/2539) และมาตรฐานตัวนำให้เป็นไปตาม IEC60228 (2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 แบบจำลองโครงสร้างสายเคเบิล

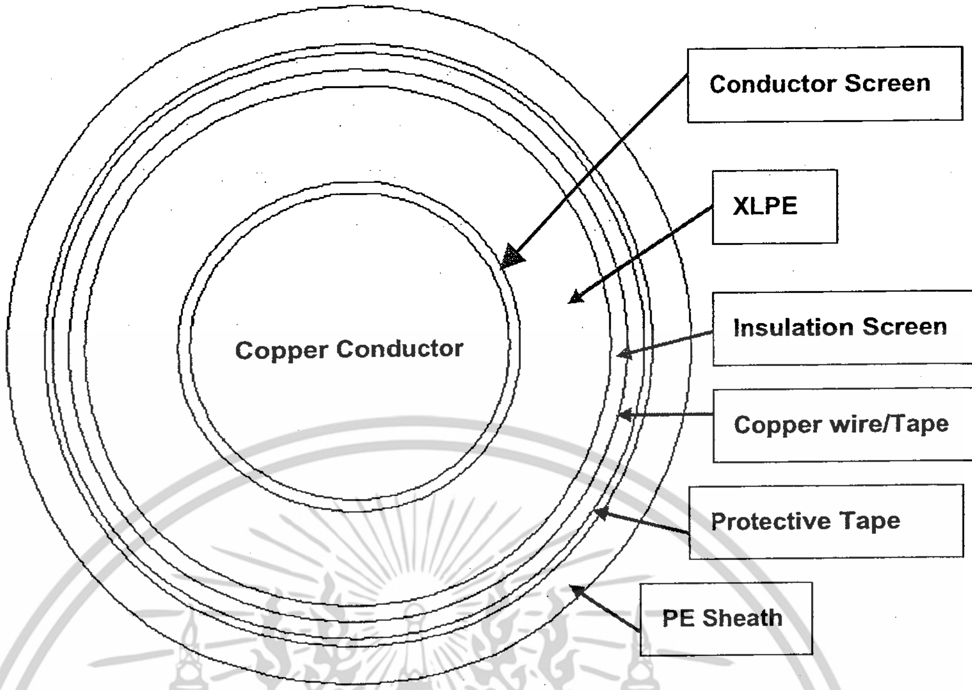
ตารางที่ 3.8 ค่าการออกแบบสายเคเบิลเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้งานสาย [12]

วัสดุ	ความหนา (mm.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm.)
Stranded compact circular conductor	-	18.65
Conductor Screen	0.70	20.05
Insulation (XLPE)	5.80	31.65
Insulation Screen	1.00	33.65
Wire screen	1.03	35.71
Synthetic water blocking tape	0.50	36.71
Outer sheath	2.30	41.31
Ripped type (Width and Depth)	2.50	-
Center distance between crests	6.83	-

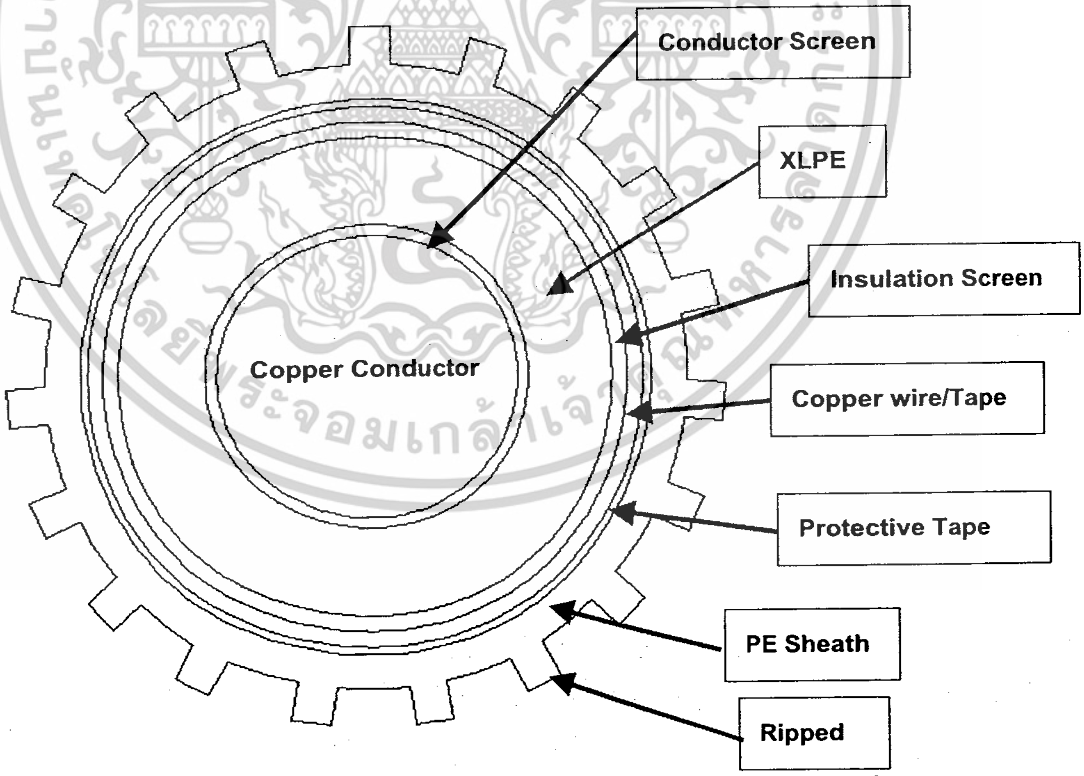
3.7.1 การจำลองโครงสร้างสายเคเบิล

การจำลองสายเคเบิลที่ใช้ในการพิจารณาทางไฟฟ้า และทางความร้อนนั้น จะเป็นไปในลักษณะสองมิติ และการพิจารณาทางกล จะเป็นไปในลักษณะสามมิติ โดยกำหนดให้มีการจำลองโครงสร้างของสายเคเบิลที่ผลิตใช้ เปรียบเทียบกับสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



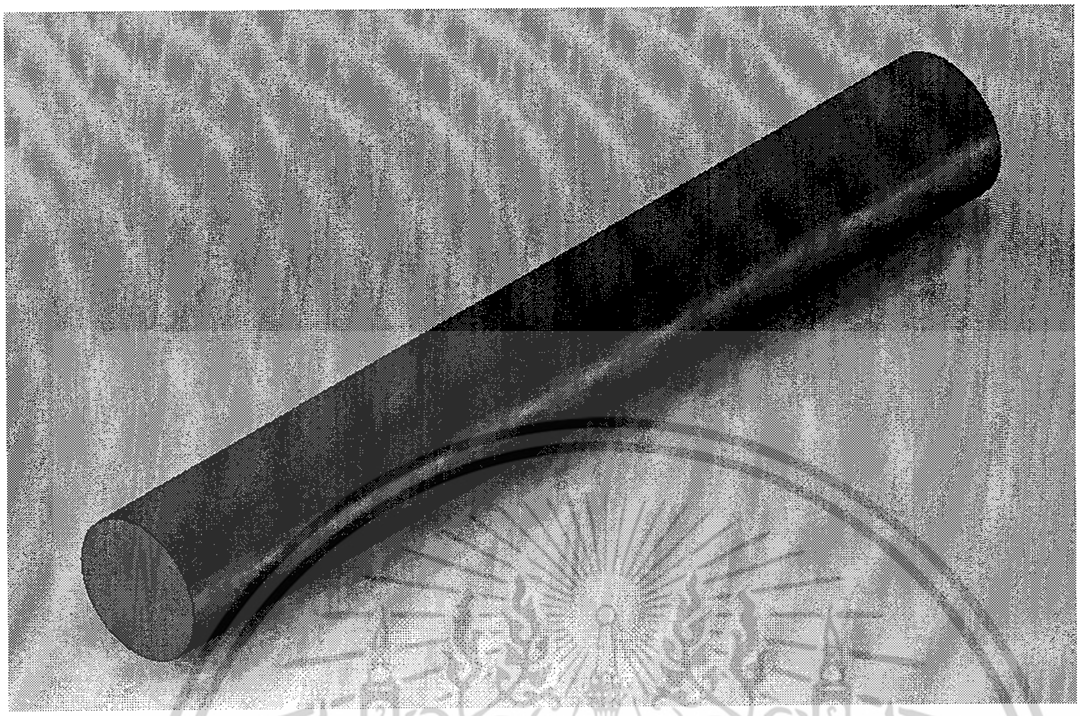
[ก] โครงสร้างสายที่ใช้ในการผลิต



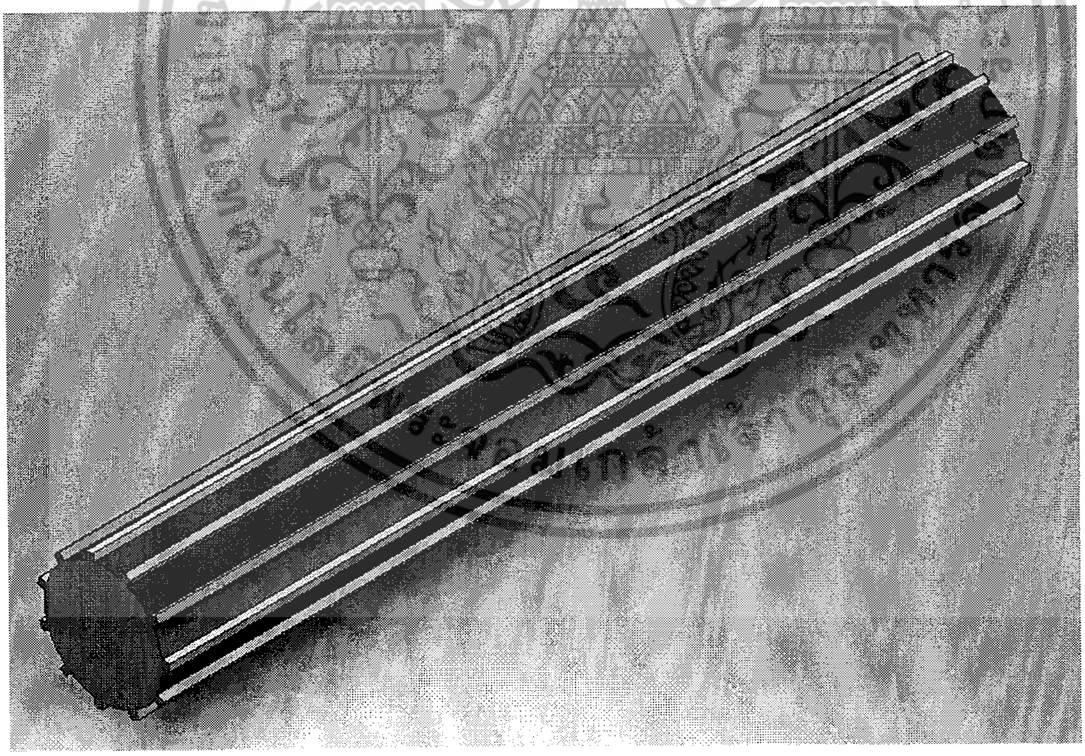
[ข] โครงสร้างสายที่ใช้ในออกแบบเพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง

รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายเคเบิลในสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ก] แบบจำลองโครงสร้างสายที่มีการผลิตใช้ เมื่อใช้ในการพิจารณาทางกล



[ข] แบบจำลองโครงสร้างสายที่มีการออกแบบ เมื่อใช้ในการพิจารณาทางกล

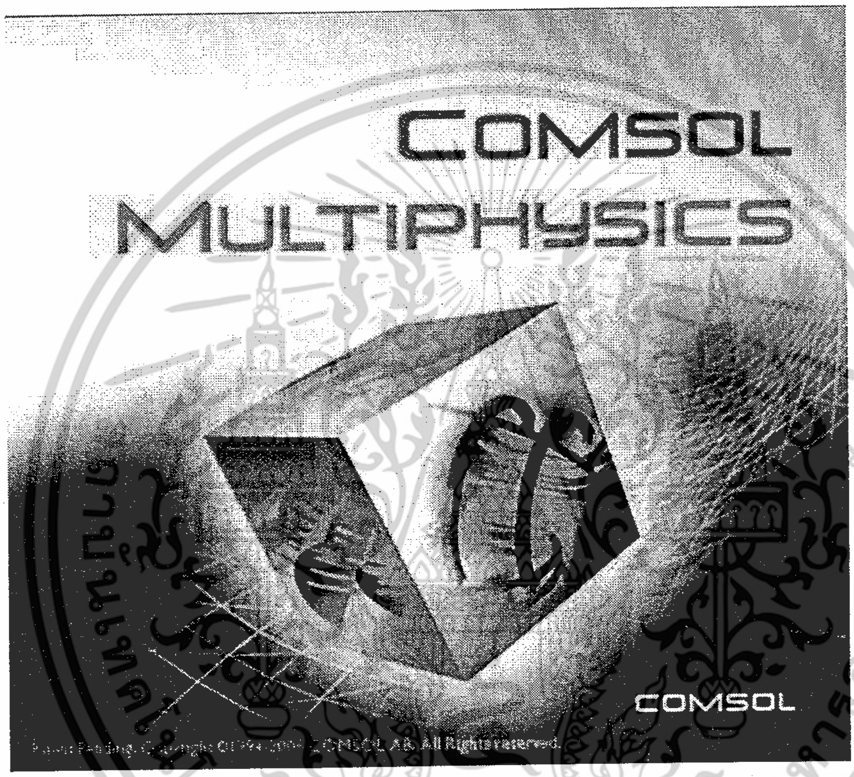
รูปที่ 3.2 โครงสร้างสายเคเบิลในสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เบื้องต้น

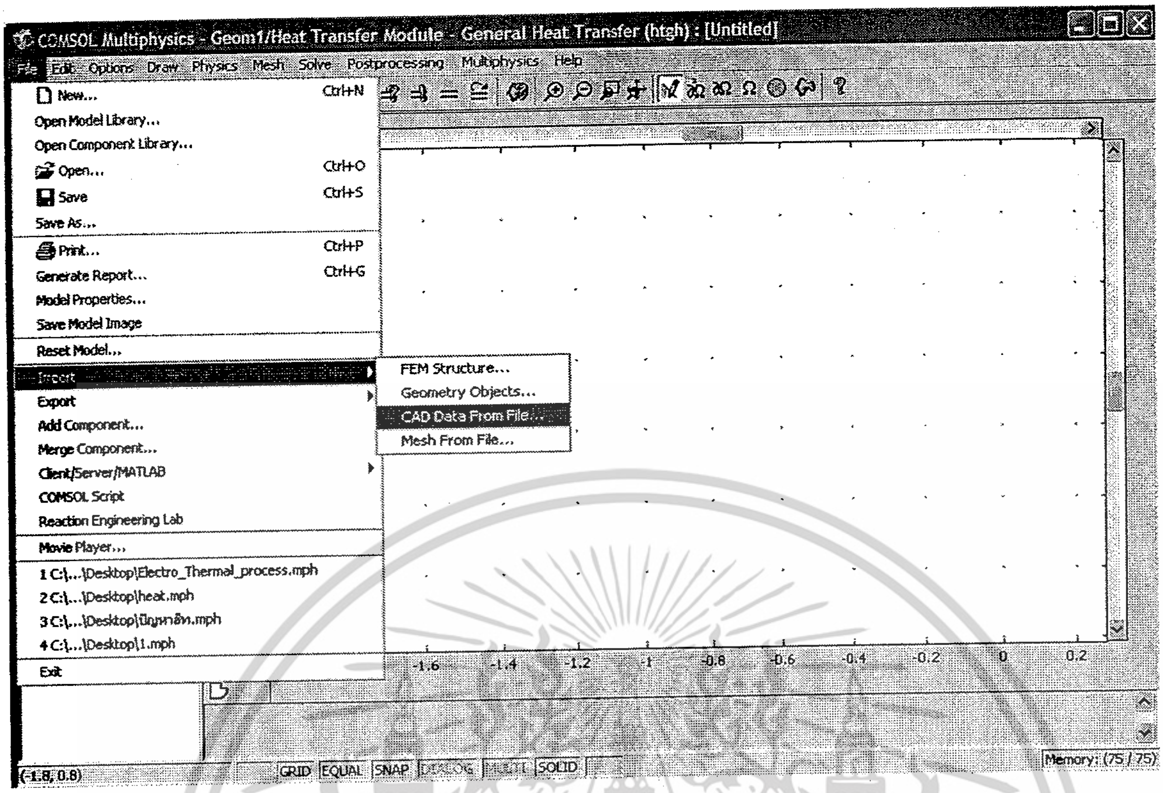
3.7.2.1 การนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรม

สามารถวาดจากโปรแกรมได้ หรือในอีกกรณีหนึ่งเราสามารถนำเข้าไฟล์สู่โปรแกรม Comsol ที่ได้มีการออกแบบจากโปรแกรม Auto Cad , Solid work ได้ดังนี้

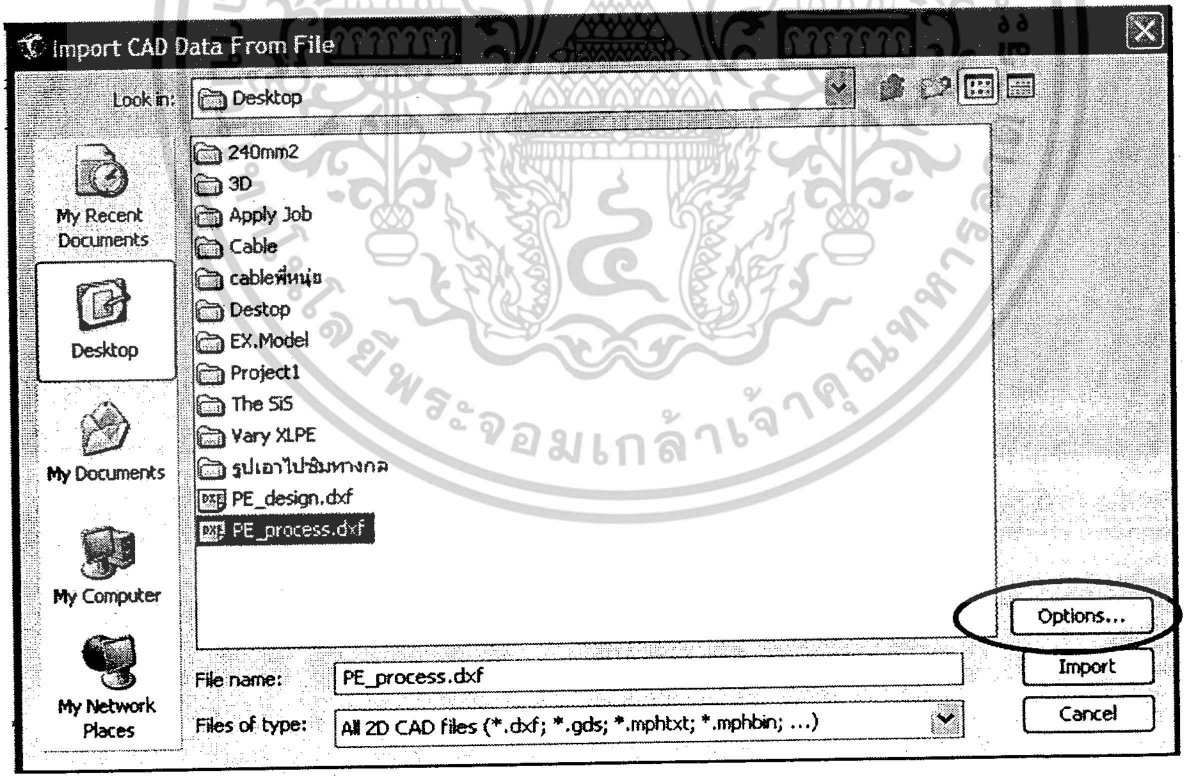


รูปที่ 3.3 โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

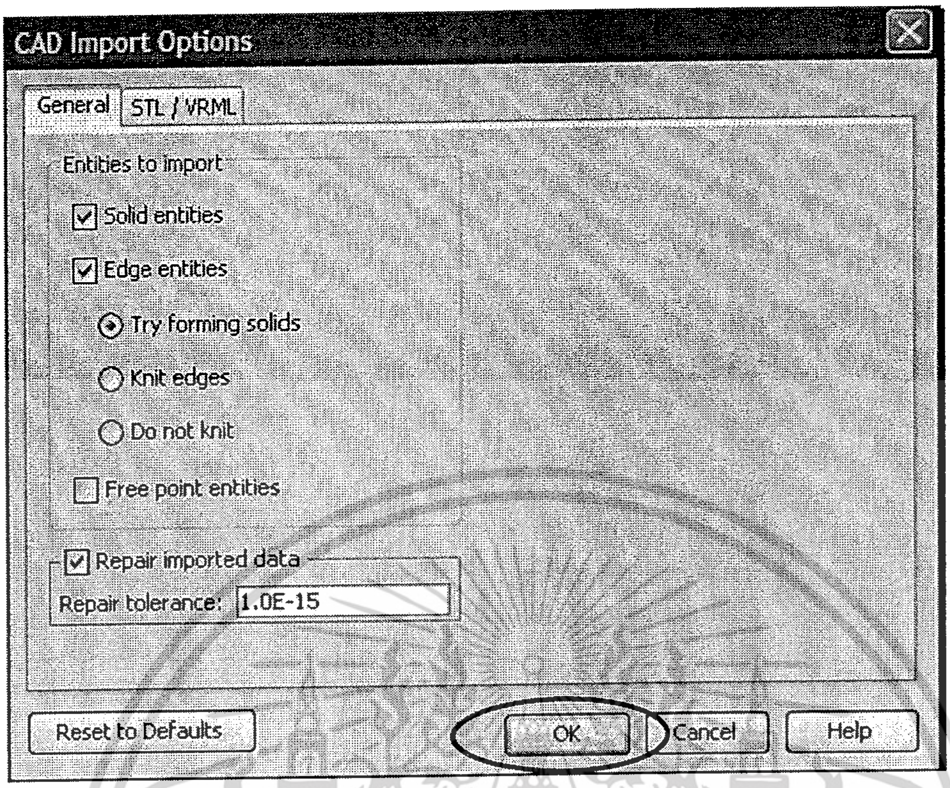


[ก]

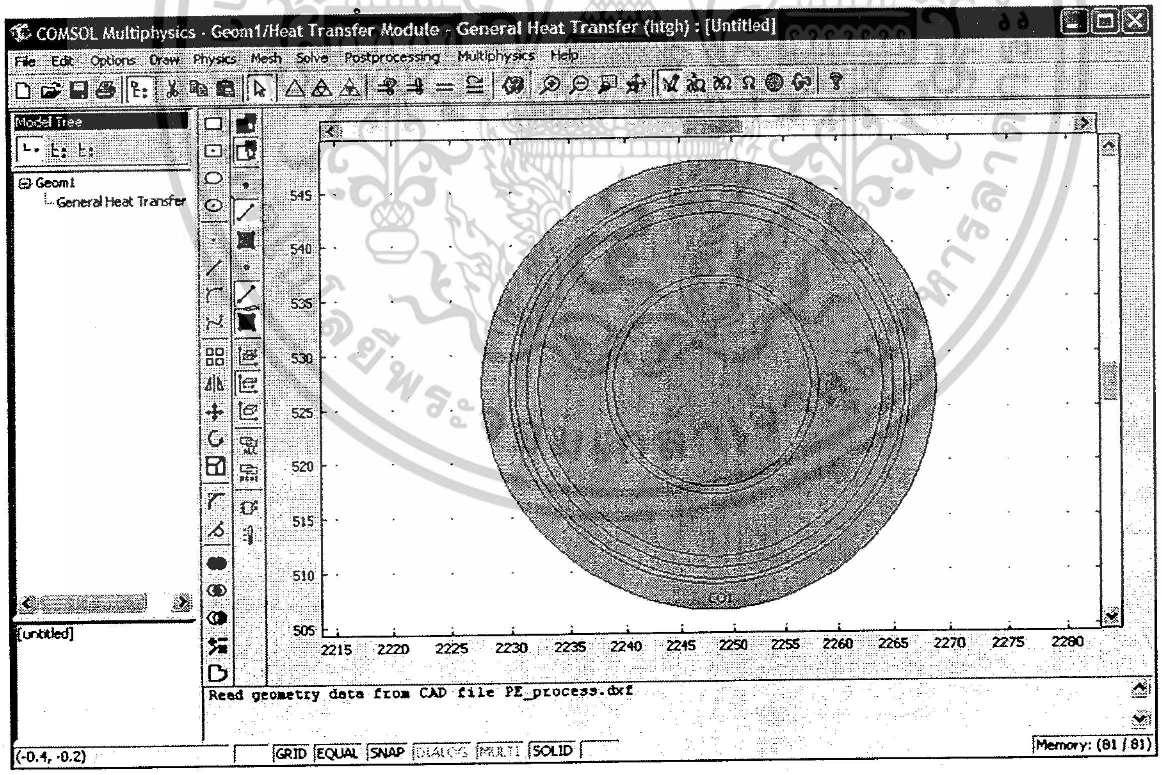


[ข]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ค]



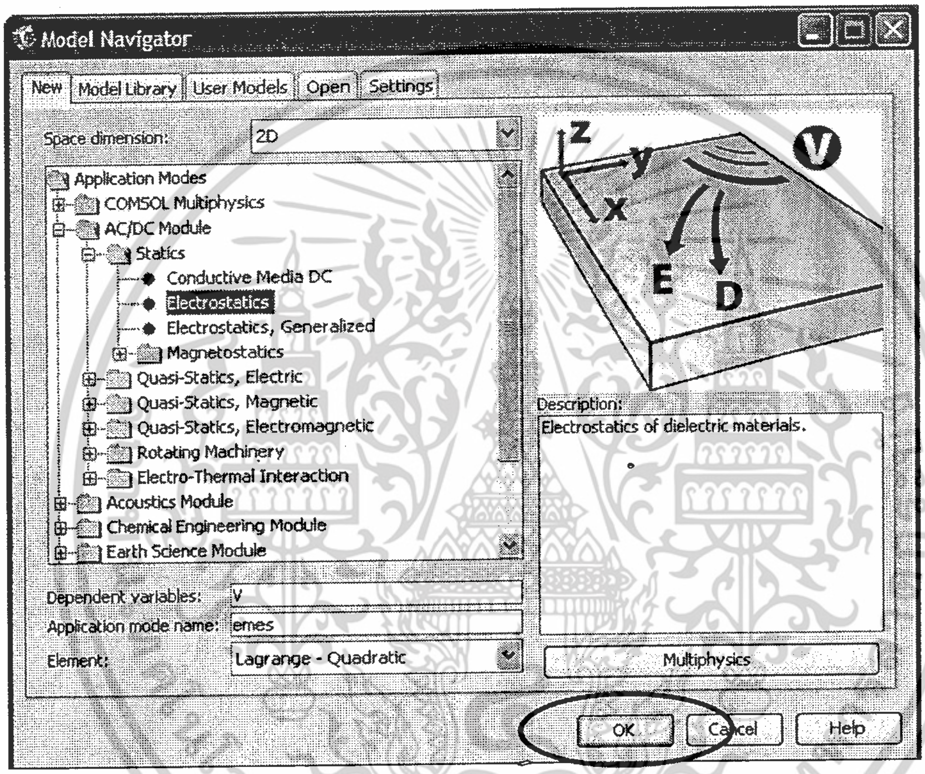
[ง]

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการนำไฟล์ที่ออกแบบเข้าสู่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

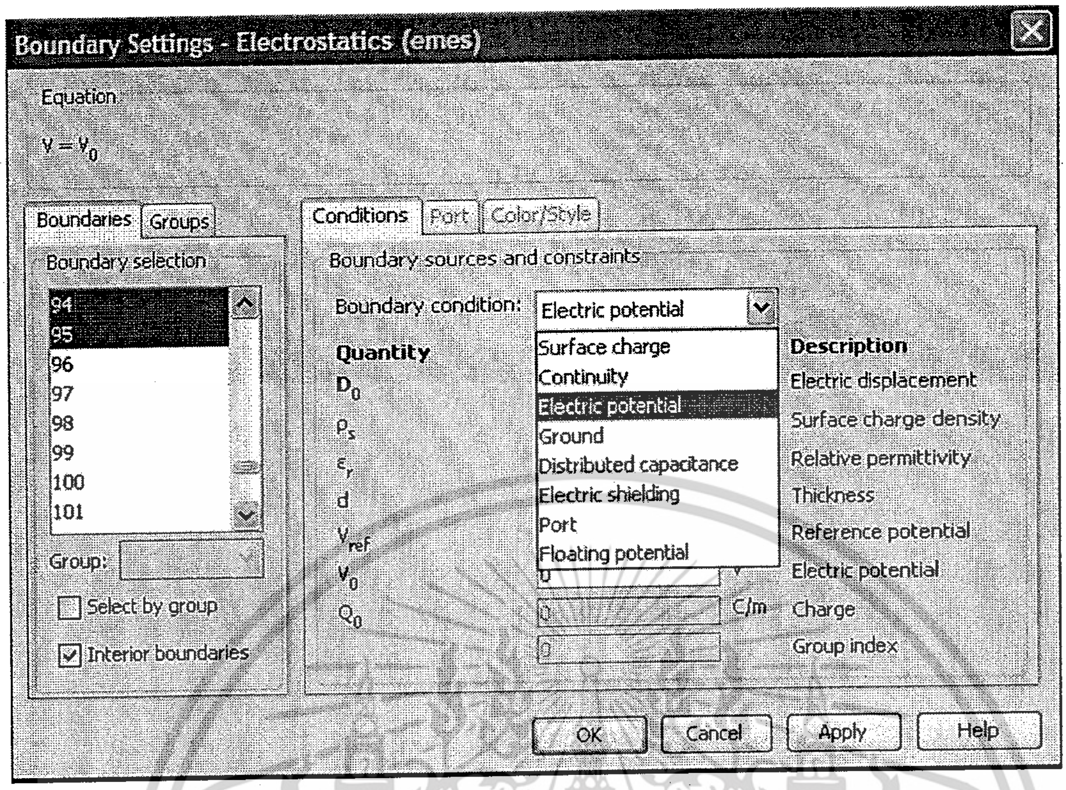
3.7.3 การจำลองทางด้านไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นการจำลองเพื่อพิจารณาผลทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบเปรียบเทียบกับสายที่ได้มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน โดยพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้า ค่าสนามไฟฟ้า การกระจายสนามไฟฟ้า และเส้นระดับของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายทั้งสองแบบ จำลองโดยโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีวิธีการดังนี้

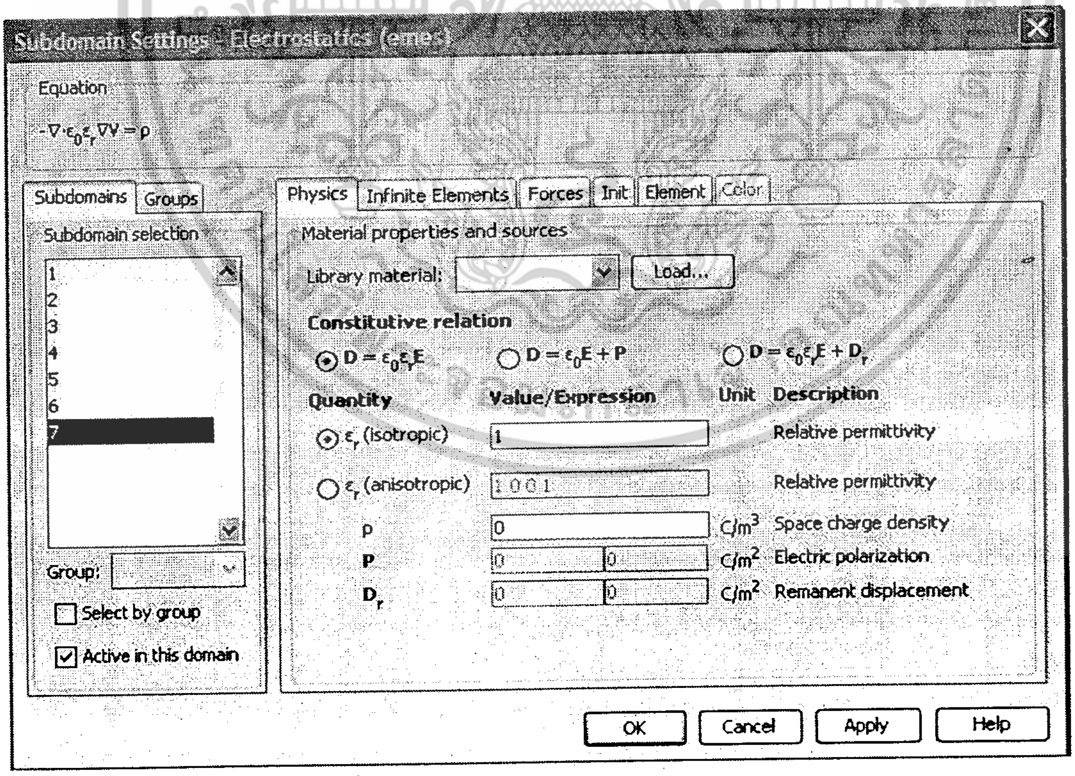


รูปที่ 3.5 เลือกฟังก์ชั่นการใช้งานในการพิจารณาทางด้านไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

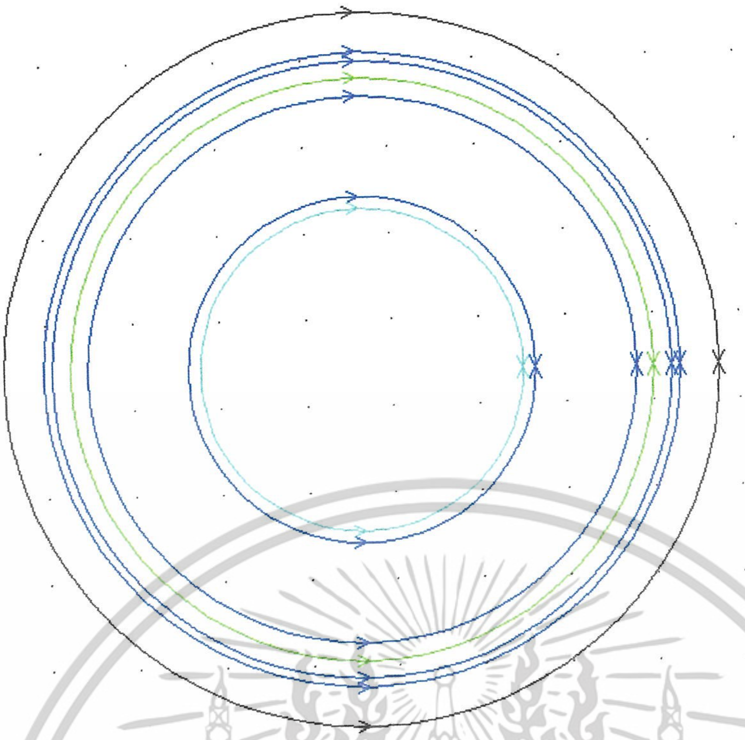


รูปที่ 3.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางด้านไฟฟ้า

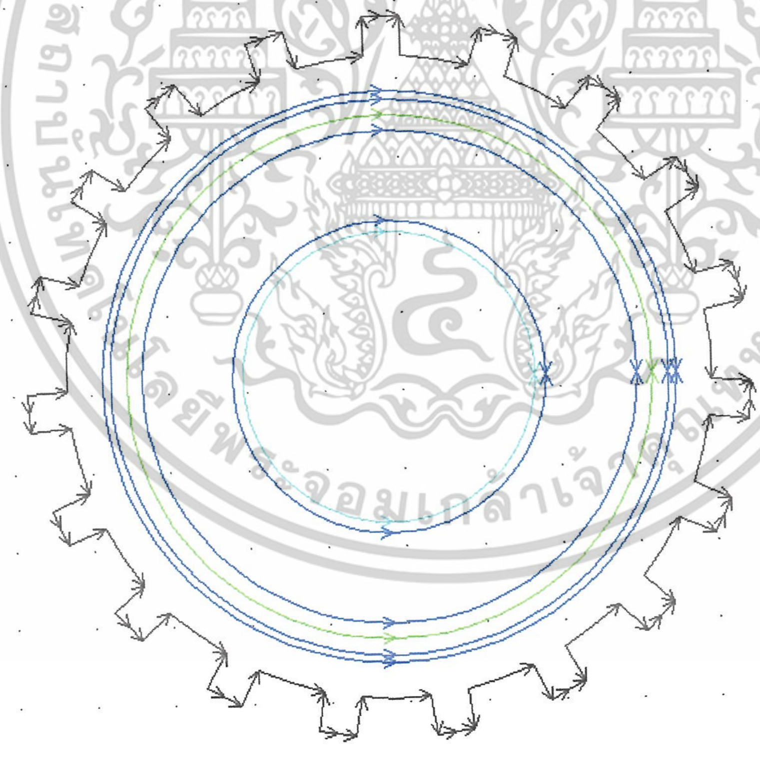


รูปที่ 3.7 การกำหนด (Subdomain Settings) ในการพิจารณาทางด้านไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ก] การกำหนด Boundary Settings ทางไฟฟ้าของสายที่ใช้ในการผลิต



[ข] การกำหนด Boundary Settings ทางไฟฟ้าของสายที่ได้ทำการออกแบบ

รูปที่ 3.8 การกำหนด Boundary Settings ทางไฟฟ้าของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆทางไฟฟ้า

Layer	Subdomain Settings (ε_r)	Boundary Settings
Conductor	1	Electrical potential
Conductor Screen	10	Continuity
Insulation	2.3	Continuity
Insulation Screen	10	Continuity
Copper wires screen	1	Ground
Protective Tape	4.65	Continuity
PE-Jacket	2.3	Symmetry

เงื่อนไขขอบเขตทางไฟฟ้า (boundary condition)

Boundary condition หรือเงื่อนไขขอบ เป็นการกำหนดให้ unknown บางตัวต้องทราบค่า (unknown) ตั้งแต่การระบุปัญหา ถ้าไม่กำหนด boundary condition มาให้ จะไม่สามารถหาคำตอบเฉพาะของปัญหานั้นได้ ปัญหาแต่ละอย่าง จะมี characteristic ของ unknown ที่สามารถเป็น boundary condition ได้แตกต่างกันออกไป สามารถอธิบายในรูปแบบของสมการได้ดังนี้

Electric potential (Input voltage)

$$V = V_0 \tag{3.2}$$

Continuity surface

$$n_1 \bullet (\varepsilon_1 \nabla \phi_1) = n_2 \bullet (\varepsilon_2 \nabla \phi_2) \tag{3.3}$$

Zero charge / no electric field / Symmetry surface

$$n \bullet (\varepsilon \phi) = 0 \tag{3.4}$$

Ground

$$V = 0 \tag{3.5}$$

โดยที่ n คือ สนามไฟฟ้าที่แตกองค์ประกอบมาในแนวตั้งฉาก

ε คือ Electric permeability

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

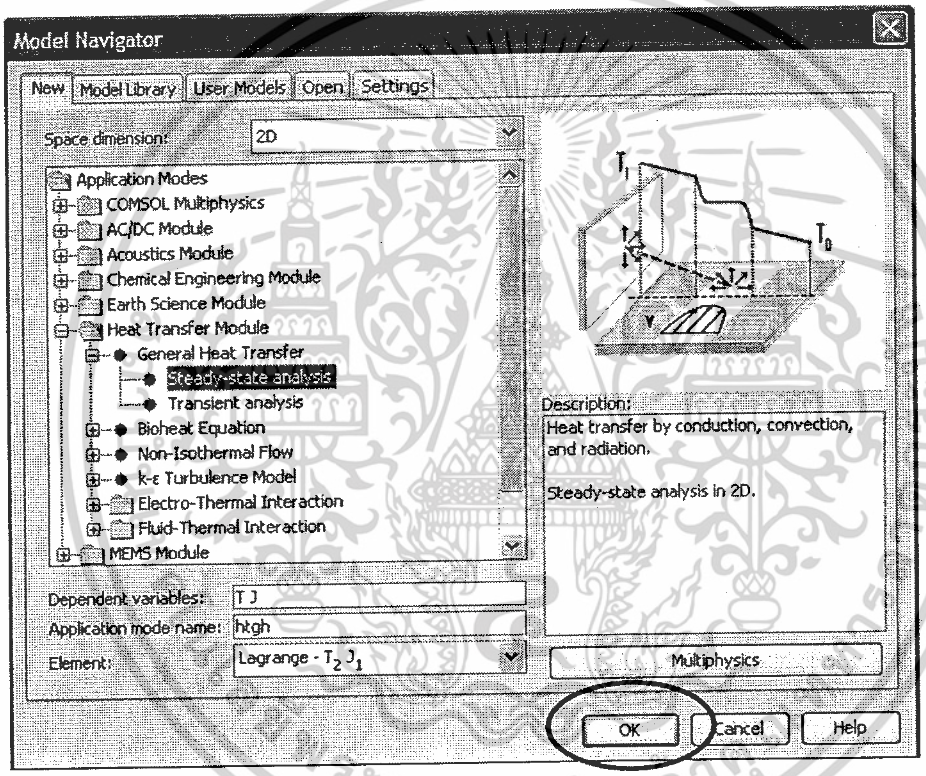
V คือ Input Voltage

ϕ คือ ฟลักซ์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

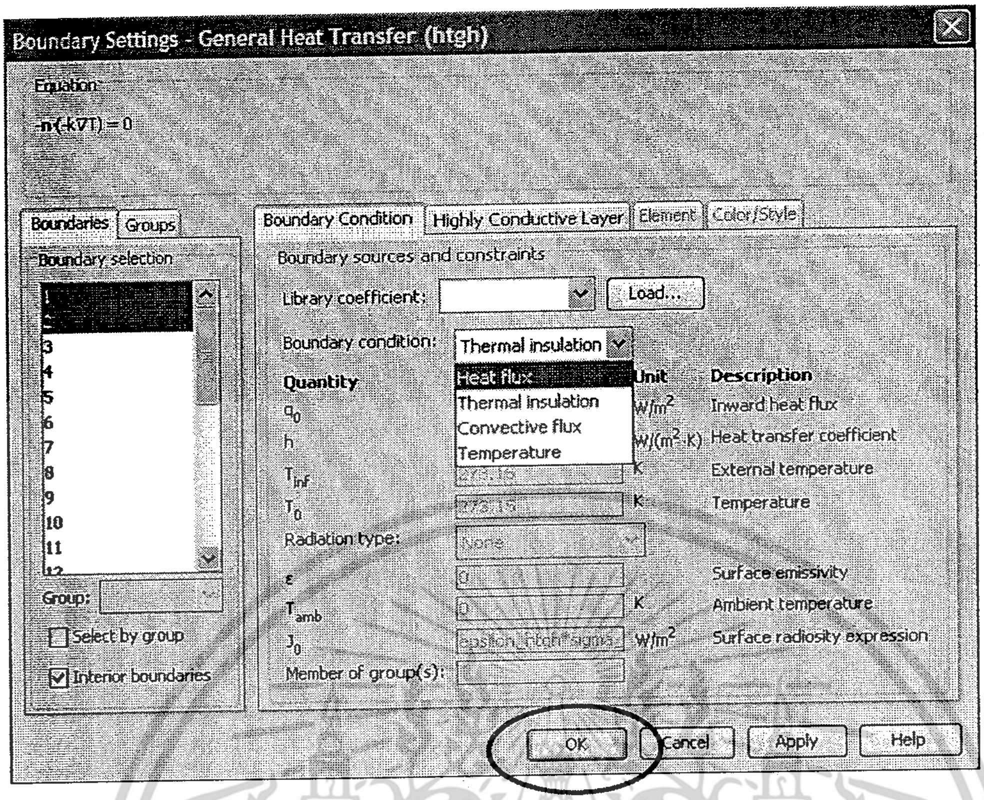
3.7.4 การจำลองทางความร้อนโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นการจำลองเพื่อพิจารณาผลทางความร้อนที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบเปรียบเทียบกับสายที่ได้มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน โดยพิจารณาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายทั้งสองแบบ ว่าการฉนวนภายในสายเคเบิลมีความร้อนเกิดขึ้นอุณหภูมิเท่าไหร่ เมื่อมีการป้อนแหล่งจ่ายกระแสให้กับสายเคเบิล โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิโดยรอบและสัมประสิทธิ์การพาของอากาศและน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งจำลองโดยโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีวิธีการดังนี้

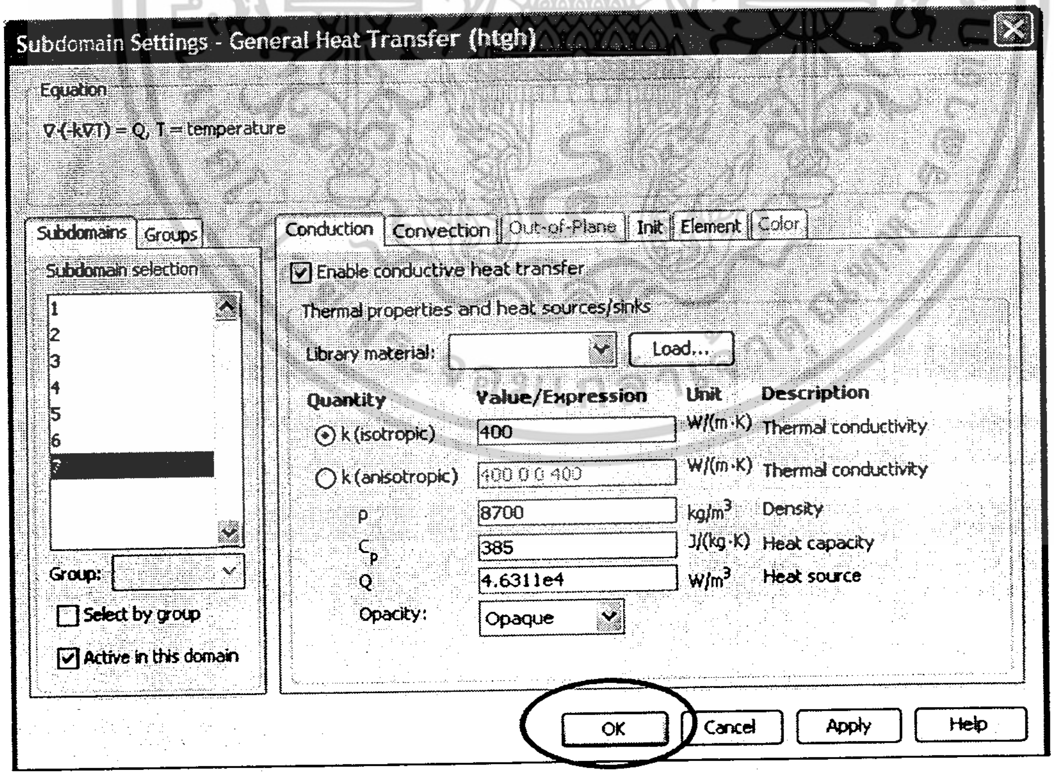


รูปที่ 3.9 เลือกฟังก์ชั่นการใช้งานในการพิจารณาทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

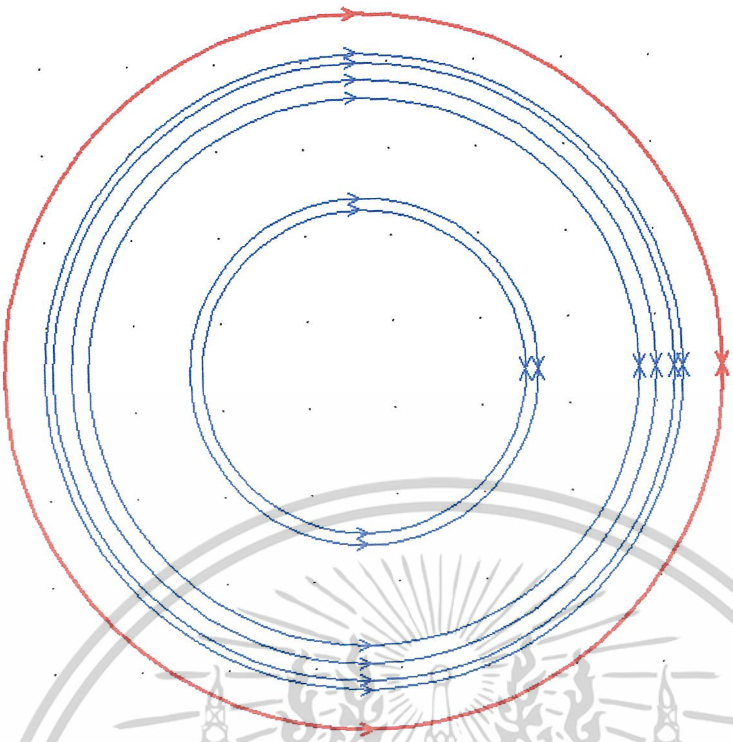


รูปที่ 3.10 การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางความร้อน

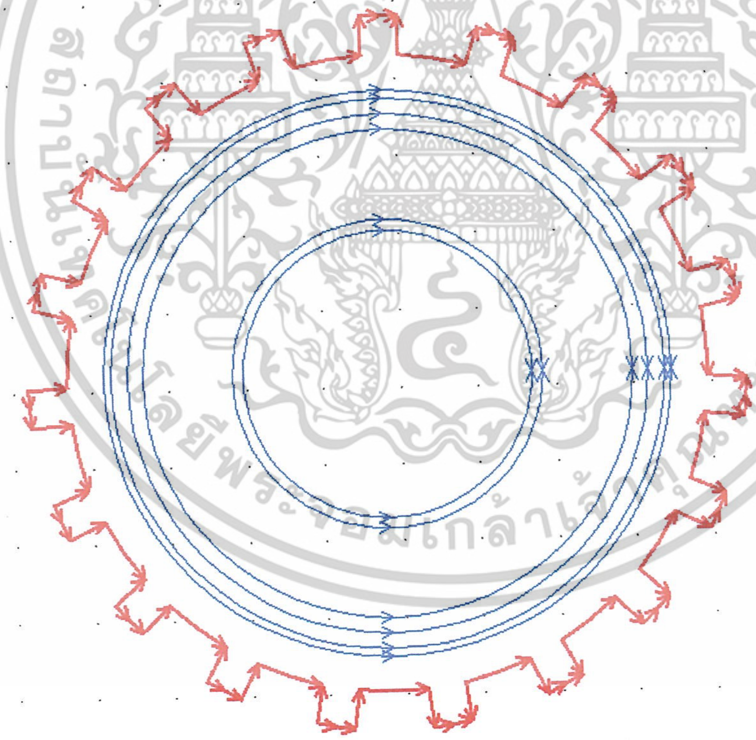


รูปที่ 3.11 การกำหนด (Subdomain Settings) ในการพิจารณาทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ก] การกำหนด Boundary conditions ทางความร้อนของสายที่ใช้ในการผลิต



[ข] การกำหนด Boundary conditions ทางความร้อนของสายที่ได้ออกแบบ

รูปที่ 3.12 การกำหนด Boundary Settings ทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 แสดงการกำหนด Boundary Settings ทางความร้อน

โดยพิจารณาเพียงสี่ส่วนหลักๆที่มีผลทางความร้อนคือ ตัวนำ ฉนวน กราวด์ และเปลือกนอก เนื่องจากโครงสร้างอื่นส่งผลทางความร้อนน้อยมากจนสามารถละเว้นได้

Layer	Boundary Settings
Conductor	Continuity
Insulation	Continuity
Copper wires screen	Continuity
PE-Jacket	Heat Flux h = 20 $T_{\inf} = 303.15K$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาของอากาศ

$T_{\inf}$ คือ อุณหภูมิภายนอก $^{\circ}K$ โดยอุณหภูมิภายนอกของสายเคเบิลใต้ดินมีค่า 30 $^{\circ}C$

เงื่อนไขขอบเขตทางความร้อน

สามารถอธิบายได้ในรูปของสมการดังนี้

Continuity surface : เงื่อนไขบริเวณรอยต่อของวัสดุต่างชนิดกัน ซึ่งที่จุดสัมผัสจะมีความต่อเนื่องกัน

$$-n_u \bullet (-k_u \nabla T_u) - n_d \bullet (-k_d \nabla T_2) = 0 \quad (3.6)$$

Thermal insulation : คือฉนวนความร้อน โดยทางกายภาพไม่ยอมให้ความร้อนผ่านได้และฟลักซ์เป็นศูนย์

$$-n \bullet (-k \nabla T) = 0 \quad (3.7)$$

Heat flux : ความร้อนที่เข้ามาที่ระบบ ให้ความร้อนเข้ามาเป็นหน้าตัด q มีหน่วยเป็น w/A

$$n \bullet (k \nabla (T)) = q \quad (3.8)$$

Fixed Temperature : เป็นการให้เงื่อนไขบริเวณที่ทราบค่าอุณหภูมิ บอกถึงความร้อนที่ไหลเข้ามาในระบบ

$$T(x,y,z,t) = T_o \quad (3.9)$$

โดยที่ n คือ Normal vector = Emissity coefficient
= Stefan botzmann constant

k คือ Thermal conductivity (W/m-K)

q คือ heat flux หน่วย W/m^2 คือค่าความร้อนต่อหน้าตัด

T คือ Temperature (หน่วย องศาเคลวิน $^{\circ}K$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 แสดงการกำหนด Subdomain Settings ทางความร้อน

Layer	k:Thermal Conductivity (W/(m.k))	ρ :Density kg/m^3	C_p :Heat Capacity J/(kg.k)	Q:Heat Source W/m^3
Conductor	400	8700	385	4.6311×10^4
Insulation	0.5	950	1850	0
Copper wires screen	400	8700	385	0
PE-Jacket	0.33	925	2300	0

3.7.4.1 การคำนวณหาค่า Heat Source ในหน่วย W/m^3

เนื่องด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากการมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายในสาย ทำให้เกิดความต้านทานความร้อนขึ้นภายในสายนั้น โดยความต้านทานความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีกระแสภายในสายสูงขึ้น ความต้านทานความร้อนที่สูงขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในสายเคเบิลสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเห็นได้ว่ากระแสเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในสาย

$$Q\alpha|J|^2 \tag{3.10}$$

$$Q=\frac{1}{\sigma}|\dot{J}|^2=\frac{1}{\sigma}|\sigma E|^2=\sigma|\nabla V|^2 \tag{3.11}$$

$$\vec{J}=\frac{I}{A} \tag{3.12}$$

เมื่อ Q	คือ	Heat Source	หน่วย	W/m^2
J	คือ	ความหนาแน่นกระแส	หน่วย	A/m^2
σ	คือ	ค่าความนำไฟฟ้าที่แปรตามเวลา	หน่วย	S/m
E	คือ	ค่าสนามไฟฟ้า	หน่วย	Volt
V	คือ	Gradient of the potential		
I	คือ	กระแสในสายเคเบิล	หน่วย	A
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดง 240 mm^2	หน่วย	mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก $$J = \frac{I}{A}$$

$$J = \frac{400}{240 \times 10^{-6}} = 1.667 \times 10^{6} A/m^{2}$$

จาก $$Q = \frac{1}{\sigma}|J|^{2}$$

$$Q = \frac{1}{5.998 \times 10^{7}} \times (1.667 \times 10^{6})^{2}$$

$$Q = 4.633 \times 10^{4} W/m^{2}$$

เมื่อ $\sigma_{copper} = 5.998 \times 10^{7} S/m$

$I_{cable} = 400A$

A =240 mm^{2}

3.7.5 การจำลองทางกลโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นการจำลองเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ระหว่างสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบเปรียบเทียบกับสายเคเบิลที่ได้มีผลิตใช้ในปัจจุบัน จากผลของแรงทางกล โดยจะพิจารณาดูค่าความเครียด von mises stress (หน่วย Pa) ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างของสายเคเบิลทั้งสองชนิด โดยจะพิจารณาในสองกรณีได้แก่

1. ความเครียดที่เกิดจากการดึงปลายสายเคเบิล
2. ความเครียดที่เกิดจากการโค้งงอสาย

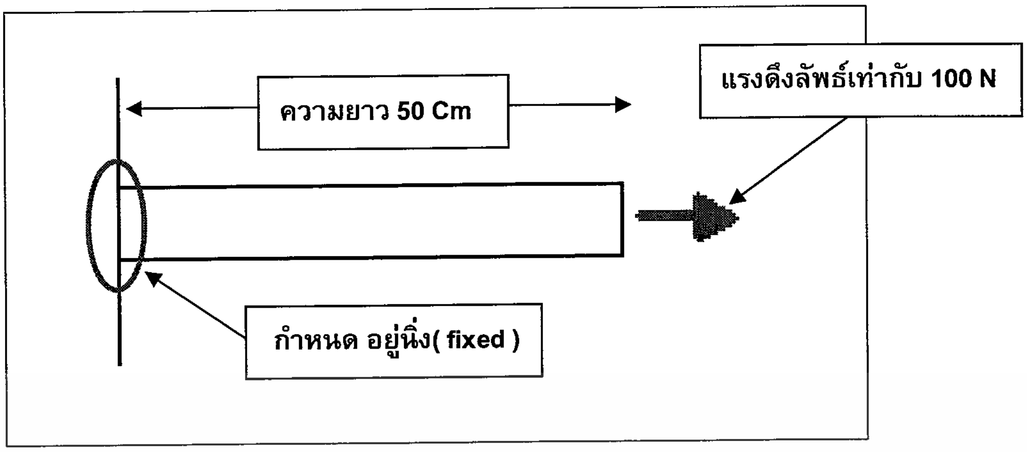
โดยจำลองผ่านโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 ซึ่งการ์จำลองในครั้งนี้จะใช้แบบจำลองเป็นแบบสามมิติ และพิจารณาในแง่ของโครงสร้างโดยรวมของสาย ซึ่งอาจแบ่งเป็นสองลักษณะคือ

1.ลักษณะทรงกระบอกตัน

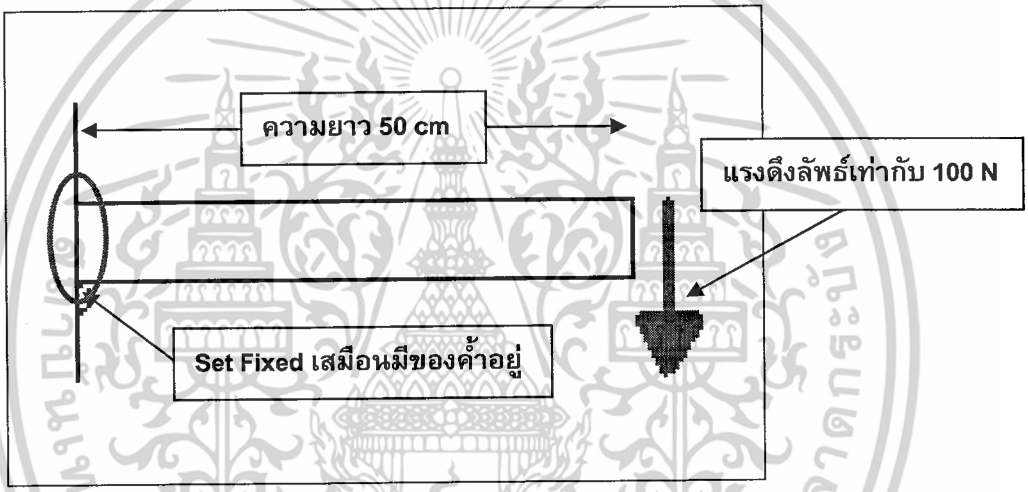
2.ลักษณะตามโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบ

เนื่องด้วยปัญหาจากการขาดทรัพยากรที่มีองค์ประกอบในการนำมาจำลอง

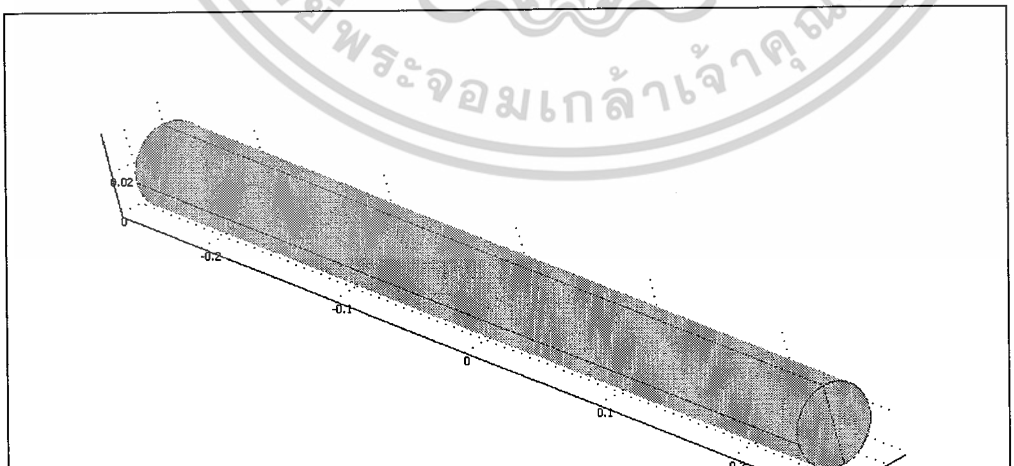
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 รูปแบบตัวอย่างการกำหนดค่าขณะมีการป้อนแรงในการดึงปลายสายเคเบิล

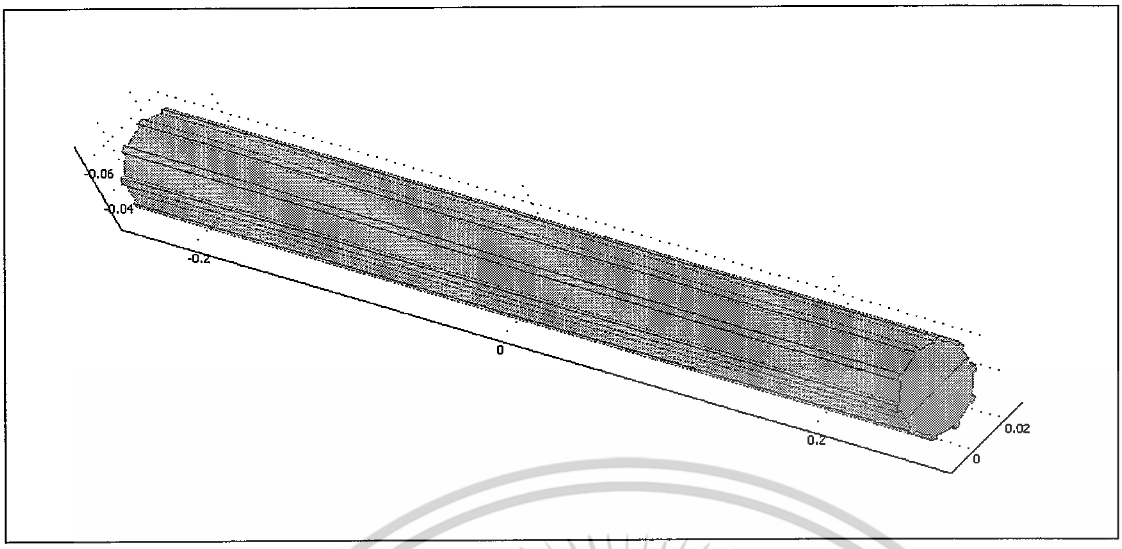


รูปที่ 3.14 รูปแบบตัวอย่างการกำหนดค่าขณะมีการป้อนแรงในการโค้งงอสายเคเบิล

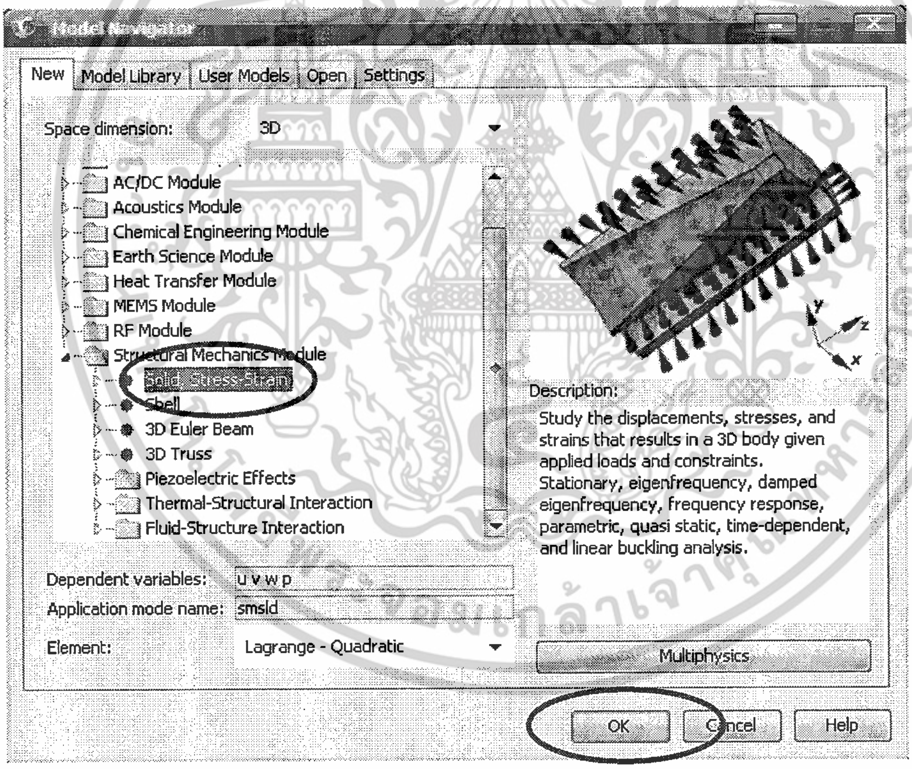


รูปที่ 3.15 ตัวอย่างแบบจำลองของสายเคเบิลที่ได้ที่มีผลิตใช้ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็น[…]ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

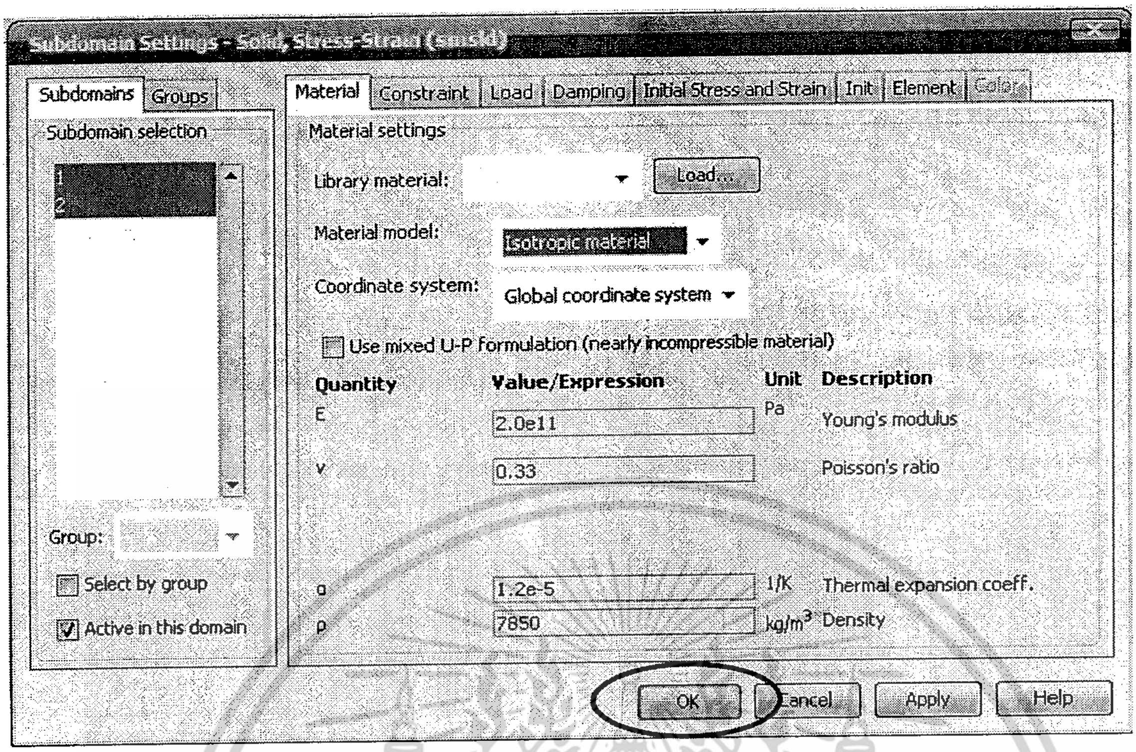


รูปที่ 3.16 ตัวอย่างแบบจำลองของสายเคเบิลที่ออกแบบ

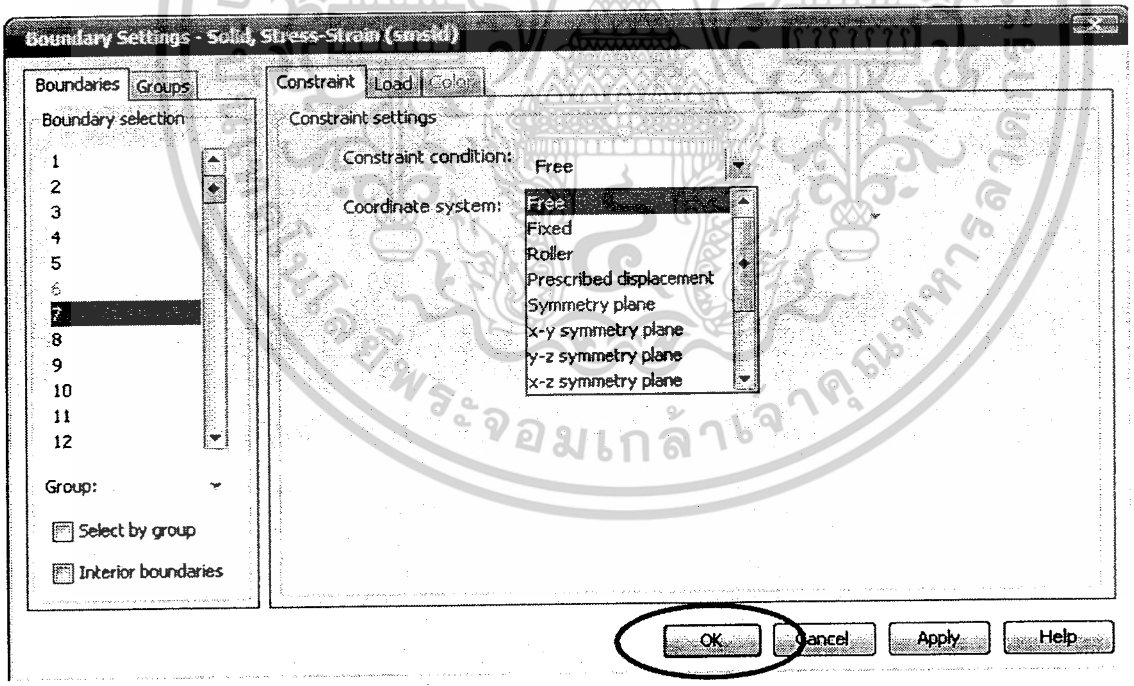


รูปที่ 3.17 การเลือกฟังก์ชั่นการใช้งานในการพิจารณาทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



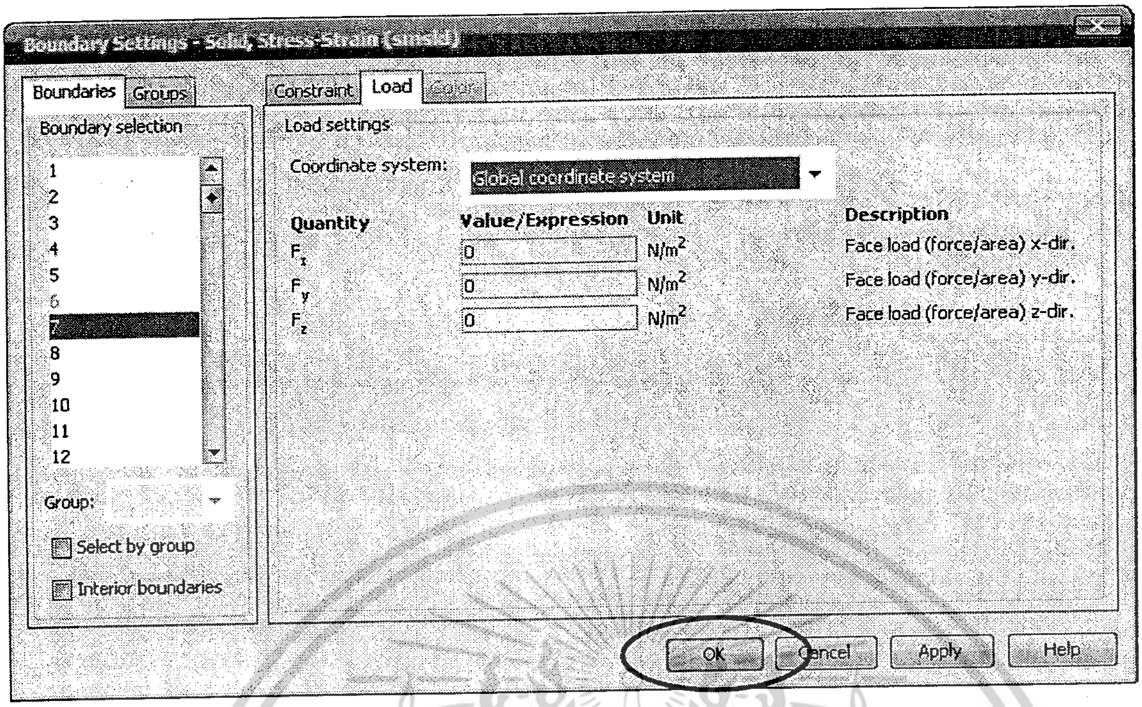
รูปที่ 3.18 การกำหนด (Subdomain Settings) ในการพิจารณาทางกล



รูปที่ 3.19 การกำหนด (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางกล

ใช้ในกรณีต้องการกำหนดให้วัสดุสามารถเคลื่อนไหวได้

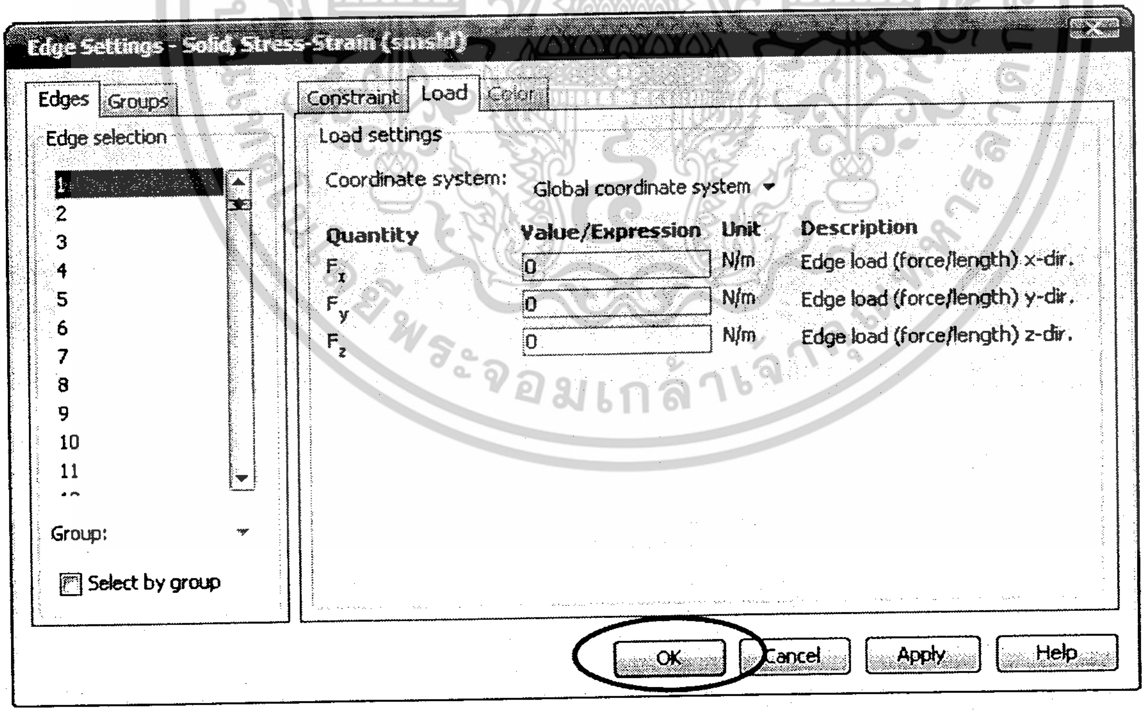
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การกำหนด (Boundary Settings) ในการพิจารณาทางกล

ใช้ในกรณีต้องการกำหนดทิศทางในแนวแกนต่างๆของวัสดุด้วยแรงขนาดใด ๆ

ในหน่วย นิวตันต่อตารางเมตร

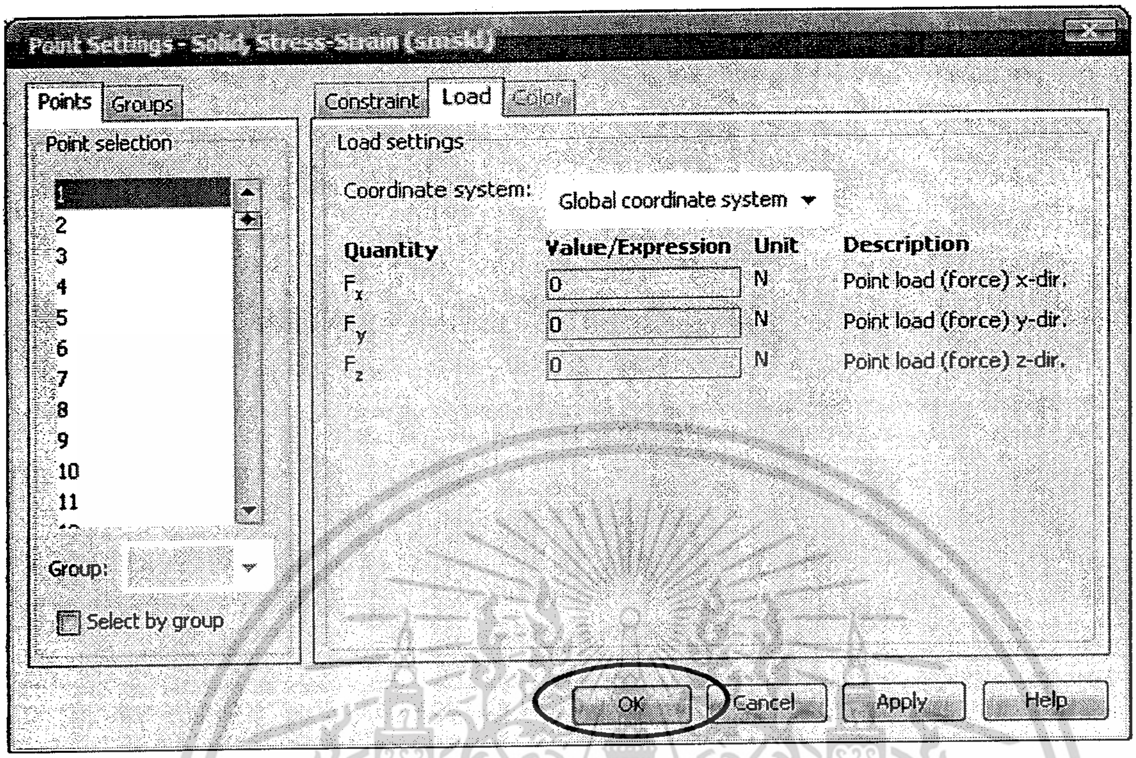


รูปที่ 3.21 การกำหนด (Edge Settings) ในการพิจารณาทางกล

ใช้ในกรณีต้องการกำหนดทิศทางในแนวส่วนเส้นขอบของวัสดุด้วยแรงใด ๆ

ในหน่วย นิวตันต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 การกำหนด (Point Settings) ในการพิจารณาทางกล

ใช้ในกรณีต้องการกำหนดทิศทางเป็นจุดที่วัสดุด้วยแรงใดๆ ในหน่วย นิวตันต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการออกแบบ

เนื่องจากในการออกแบบสายเคเบิลใต้ดิน เพื่อแก้ปัญหาการใช้งานสายนั้น เราต้องมีการพิจารณาทั้งทางไฟฟ้า ทางความร้อน และทางกล โดยเปรียบเทียบกับสายที่ได้มีการใช้งานจริง เพื่อจะได้แน่ใจว่าโครงสร้างของสายที่เราได้ทำการออกแบบมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นในส่วนที่ต้องการและส่วนที่เหลือจะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานหรือผู้ผลิต ซึ่งหลักสำคัญในการออกแบบสายเคเบิลเพื่อแก้ปัญหาการใช้งานสาย มีอยู่ว่าจะต้องรักษาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิลให้คงที่ ดังนั้นการออกแบบต้องมีการศึกษาเปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ได้มีการผลิตนำมาใช้งานในปัจจุบันด้วย

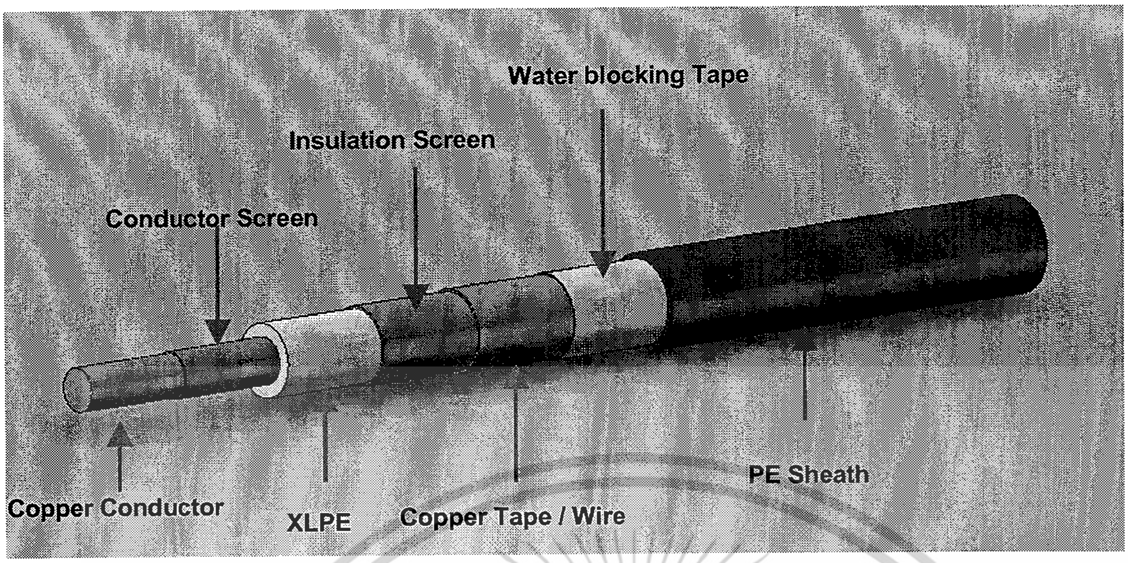
ขอบเขตในการพิจารณาสายเคเบิลใต้ดินที่ได้ทำการออกแบบ เพื่อแก้ปัญหาการใช้งานสาย แบ่งออกเป็น 3 แนวทางด้วยกันคือ

4.1 ทางไฟฟ้า (ป้อนค่าแรงดันที่ 12 kV.)
- ศักย์ไฟฟ้า
- สนามไฟฟ้า
- การกระจายสนามไฟฟ้าภายในสาย

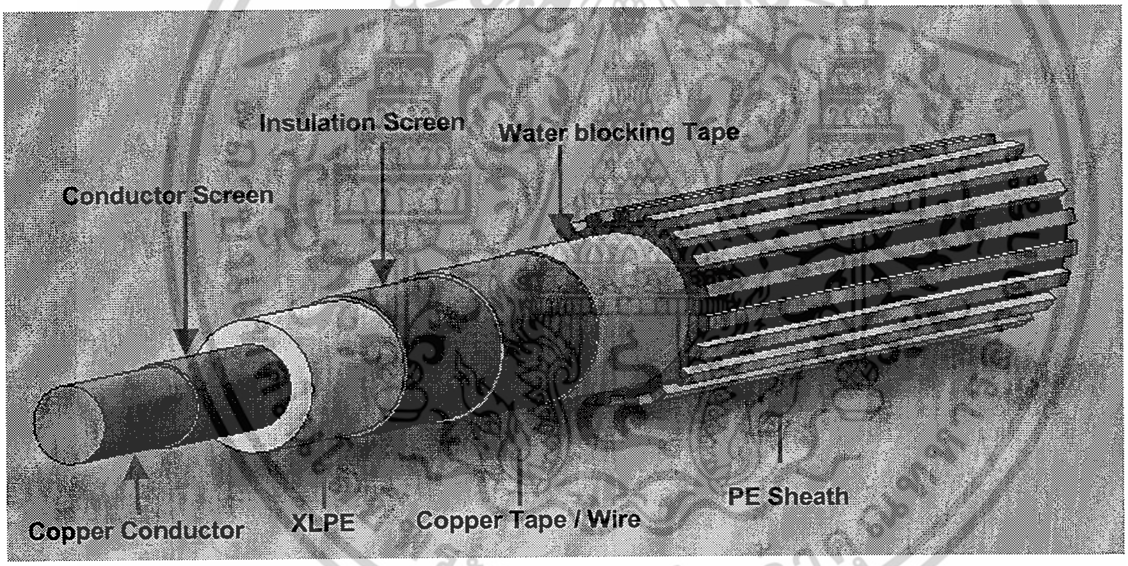
4.2 ทางความร้อน
- อุณหภูมิภายในสาย
- ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย

4.3 ทางกล
- การดึงปลายสาย
- การโค้งงอสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ก] โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน

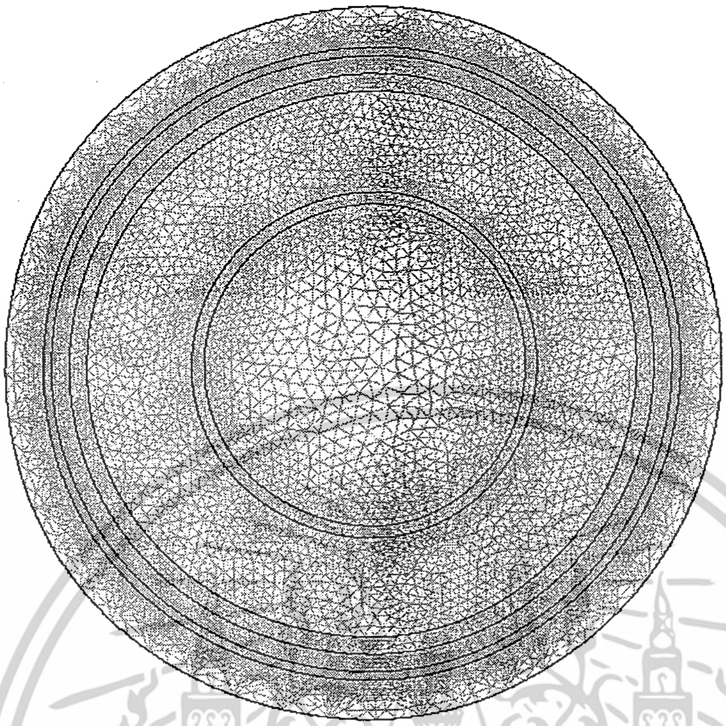


[ข] โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินที่ได้ทำการออกแบบ

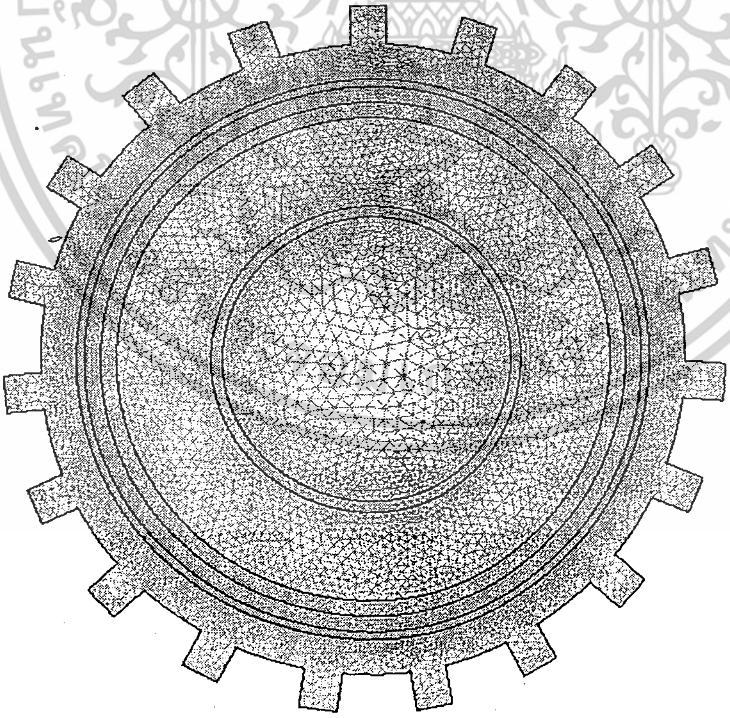
รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV
พื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดงขนาด 240 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการออกแบบเมื่อพิจารณาทางด้านไฟฟ้า



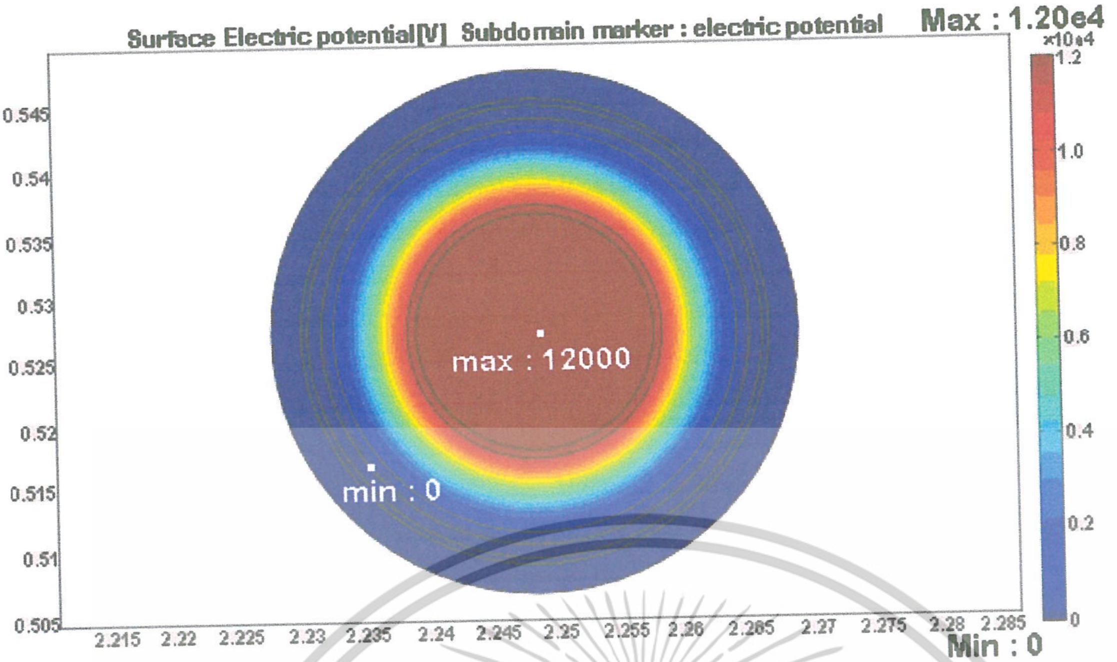
[ก] การตี Mash โครงสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้



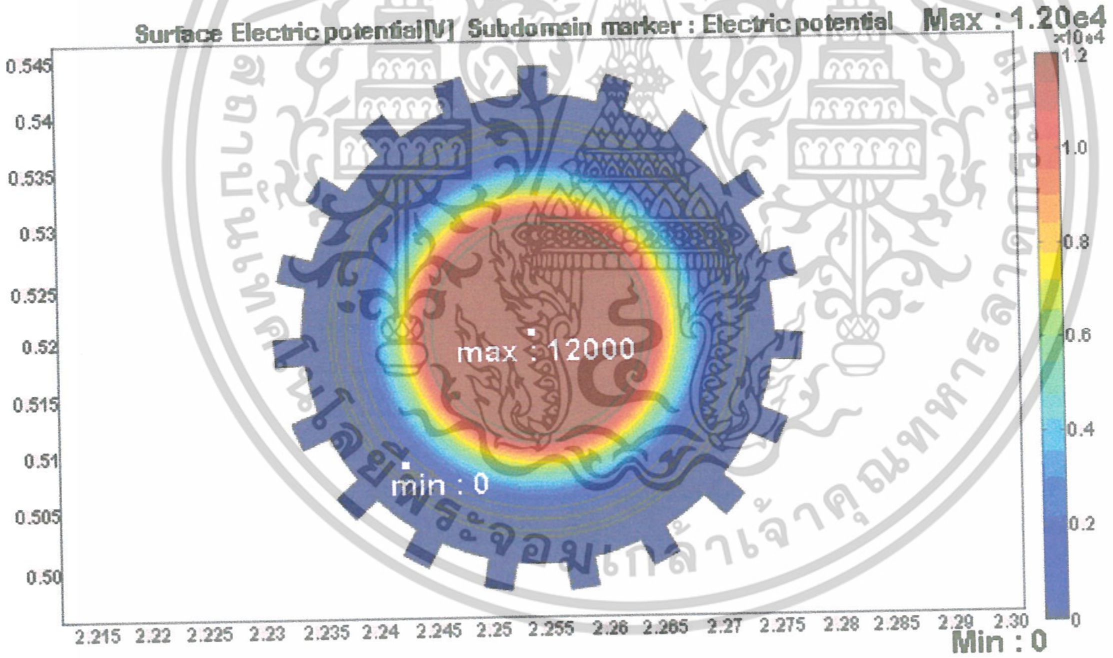
[ข] การตี Mash โครงสายเคเบิลที่ทำการออกแบบ

รูปที่ 4.2 การตี Mash โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



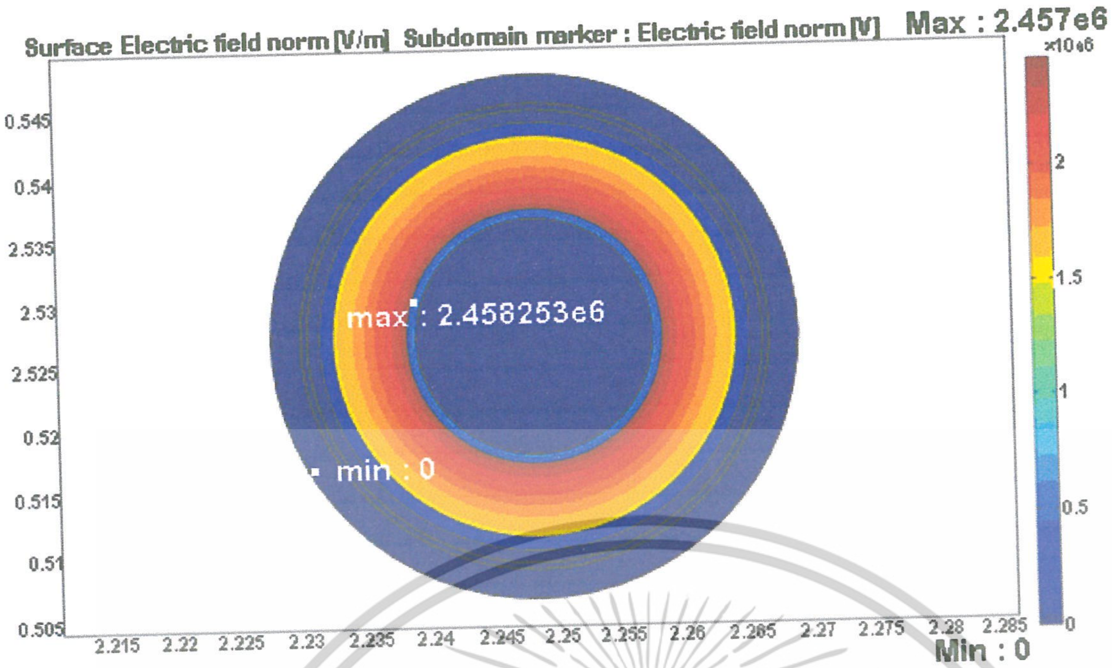
[ก] ศักย์ไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้ $V_{\max} = 12kV$



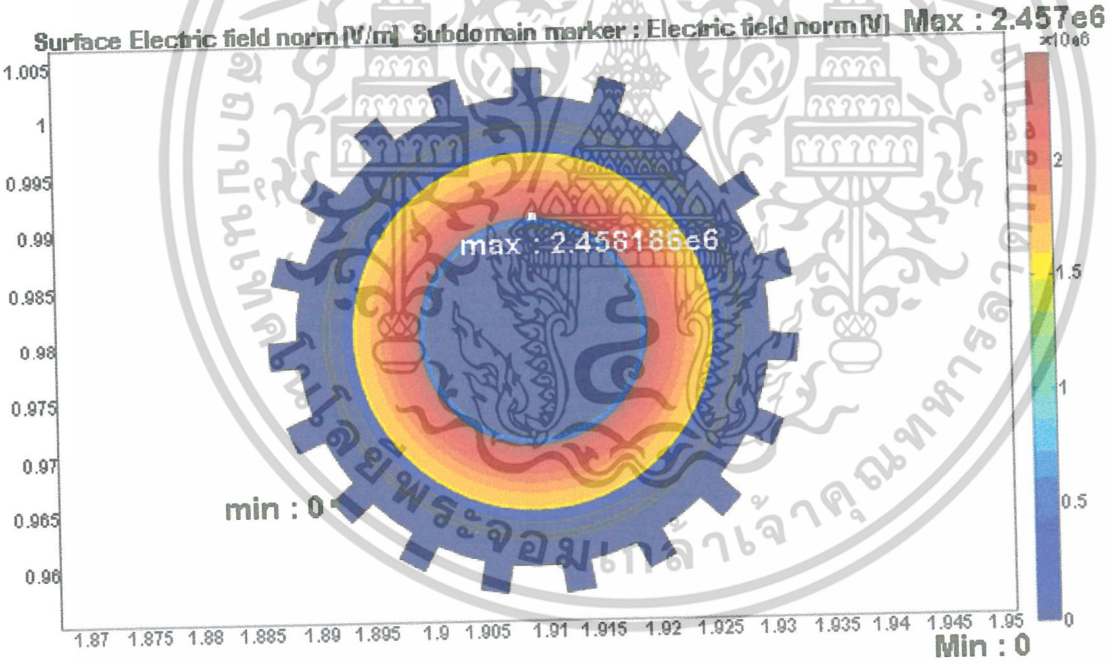
[ข] ศักย์ไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่ออกแบบ $V_{\max} = 12kV$

รูปที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



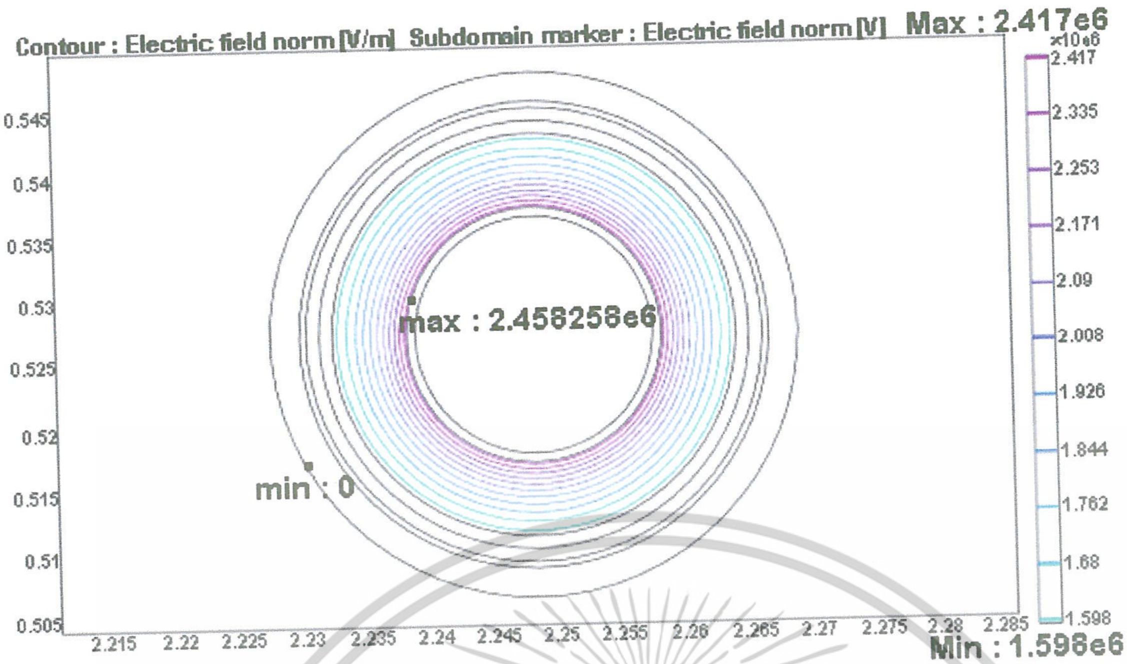
[ก] สนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้ $E_{max} = 2.46 \times 10^6 V/m$



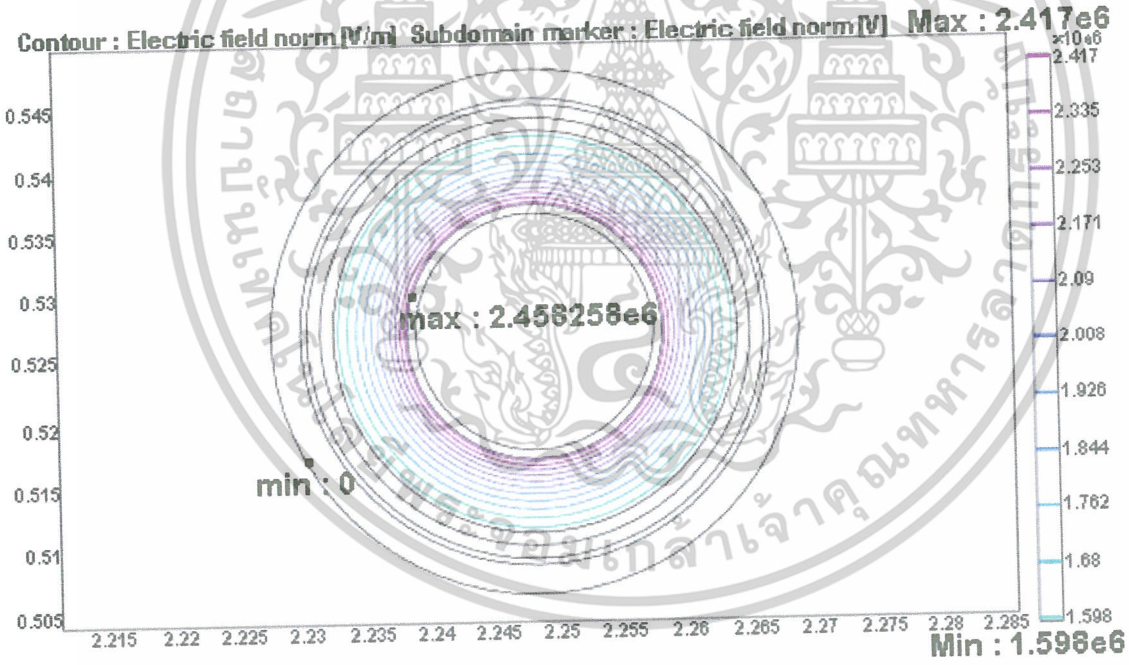
[ข] สนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่ออกแบบ $E_{max} = 2.46 \times 10^6 V/m$

รูปที่ 4.4 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



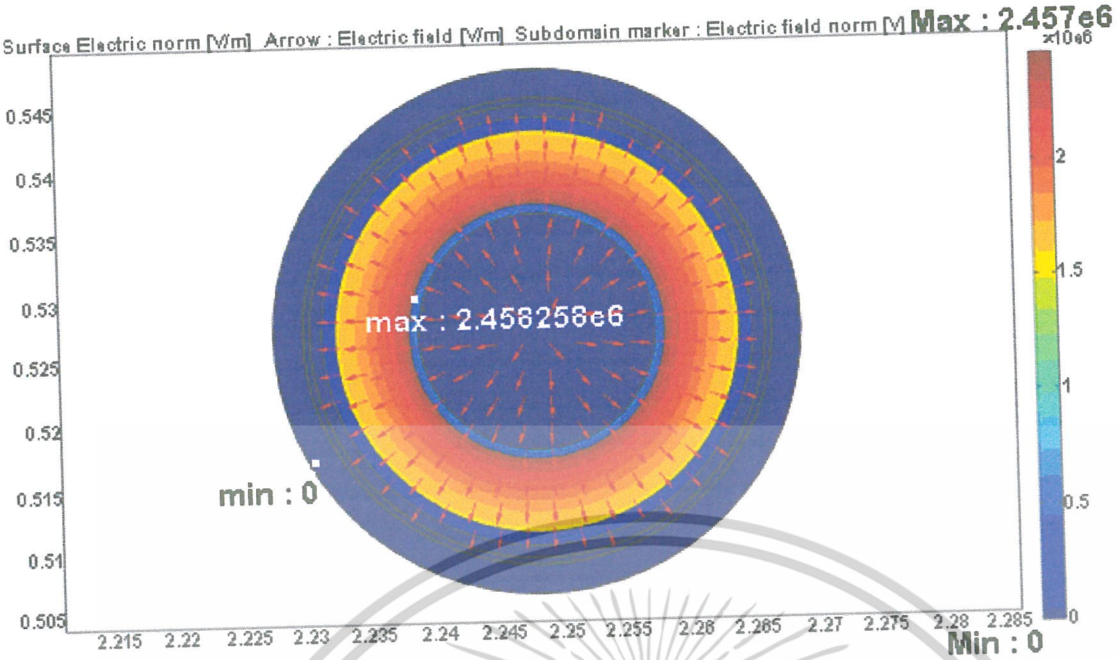
[ก] เส้นระดับสนามไฟฟ้า (Contour) ภายในสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้



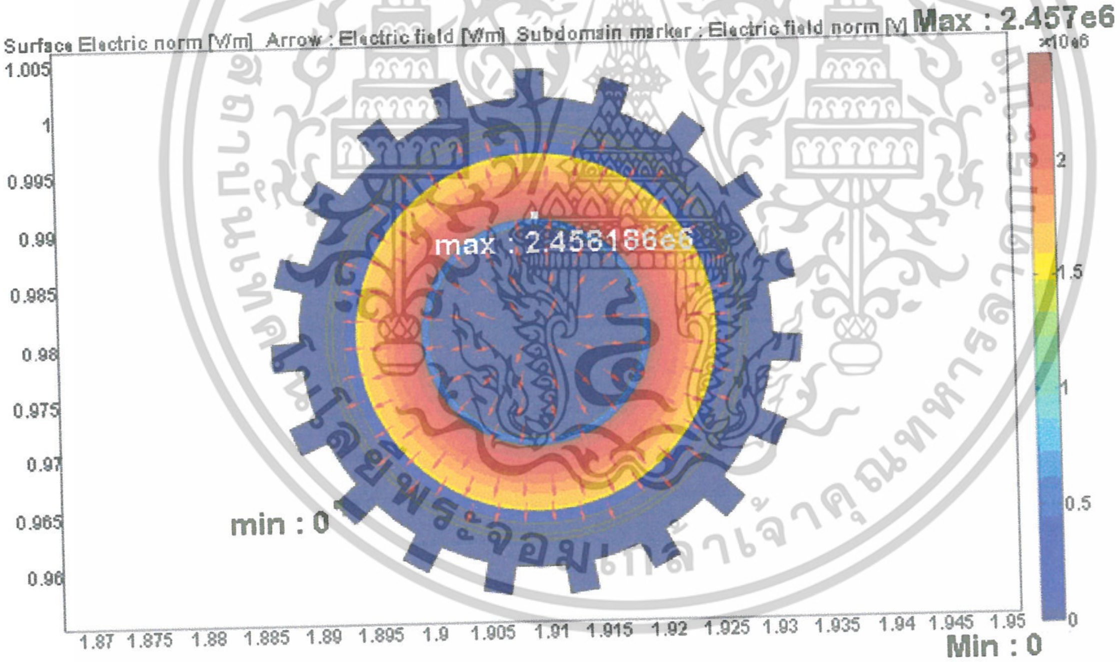
[ข] เส้นระดับสนามไฟฟ้า (Contour) ภายในสายเคเบิลที่ออกแบบ

รูปที่ 4.5 เส้นระดับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



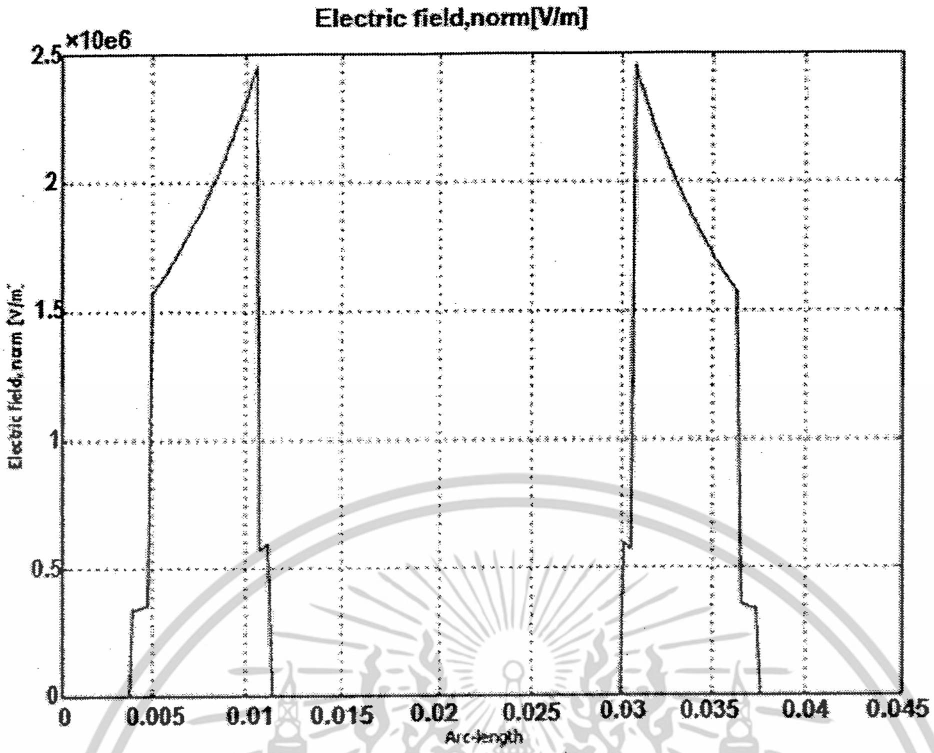
[ก] ทิศทางการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้



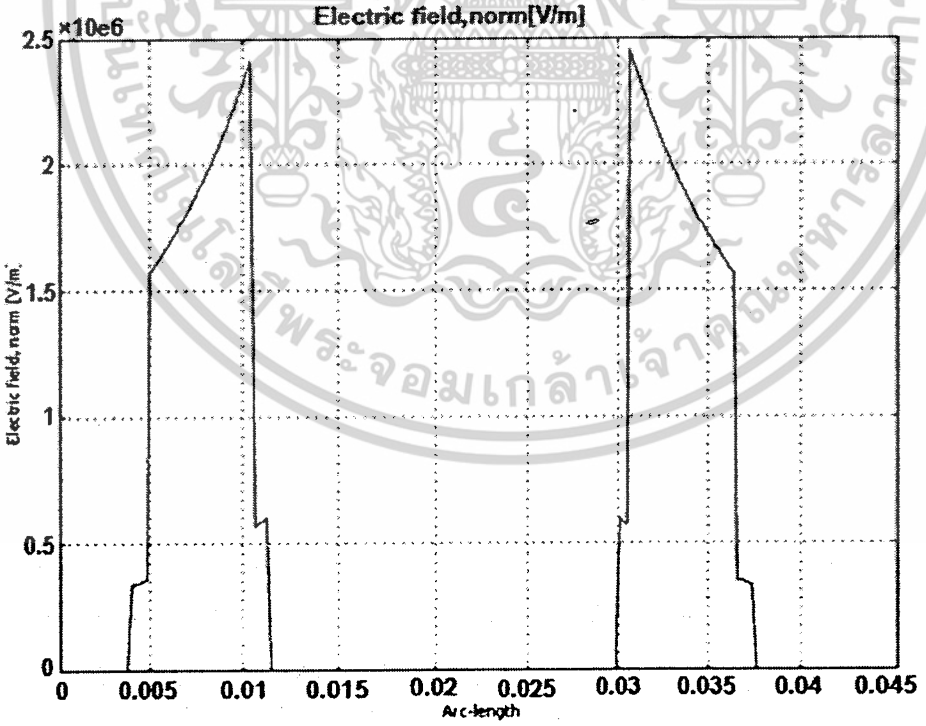
[ข] ทิศทางการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่ออกแบบ

รูปที่ 4.6 ทิศทางการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



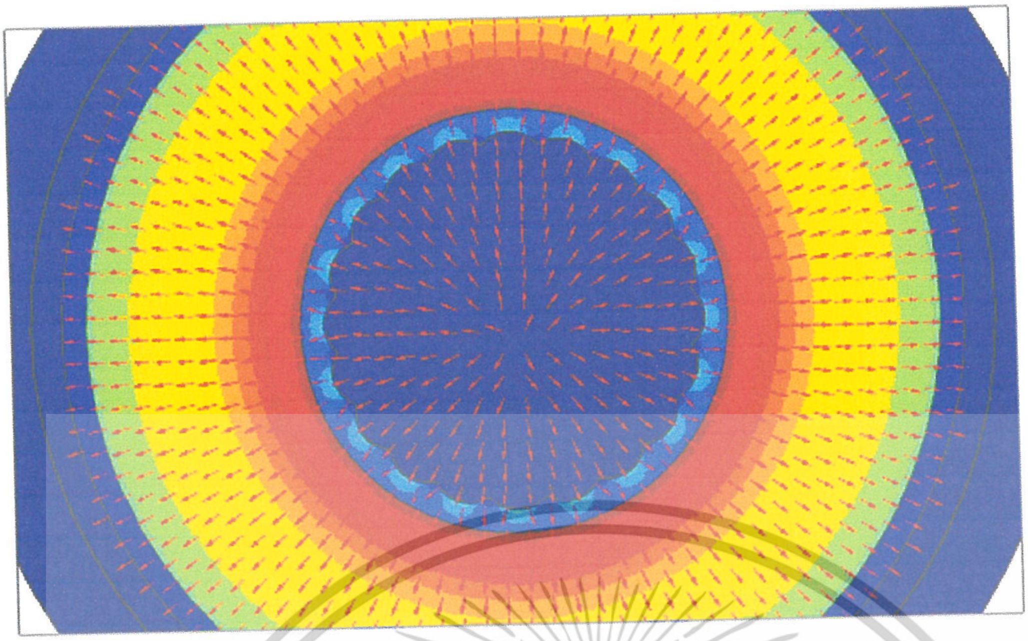
[ก] กราฟแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้



[ข] กราฟแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลที่ออกแบบ

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

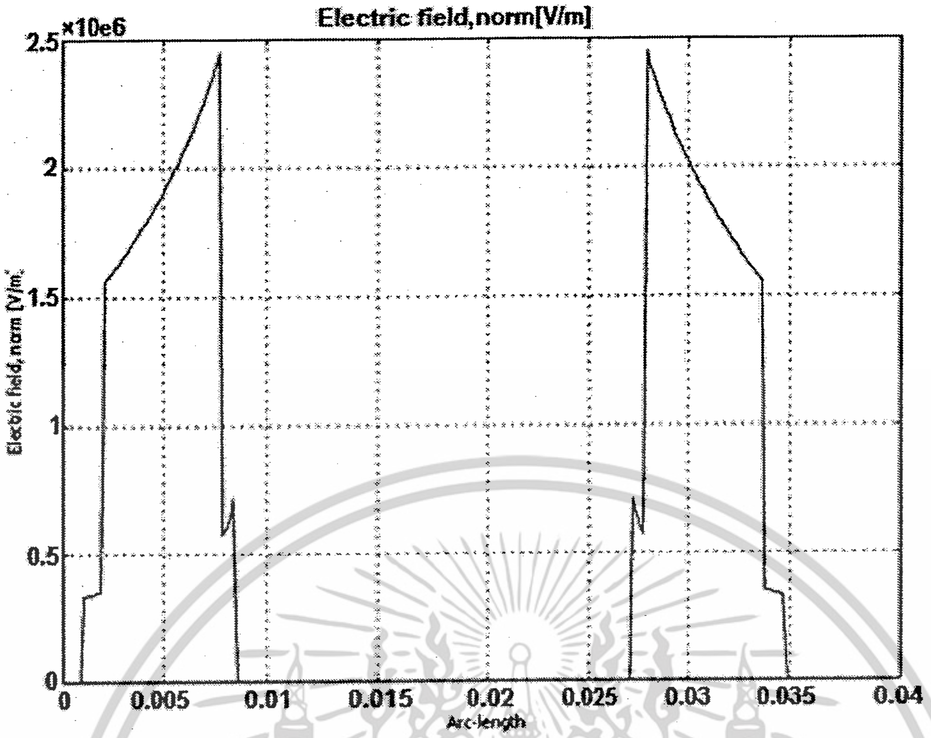


[ก] Copper Tape

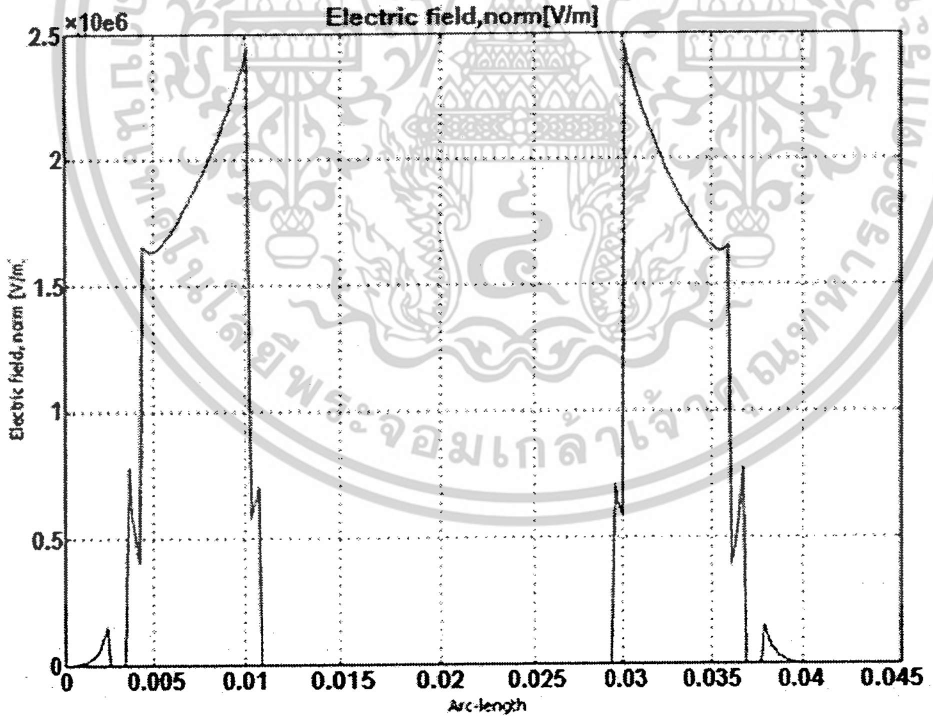
[ข] Copper Wires

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน ระหว่าง Copper Tape และ Copper Wire

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ก] Copper Tape

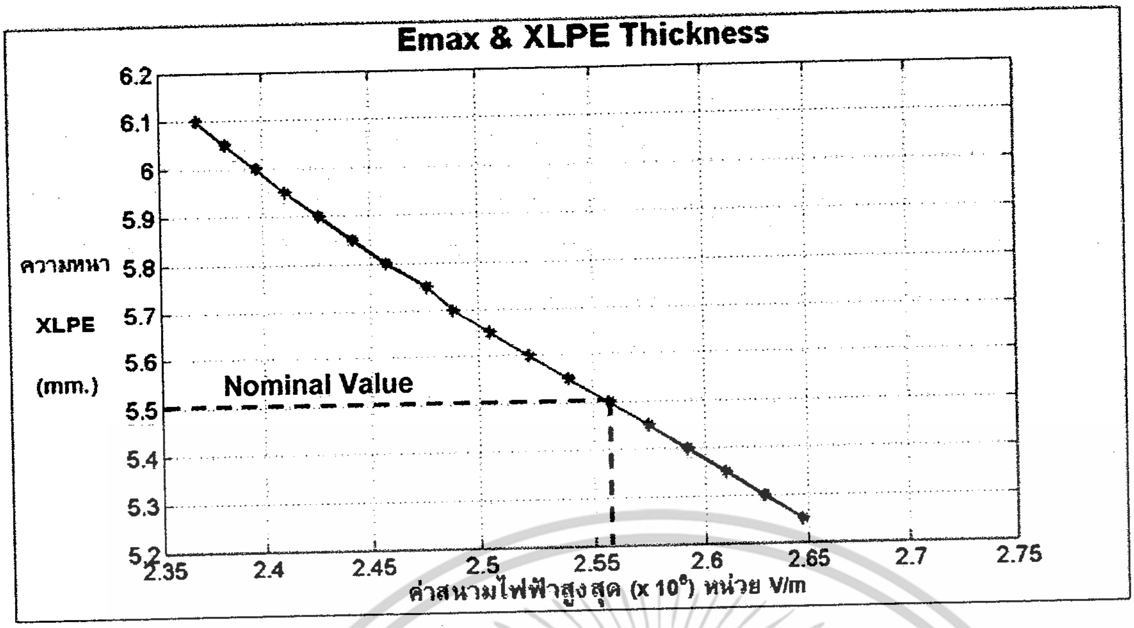


[ข] Copper Wires

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิลใต้ดิน

ระหว่าง Copper Tape และ Copper Wire

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาเนื้อฉนวนของสายกับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

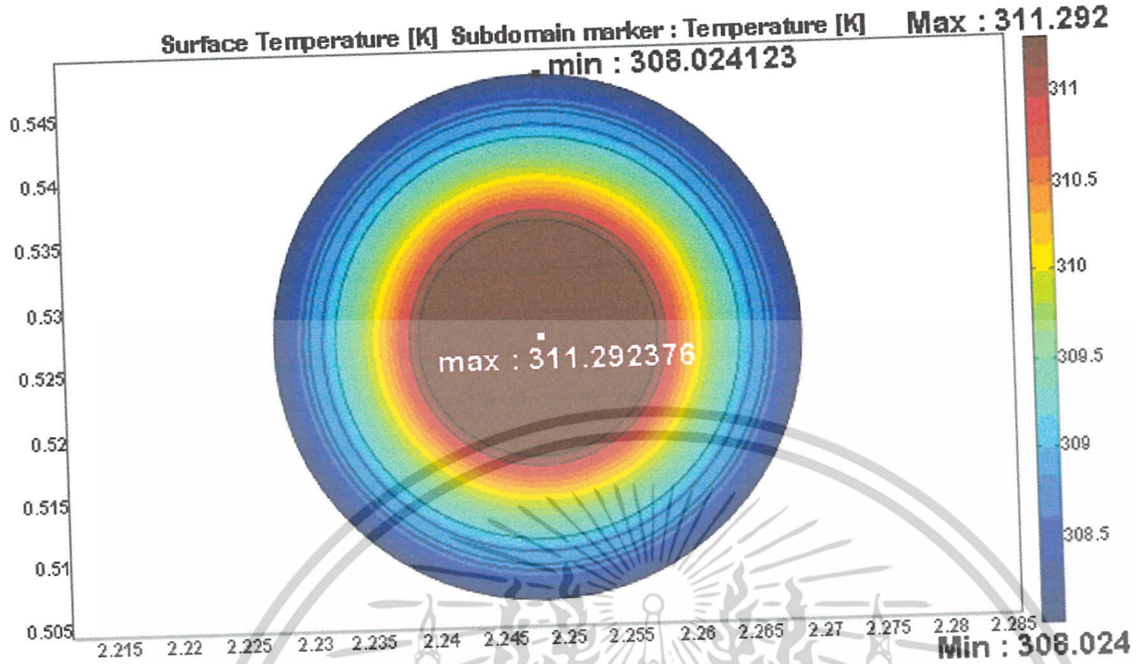
4.2 ผลการออกแบบเมื่อพิจารณาทางด้านความร้อน

เมื่อพิจารณาผลทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย จะมีการให้ความสำคัญทางด้านอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสาย เมื่อมีการจ่ายกระแสให้กับสายเคเบิลขนาด 400 A และสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของแหล่งกำเนิดความร้อน (Heat Source :Q) หน่วย W/m^2 ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ 3.10 ถึงสมการ 3.12 และตัวอย่างการคำนวณทางความร้อนในบทที่ 3 เห็นได้ว่าเมื่อสายได้รับกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายก็จะสูงขึ้น และส่งผลให้อุณหภูมิภายในสายสูงขึ้นด้วย ในที่นี้เราพิจารณาอุณหภูมิภายนอกสายเคเบิล ควบคู่กับการพิจารณาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ โดยทั่วไปให้ถือว่าบริเวณที่มีการติดตั้งสายเคเบิลมีอุณหภูมิภายนอกที่ 30 องศาเซลเซียส และมีสัมประสิทธิ์การพาของอากาศที่ 20 $W/(m^2.K)$

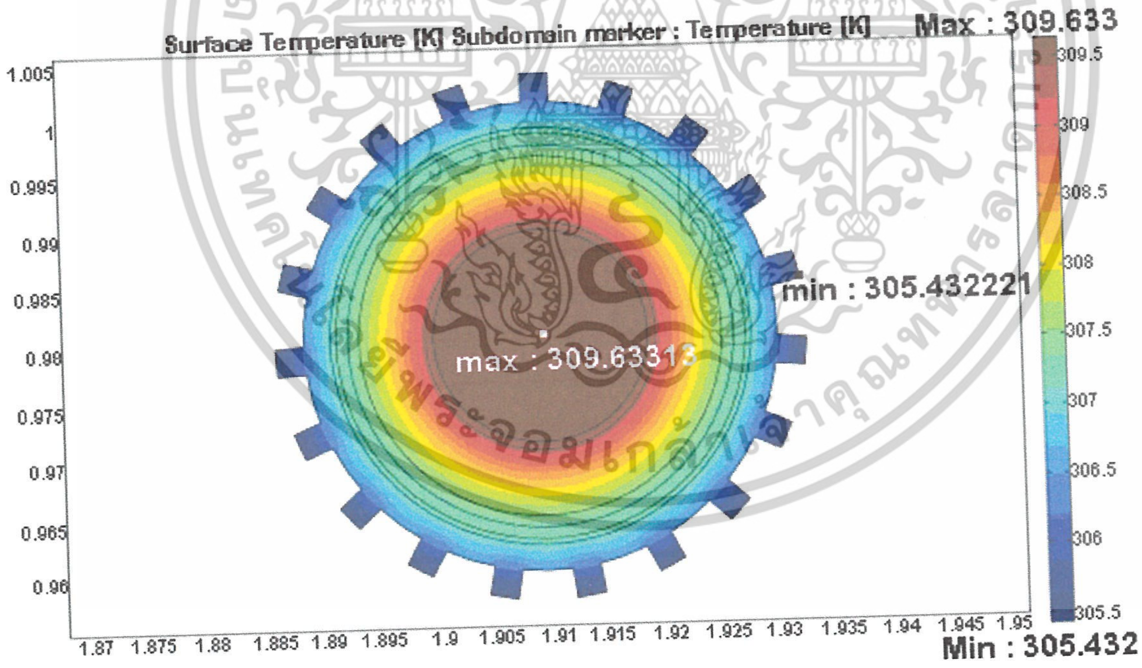
เมื่อ $$0^{\circ}C = 273.15^{\circ}K \tag{4.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การพิจารณาทางความร้อนเมื่อมีอากาศเป็นตัวกลางในการพาความร้อน



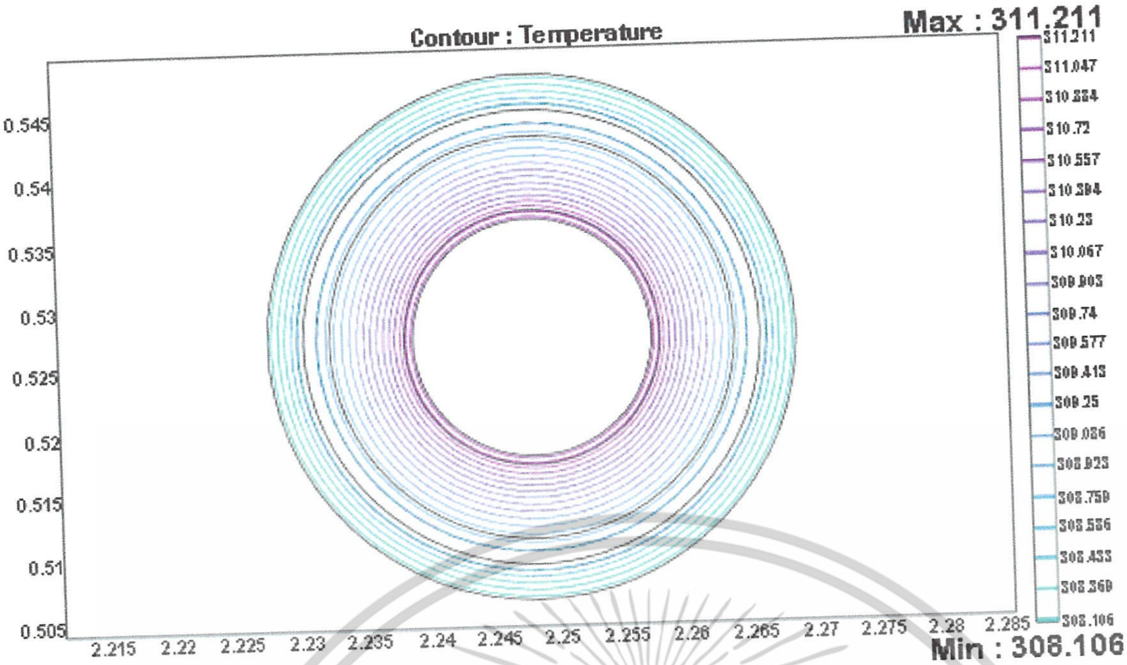
[ก] อุณหภูมิในสายที่ผลิตใช้ (หน่วยเคลวิน)



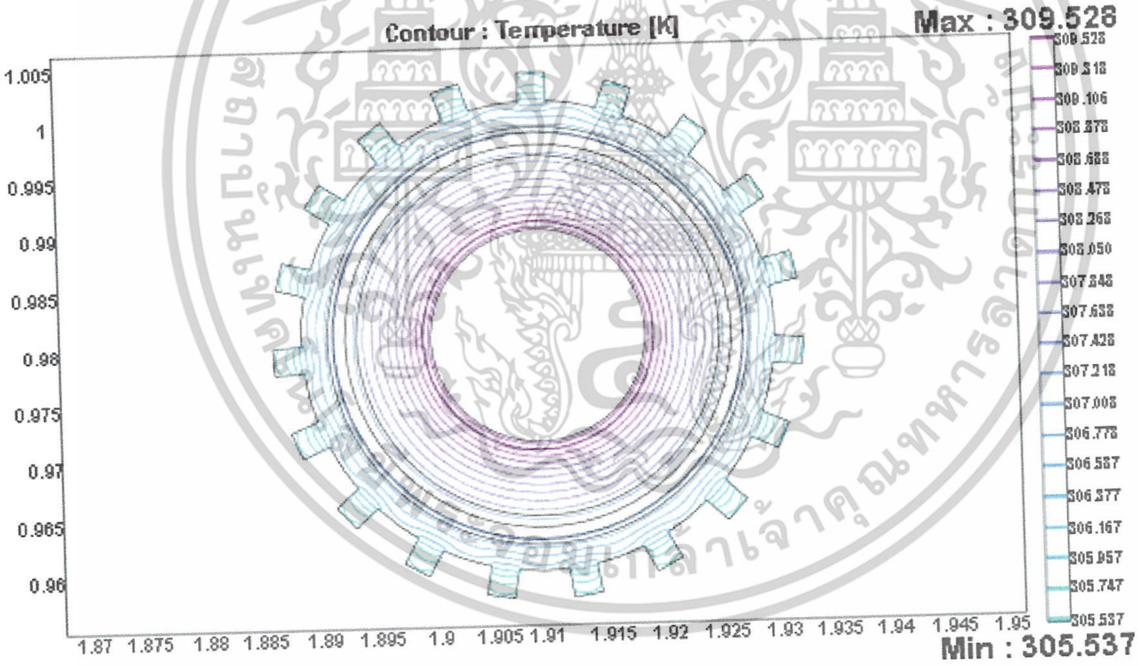
[ข] อุณหภูมิในสายที่ออกแบบ (หน่วยเคลวิน)

รูปที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



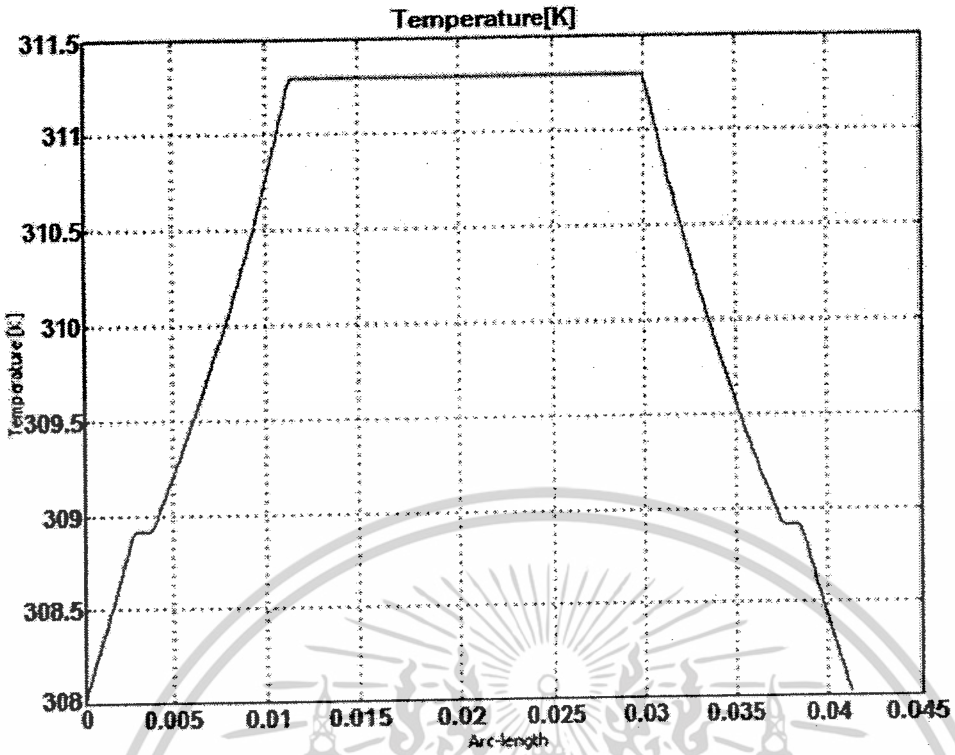
[ก] เส้นระดับ (Contour) ของอุณหภูมิในสายที่ผลิตใช้



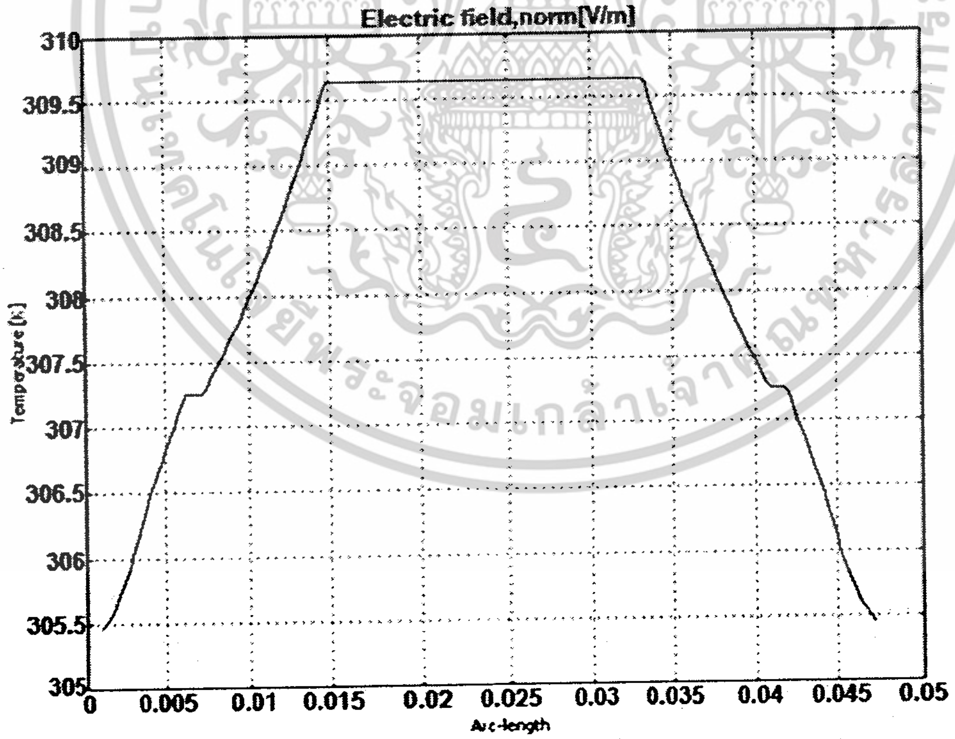
[ข] เส้นระดับ (Contour) ของอุณหภูมิในสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.12 เส้นระดับของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



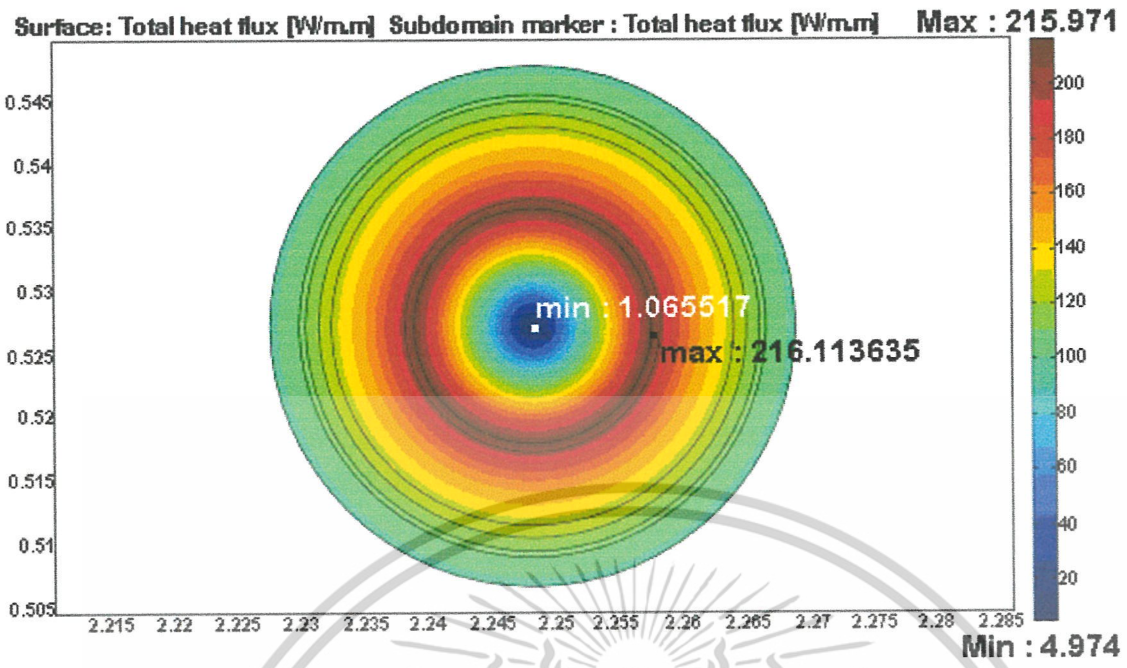
[ก] กราฟแสดงอุณหภูมิในสายที่ผลิตใช้ (หน่วยเคลวิน)



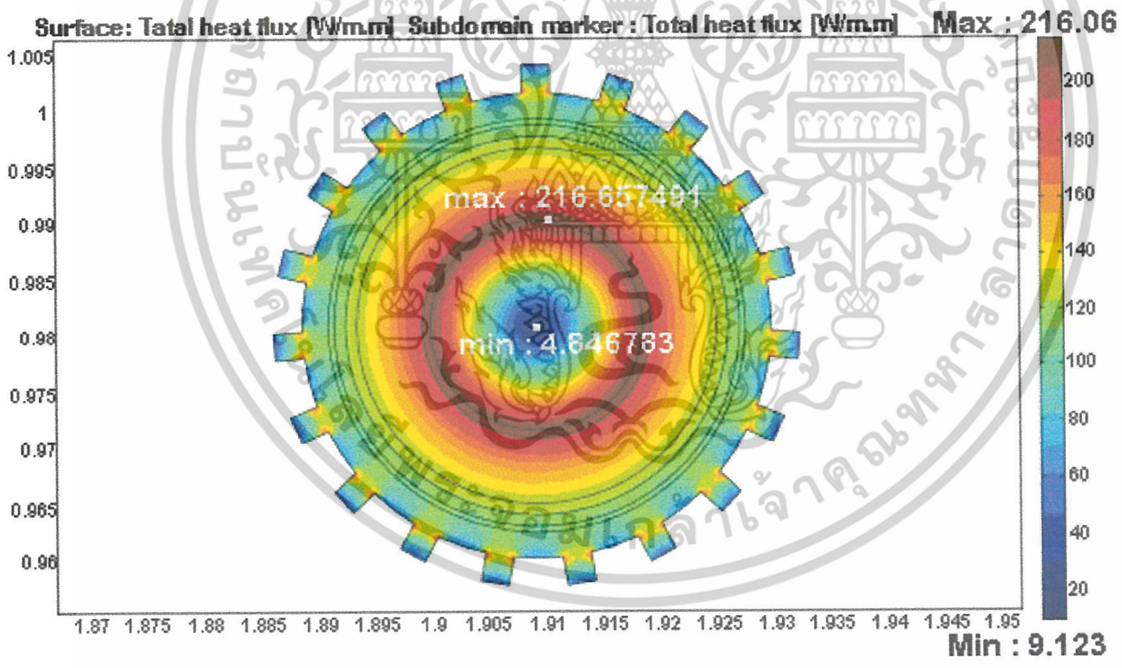
[ข] กราฟแสดงอุณหภูมิในสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอุณหภูมิในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



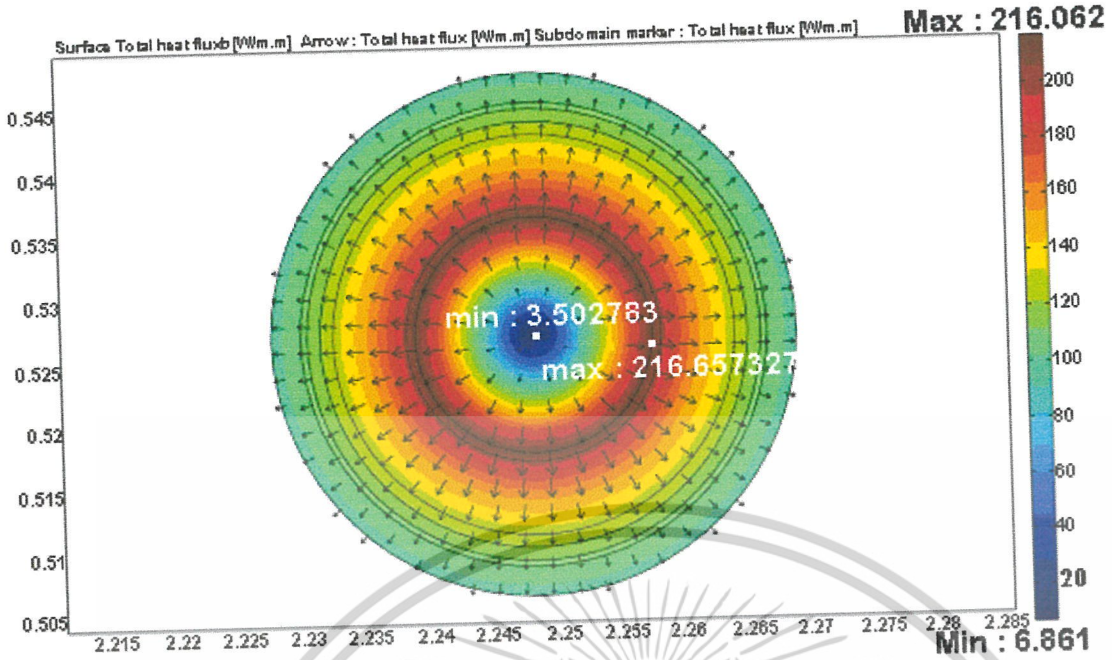
[ก] ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายที่ผลิตใช้



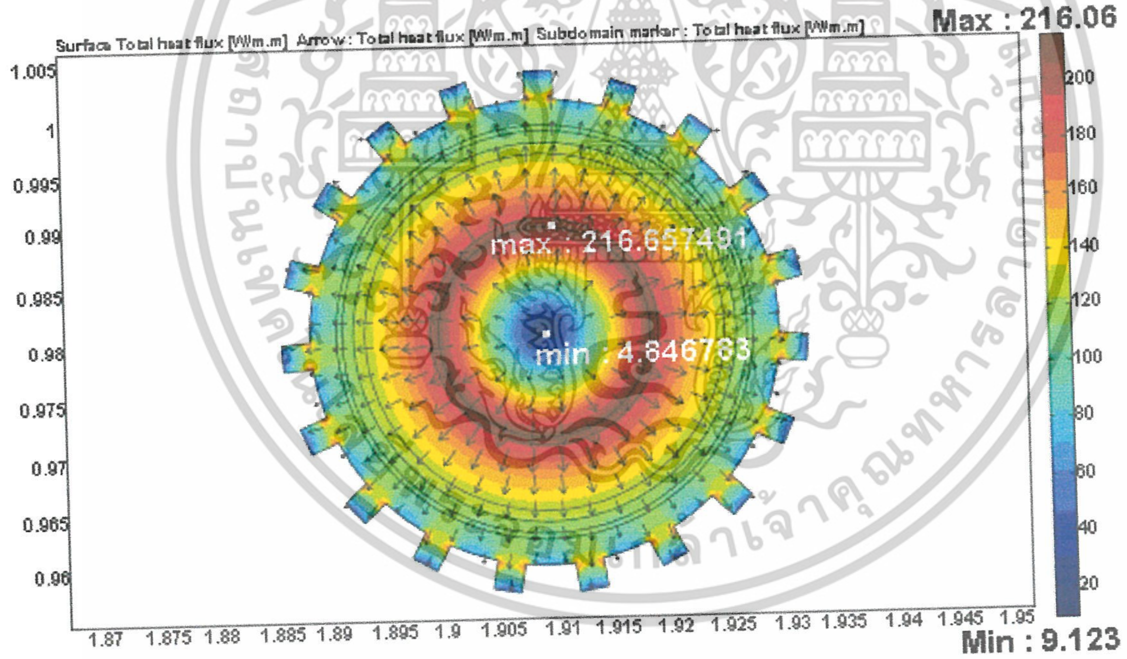
[ข] ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.14 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



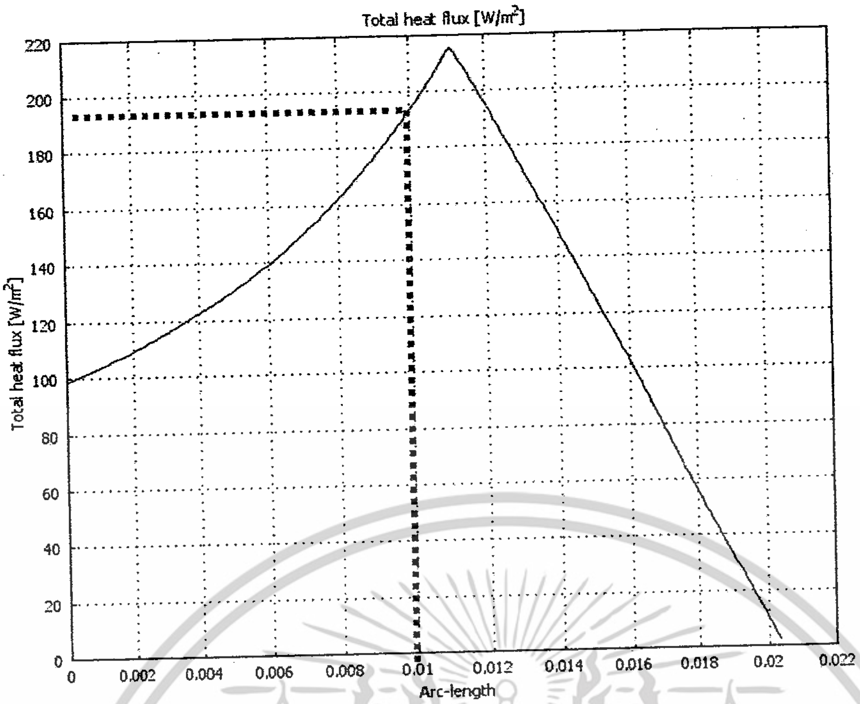
[ก] ทิศทางการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายที่ผลิตใช้



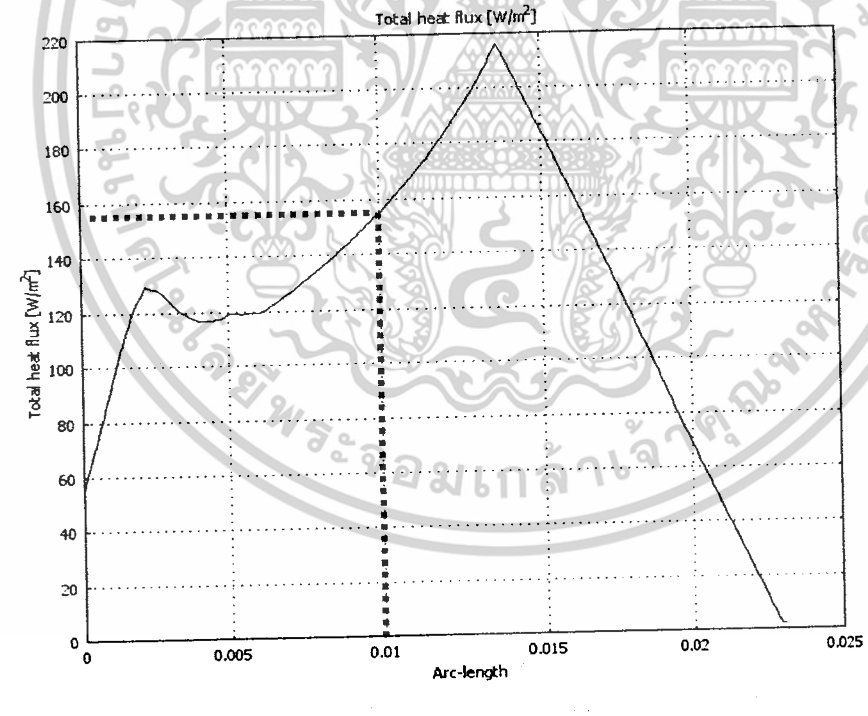
[ข] ทิศทางการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.15 ทิศทางการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



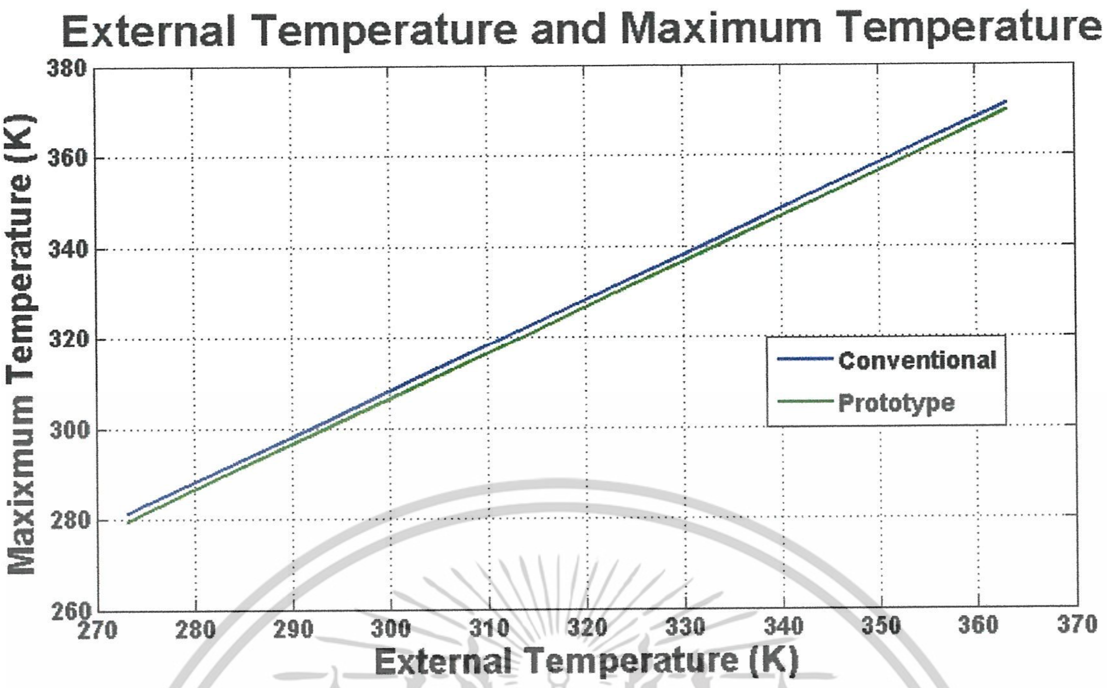
[ก] กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแนวรัศมีภายในสายที่ผลิตใช้



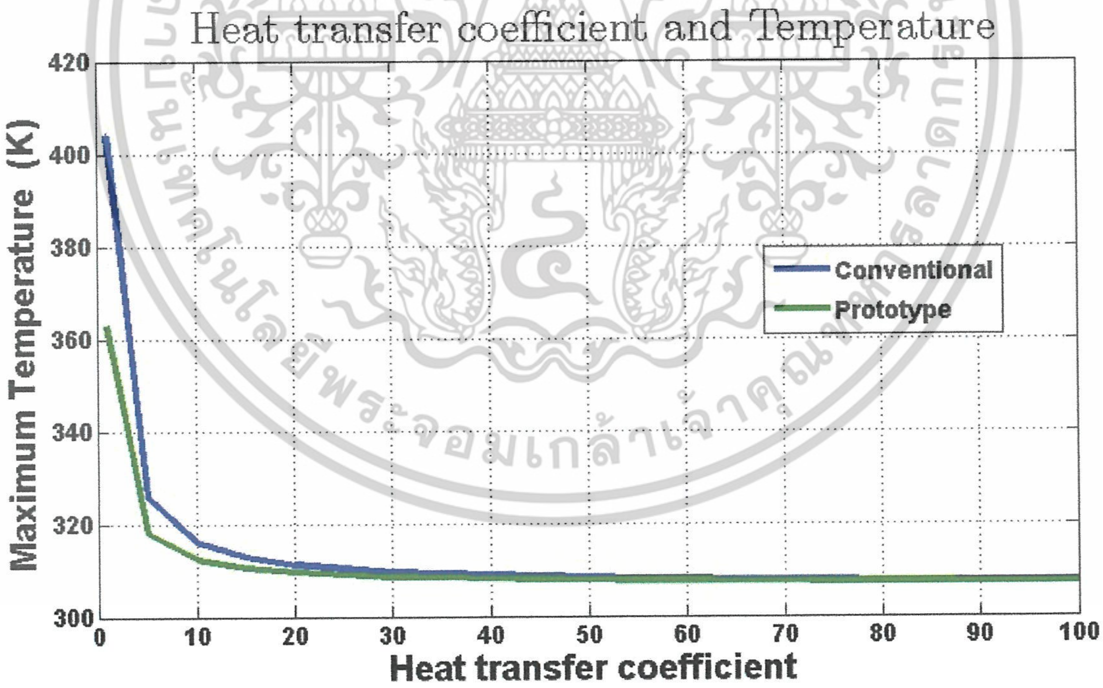
[ข] กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีภายในสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.16 กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



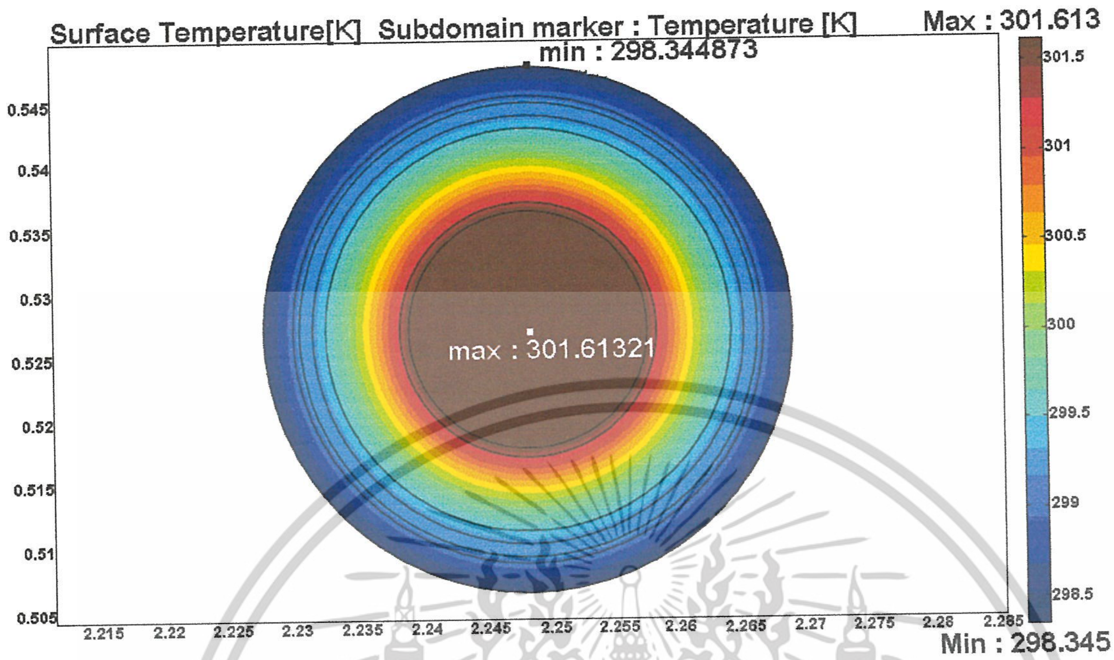
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายนอกสายและความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย โดยเปรียบเทียบระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ออกแบบ



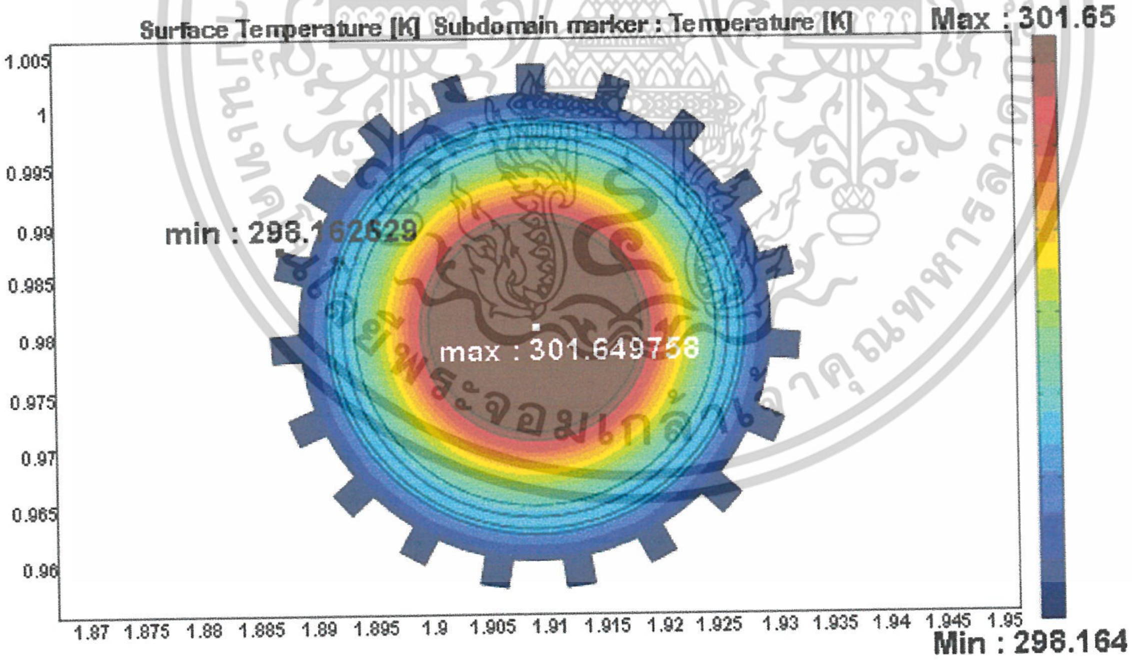
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาของอากาศ ตั้งแต่ 1-100 $W/(m^2.K)$ และความร้อนที่เกิดภายในสาย โดยเปรียบเทียบระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความร้อนเมื่อมีน้ำเป็นตัวกลางในการพาความร้อน



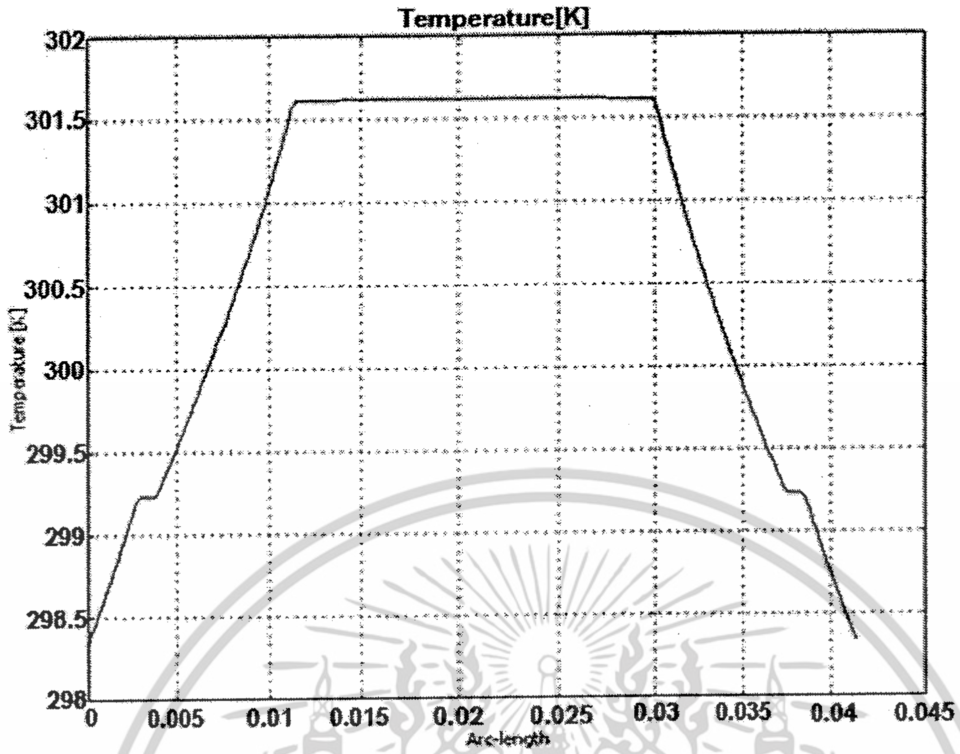
[ก] อุณหภูมิในสายที่ผลิตใช้ (หน่วยเคลวิน)



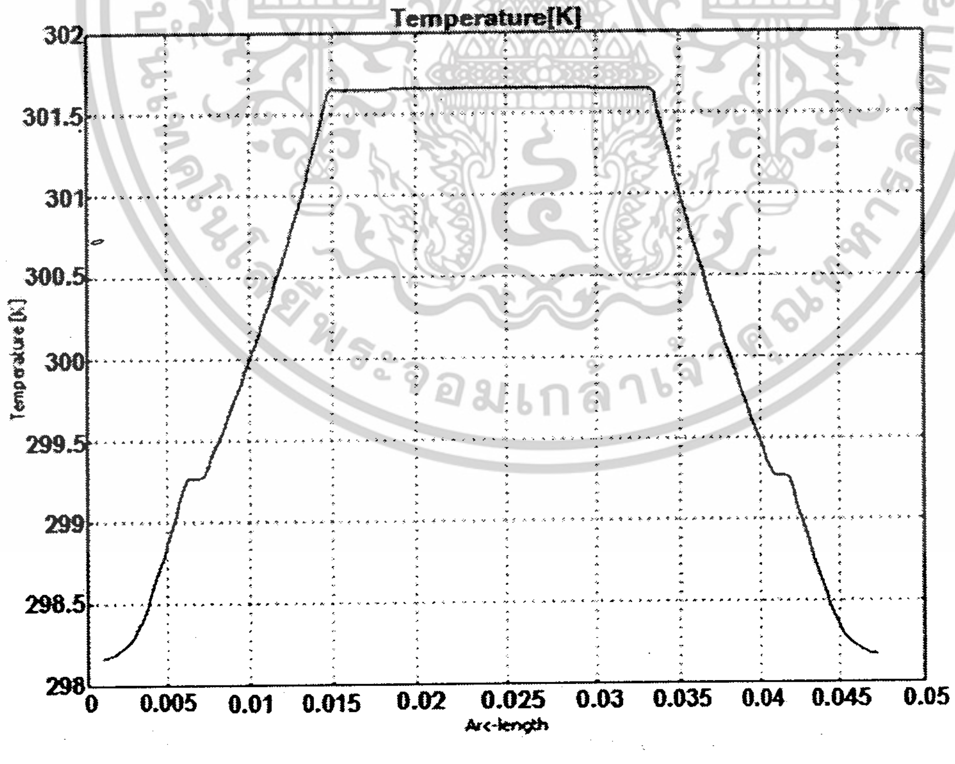
[ข] อุณหภูมิในสายที่ออกแบบ (หน่วยเคลวิน)

รูปที่ 4.19 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



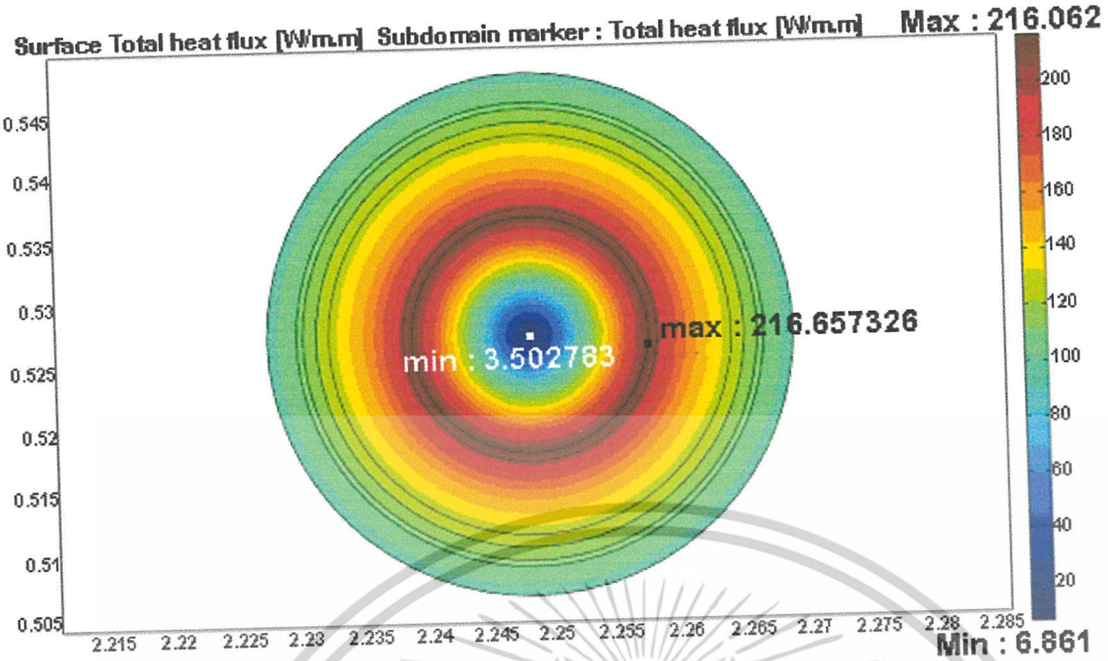
[ก] กราฟแสดงอุณหภูมิในสายที่ผลิตใช้ (หน่วยเคลวิน)



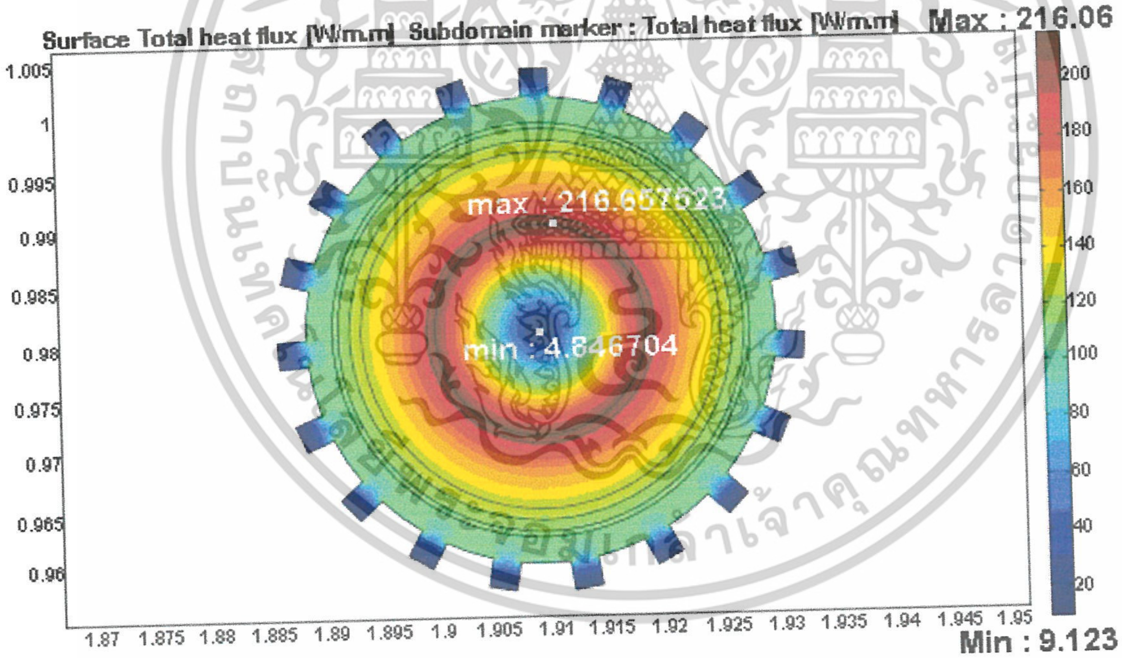
[ข] กราฟแสดงอุณหภูมิในสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงอุณหภูมิในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



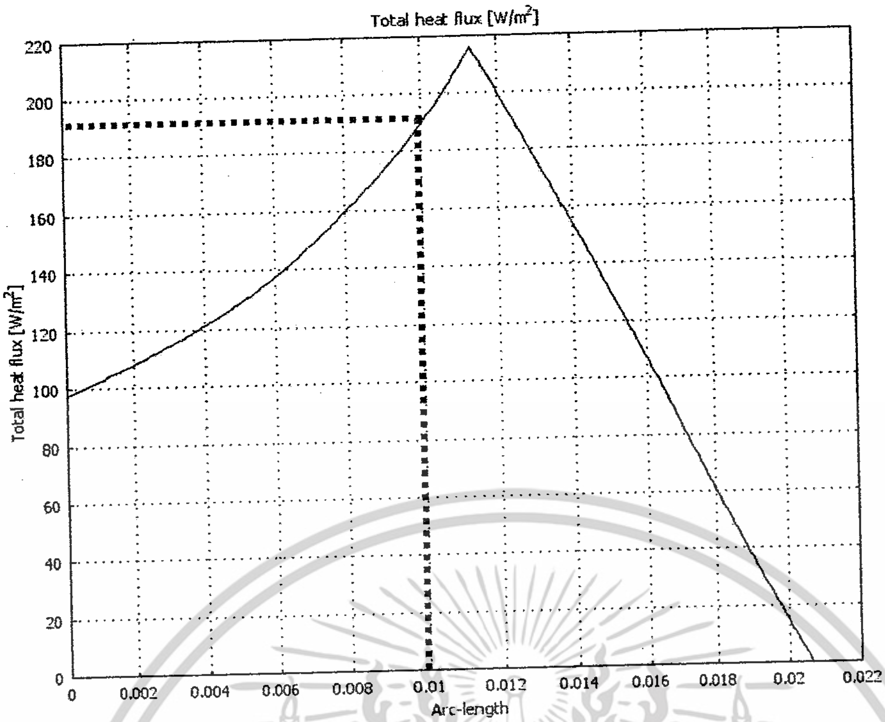
[ก] ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายที่ผลิตใช้



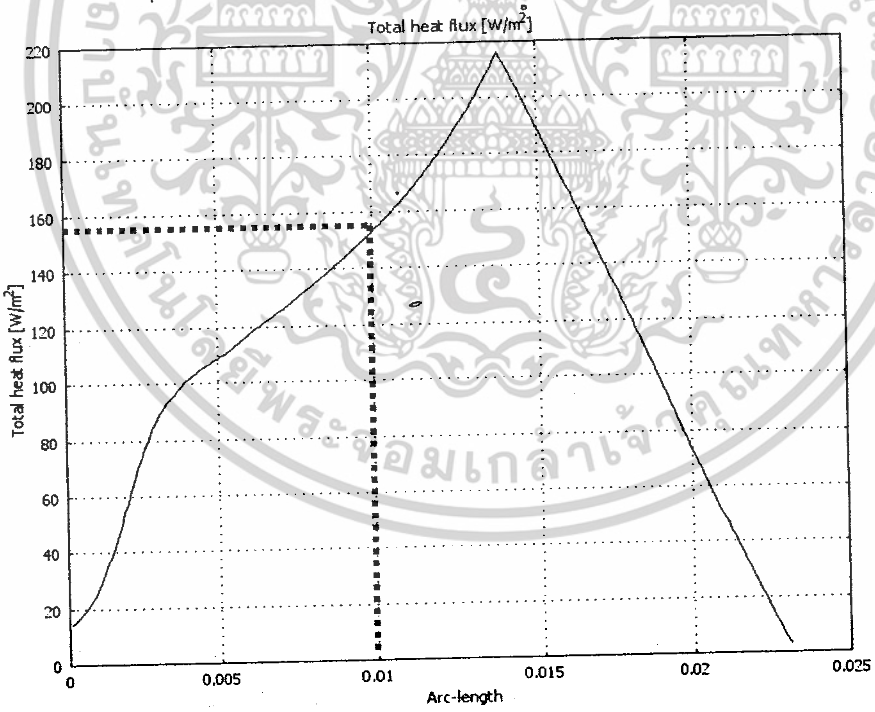
[ข] ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.21 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



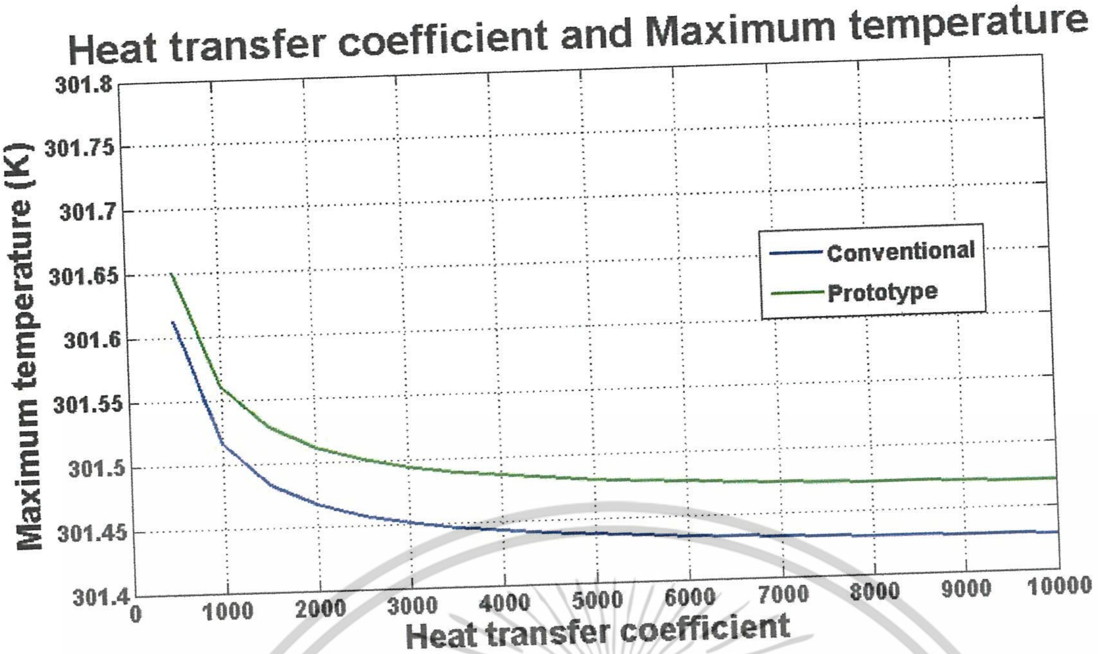
[ก] กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีภายในสายที่ผลิตใช้



[ข] กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีภายในสายที่ออกแบบ

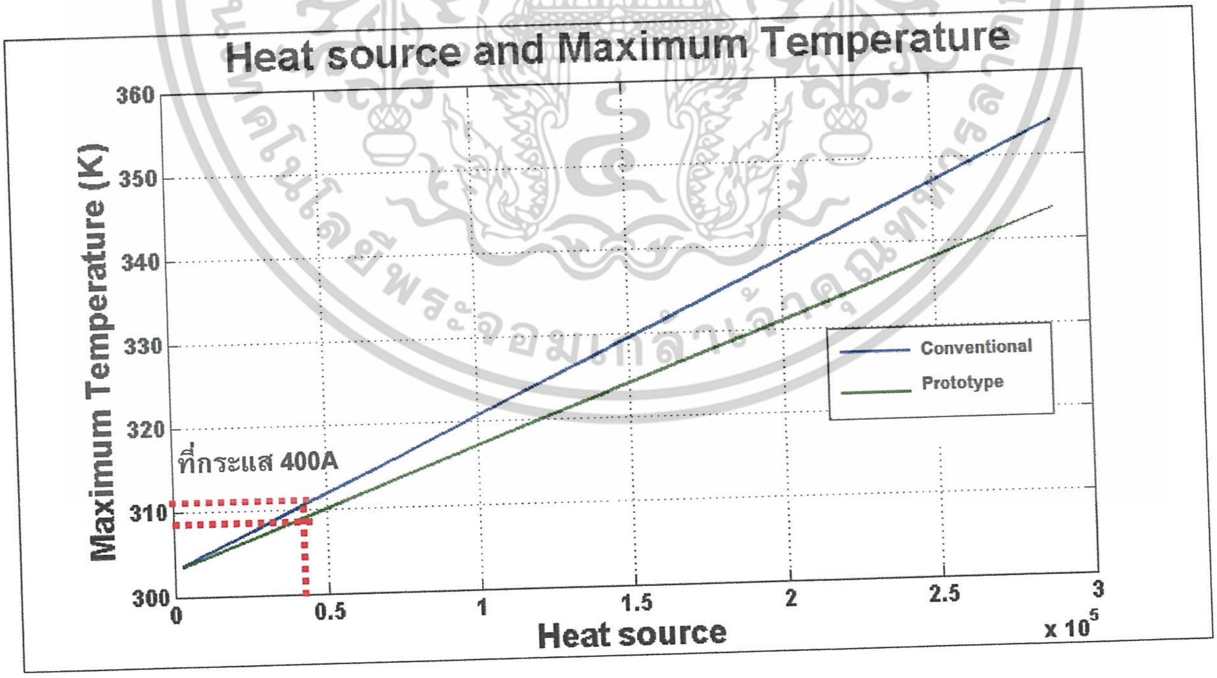
รูปที่ 4.22 กราฟการกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีภายในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำตั้งแต่ 500-10,000 $W/(m^2.K)$ และความร้อนที่เกิดภายในสาย โดยเปรียบเทียบระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ออกแบบ

4.2.3 พิจารณาค่ากระแสของสายเคเบิล



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนที่เกิดจากกระแสและความร้อนที่เกิดภายในสาย โดยเปรียบเทียบระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการออกแบบเมื่อพิจารณาทางกล

ในการจำลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความเสียหายที่จะเกิดขึ้นระหว่างสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบและเคเบิลที่ได้มีผลิตใช้ในปัจจุบันจากผลของแรงทางกล จะพิจารณาดูจากค่า von mises stress (หน่วย Pa) โดยตัวอย่างแบบจำลองทดสอบจะมีความยาวเท่ากับ 50 cm รัศมี 20 mm โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดของแต่ละแบบดังนี้

- ตัวอย่างโครงสร้างจำลองสายเคเบิลแบบที่มีผลิตใช้ มีพื้นที่เท่ากับ 0.00126 ตารางเมตร
- ตัวอย่างโครงสร้างจำลองสายเคเบิลที่ทำการออกแบบ มีพื้นที่เท่ากับ 0.00130 ตารางเมตร
(พื้นที่ส่วนที่เพิ่มขึ้นมา 0.00004 ตรม.คือ พื้นที่ส่วน Ripped)

โดยในการป้อนแรงทางกลในแต่ละการจำลองจะกำหนดขึ้นดังนี้
ความเครียดที่เกิดจากการดึงปลายสายเคเบิล จะป้อนให้แรงลัพธ์ได้ทั้งหมด 100 N ฉะนั้นจึงต้องกำหนดค่า Face load เท่ากับ

100/0.00126 = 79,365 N/m^2 สำหรับสายเคเบิลที่มีผลิตใช้ และ

100/0.00130 = 76,923 N/m^2 สำหรับสายเคเบิลที่ได้ออกแบบ

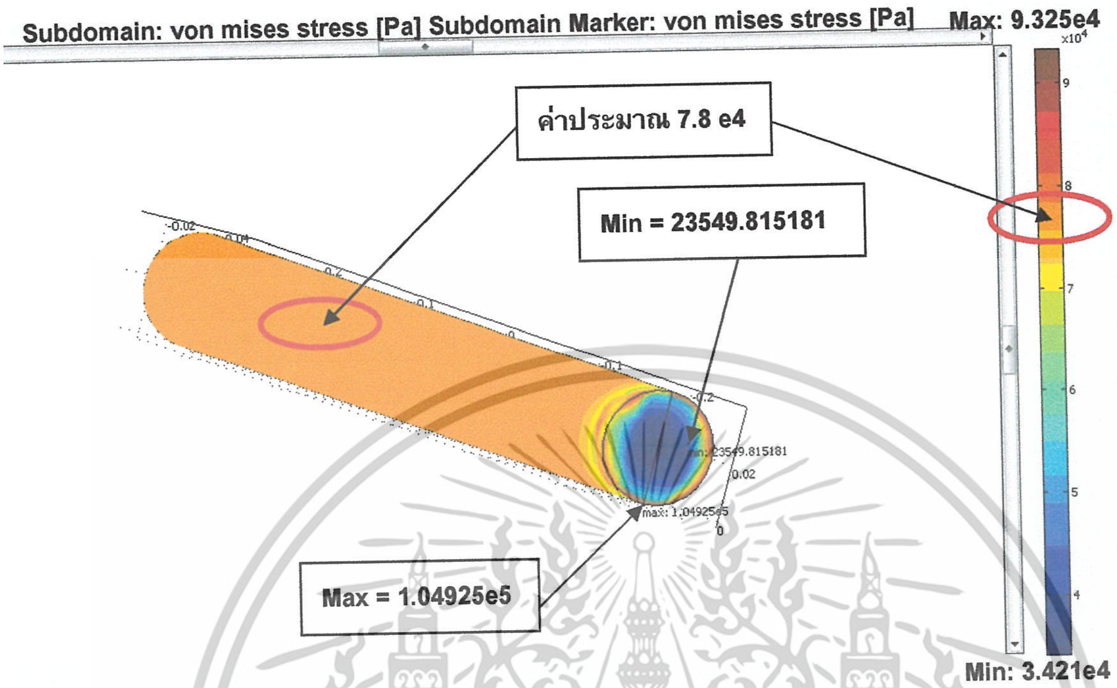
ความเครียดที่เกิดจากการโค้งงอสายเคเบิล มีการป้อนแรงลัพธ์เท่ากับ 100 N เช่นเดียวกับความเครียดที่เกิดจากการดึงปลายสายเคเบิล จึงคำนวณได้ในลักษณะเดียวกันคือ

100/0.00126 = 79,365 N/m^2 สำหรับสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้ และ

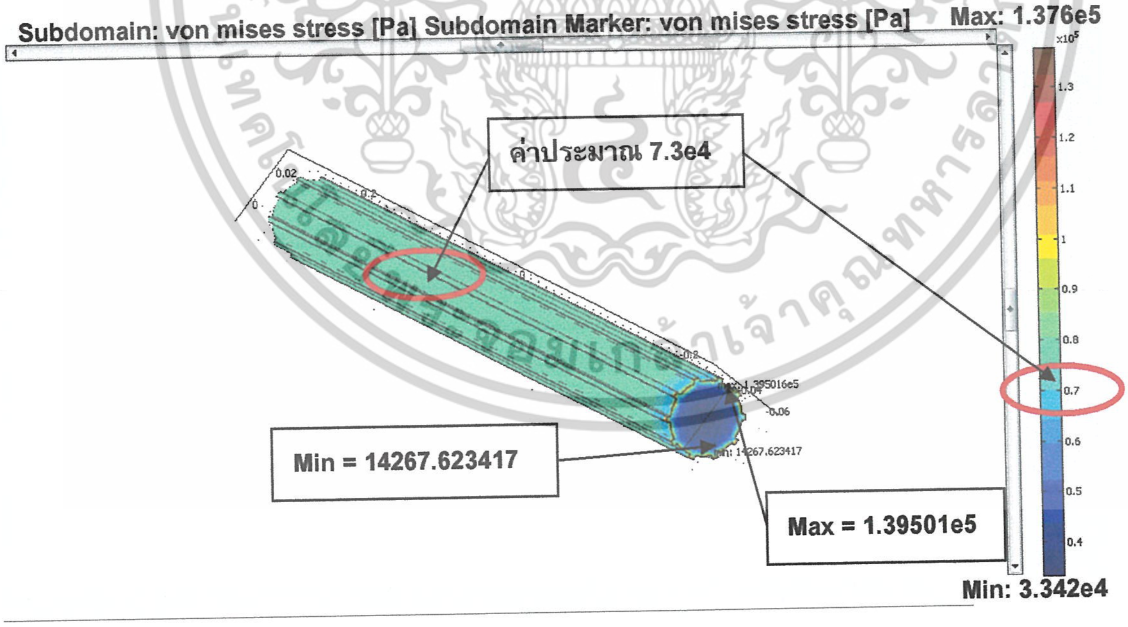
100/0.00130 = 76,923 N/m^2 สำหรับสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การพิจารณาความเครียดของสายเคเบิลจากผลการดึงปลายสายเคเบิล



[ก] ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายที่ผลิตใช้งาน

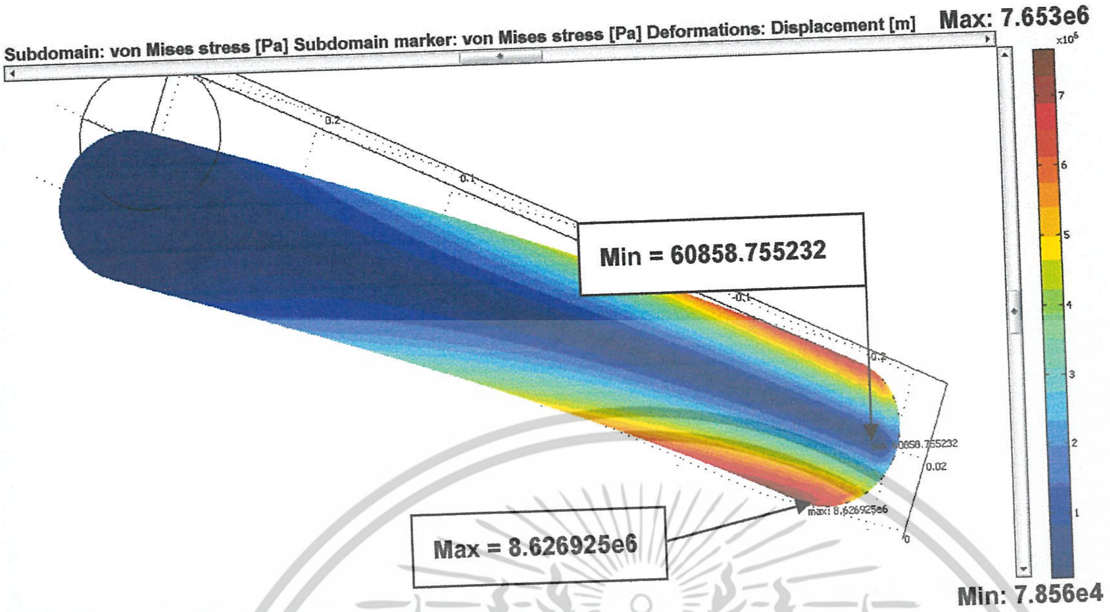


[ข] ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายที่ออกแบบ

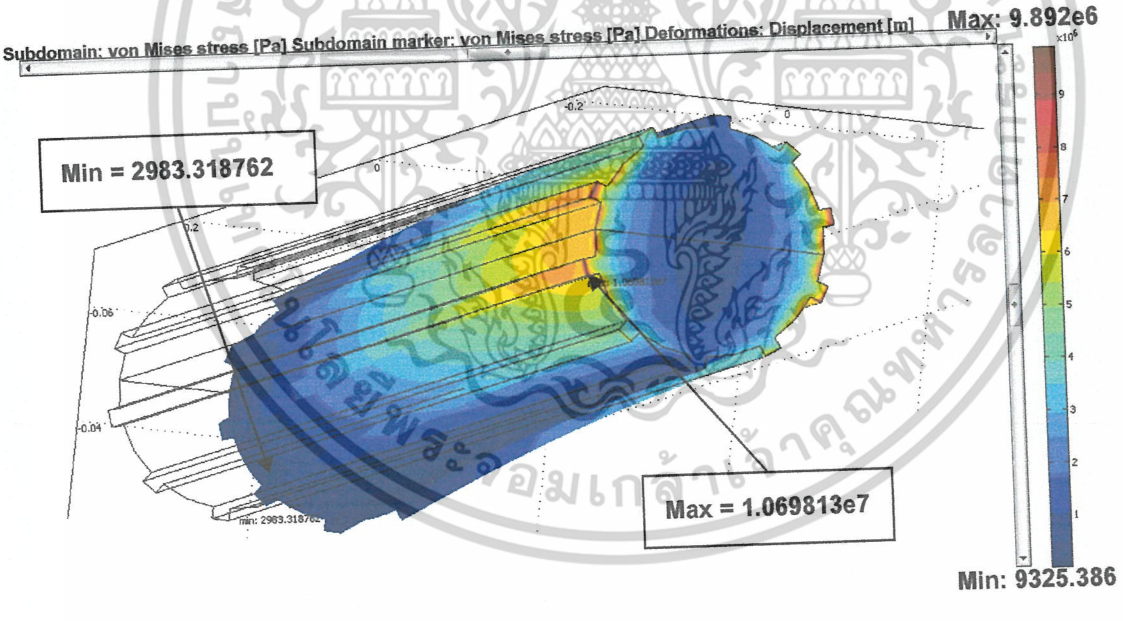
รูปที่ 4.25 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลเมื่อถูกแรงดึงที่ปลายสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การพิจารณาความเครียดของสายเคเบิลจากการโค้งงอของสาย



[ก] ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายที่ผลิตใช้งาน



[ข] ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายที่ออกแบบ

รูปที่ 4.26 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลเมื่อถูกโค้งงอสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการออกแบบ

5.1 การวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดความเสียหายต่อสายเคเบิล

5.1.1 วิเคราะห์สาเหตุที่เกิดจากสายเคเบิล

ภายในเนื้อฉนวน XLPE เกิดความผิดพร่องภายในเนื้อฉนวน หรือมีสิ่งแปลกปลอมภายในเนื้อฉนวน เช่น ฟองอากาศ ความชื้น น้ำ ฝุ่นละออง หรือสายเคเบิลได้รับการถูกกระทำจนทำให้เนื้อฉนวนได้รับการเสียหาย ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนจนทำให้สายเคเบิลเกิดความเสียหายได้

แต่ความผิดพร่องเหล่านี้สามารถตรวจจับได้โดยการทดสอบวัดระดับค่า Partial Discharge (PD) ที่เกิดขึ้นในฉนวนของเคเบิลได้ตลอดความยาวของสายเคเบิลที่ทำการทดสอบ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 10 pC ตามมาตรฐาน IEC 60502 และหากได้มีการทดสอบตามการทดสอบประจำของโรงงาน (Routine Test) ตามหัวข้อข้างล่างนี้ จะสามารถมั่นใจได้ว่าสายเคเบิลนี้มีคุณภาพและนำไปใช้ได้

- AC High Voltage Test 3.5U_0 เป็นเวลา 5 นาที 100%
- Partial Discharge 100%
- Insulation Resistance Test 100%
- Conductor Resistance Test 100%

5.1.2 วิเคราะห์สาเหตุที่เกิดจากการติดตั้งและวางสายเคเบิล

เนื่องจากสายเคเบิลใต้ดินที่นำมาใช้งาน ต่างได้รับการออกแบบและทดสอบจากโรงงานผู้ผลิตแล้วเป็นอย่างดี ทำให้มีความมั่นใจได้ในระดับหนึ่งว่ามีคุณภาพที่ดีและอายุการใช้งานยาวนาน แต่หากสายเคเบิลใต้ดินเกิดการระเบิดชำรุดเสียหายขึ้นมา สันนิษฐานได้ว่าสาเหตุอาจจะมาจากการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่เหมาะสม ระบบเคเบิลใต้ดินจะมีความมั่นคงสูงต้องมีการติดตั้งที่ถูกต้องถูกวิธีด้วย อาจกล่าวได้ว่าการติดตั้งเป็นหัวใจหลักของระบบเคเบิลใต้ดินก็ว่าได้ สาเหตุที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดิน ชำรุดอาจแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

5.1.2.1 ชำรุดก่อนการติดตั้ง

การชำรุดในกรณีนี้ส่วนใหญ่จะมาจากการขนส่งสายเคเบิลใต้ดิน จากโรงงานหรือคลังเก็บสายไปยังสถานที่ติดตั้ง ดังนั้นก่อนดึงลากสายเคเบิลใต้ดินทุกครั้งจะต้องตรวจสภาพภายนอกของรีลสายเคเบิล (ล้อไม้) เสียก่อนว่ามีสภาพเรียบร้อยหรือไม่ ปลายสายเคเบิลใต้ดิน มีการซีล (Seal) ปิดป้องกันความชื้นหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.2 ชำรุดเนื่องจากการติดตั้ง

กรณีนี้มีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุด สาเหตุมาจากผู้ปฏิบัติงานมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสายเคเบิลใต้ดิน ไม่ดีพอ ไม่เข้าใจว่าทิศทางดึงลากสายเคเบิลใต้ดิน สำคัญอย่างไร ทำไมต้องให้สายเคเบิลใต้ดิน มีรัศมีการโค้งงอมากๆ บางครั้งละเลยในการล้างทำความสะอาดท่อก่อนร้อยสายเคเบิลใต้ดินเข้าไป สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่ทำให้สายเคเบิล มีโอกาสชำรุดก่อนเวลาอันควรทั้งสิ้น

5.1.3 วิเคราะห์สาเหตุที่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่บริเวณบ่อพักสายเคเบิล (Man Hole)

หากสภาพแวดล้อมภายในบ่อพักสายเคเบิลนั้น มีไม่สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น มีน้ำขังภายในบ่อในปริมาณมาก ทำให้ชุดวางพาดสายเคเบิลอาจเกิดการเป็นสนิม อันเนื่องมาจากอากาศที่มีความชื้นภายในบ่อ เมื่อเวลาผ่านไป สายเคเบิลที่ถูกลากดึงในการติดตั้ง อาจก่อให้เกิดรอยขีดเป็นแนวยาวบริเวณเปลือกนอกของสาย ทำให้เทปทองแดง ซึ่งเป็นชั้นกราวด์ของสายเคเบิลขาด และเมื่อใช้ไปเป็นระยะเวลานานทำให้สายเกิดการอาร์คไปเรื่อยๆ จนเกิดการไหม้แล้วทำให้เกิดการลัดวงจรในที่สุด ประกอบกับรอยขีดบริเวณเปลือกนั้นทำให้มีโอกาสที่ความชื้นภายในบ่อแทรกตัวเข้าสู่สายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งจากโครงสร้างของสายเองยังคงมีชั้นเทปป้องกันน้ำและความชื้นที่จะเข้าสู่สาย แต่ก็สามารถป้องกันได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น เมื่อมีความชื้นสูงประกอบกับผ่านการซึมสู่สายเคเบิลเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้มีน้ำหรือความชื้นซึมเข้าสู่โครงสร้างภายในสายก่อให้เกิดการเกิดเบรกดาวน์ของสายตามมาได้ อาจกล่าวได้ว่านอกจากการติดตั้งสายที่ถูกต้องแล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลการดูแล บำรุงรักษาสภาพแวดล้อมของบ่อพักสายควบคู่กันไปด้วย เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของสายให้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 สรุปผลการออกแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.1 ผลทางไฟฟ้า

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลทางไฟฟ้า ระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ทำการออกแบบ

หัวข้อ	สายที่ผลิตใช้	สายที่ออกแบบ	ค่าวิกฤต
ศักย์ไฟฟ้า (kV)	12	12	-
สนามไฟฟ้า (V/m)	2.46×10^{6}	2.46×10^{6}	$E_{\max}=30-50kV/mm$
การกระจาย สนามไฟฟ้าภายในสาย	สม่ำเสมอ	สม่ำเสมอ	-

จากการจำลองสายเคเบิลที่ออกแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับสายที่ได้มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน เห็นได้ว่าสายที่ได้ออกแบบมานั้น ไม่ได้ส่งผลกระทบทางไฟฟ้าแต่อย่างใด ผลการจำลองทางไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบให้ผลในทิศทางเดียวกันกับสายเคเบิลที่ได้มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดไม่ควรเกิน 30-50 kV/mm (XLPE มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด 30-50 kV/mm.) โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโครงสร้างสายเคเบิลภายหลังจากชั้นกราวด์ของสายจะไม่ส่งผลทางไฟฟ้าของสาย

โดยมีจุดสำคัญที่อาจนำมาพิจารณาในการออกแบบคือ การเลือกใช้ชนิดของกราวด์ในชั้นของ Metallic Screen ซึ่งเป็นกราวด์ของสายเคเบิลนั้น อาจพิจารณาได้ในสองลักษณะ คือ

1. Copper Wire
2. Copper Tape

การเลือกใช้แบบ Copper Wire เป็นกราวด์ของสายจะส่งผลดีในทางโครงสร้างสายเคเบิล เนื่องจากจะมีผลในการดึงสายและเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของสาย เมื่อพิจารณาในทางไฟฟ้านั้นแบบ Copper Tape จะมีการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสายที่สม่ำเสมอมากกว่าแบบ Copper Wire แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับลักษณะการนำไปใช้งาน และการตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ผลิตด้วย

สิ่งสำคัญในการออกแบบสายเคเบิลเพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง ต้องคำนึงถึงจุดสำคัญที่ว่าจะต้องรักษาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายให้คงที่ รวมถึงความปลอดภัยในการใช้งานสาย ในที่นี้ก็ได้มีการพิจารณาผลของการฉนวน คือหากการฉนวนภายในสายเคเบิลนั้นยิ่งมีความหนามากขึ้น ก็จะสามารถทนค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้สูงขึ้นด้วย แต่ท้ายที่สุดยังคงพิจารณาให้เหมาะสมควบคู่ไปกับต้นทุนในการผลิตสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลทางความร้อน

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลทางความร้อน เมื่อมีอากาศเป็นตัวพาความร้อน ระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ทำการออกแบบ

หัวข้อ	สายที่ผลิตใช้	สายที่ออกแบบ	ค่าวิกฤต
อุณหภูมิภายในสาย ($^{\circ}K$)	311.292	309.633	$T_{\max} = 363.15^{\circ}K$
การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย ($^{\circ}K$)	สม่ำเสมอ	สม่ำเสมอ	-
ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย (W/m^2)	216.110	216.657	-
การกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย (W/m^2)	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และมีฟลักซ์ความร้อนสูงบริเวณขอบ Ripped	-

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลทางความร้อน เมื่อมีน้ำเป็นตัวพาความร้อน ระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ทำการออกแบบ

หัวข้อ	สายที่ผลิตใช้	สายที่ออกแบบ	ค่าวิกฤต
อุณหภูมิภายในสาย ($^{\circ}K$)	301.631	301.649	$T_{\max} = 363.15^{\circ}K$
การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย ($^{\circ}K$)	สม่ำเสมอ	สม่ำเสมอ	-
ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย (W/m^2)	216.657	216.657	-
การกระจายฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในสาย (W/m^2)	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองสายเคเบิลที่ออกแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับสายที่ได้มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งการพิจารณาได้ใน 2 กรณีคือ

5.2.2.1.เมื่อมีอากาศเป็นตัวพาความร้อน

เห็นได้ว่าสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบมีอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสายน้อยกว่าสายเคเบิลที่ได้มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน อาจกล่าวได้ว่าสายที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดีกว่าสายที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน เมื่อได้รับค่ากระแสในปริมาณที่เท่า ๆกันที่ 400 A

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิภายนอกตั้งแต่ 0-90 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การพาของอากาศตั้งแต่ 0-100 $W/(m^2.k)$ จะเห็นได้ชัดเจนว่าสายที่ได้ทำการออกแบบมีการระบายความร้อนที่ดีกว่าสายที่มีการผลิตใช้ เมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์การพาของอากาศตั้งแต่ 0-40 $W/(m^2.k)$ แต่เมื่อสัมประสิทธิ์การพาของอากาศมากกว่า 40 $W/(m^2.k)$ คุณสมบัติในการระบายความร้อนของสายทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน

5.2.2.2.เมื่อมีน้ำเป็นตัวพาความร้อน

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิภายนอกตั้งแต่ 0-90 องศาเซลเซียส คุณสมบัติในการระบายความร้อนของสายทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน สายที่มีการผลิตใช้มีแนวโน้มที่มีคุณสมบัติการระบายความร้อนดีกว่าเล็กน้อย และมีการกระจายฟลักซ์ความร้อนภายในสายสม่ำเสมอกว่า เมื่อเทียบกับสายที่ได้ทำการออกแบบ

เมื่อเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การพาของน้ำตั้งแต่ 500-10,000 $W/(m^2.k)$ จะเห็นได้ว่าสายที่ได้มีการผลิตใช้จะมีการระบายความร้อนที่ดีกว่าสายที่ออกแบบเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิในสาย สายที่ทำการออกแบบมีการระบายความร้อนที่น้อยกว่าประมาณ 0.04 องศาเคลวิน

และเมื่อเรามีการป้อนค่ากระแสให้สูงขึ้นจาก 0-1,000 A เห็นได้ว่าเมื่อกระแสในสายมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสายที่ได้ทำการออกแบบมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดีกว่าสายที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน

จึงอาจสรุปได้ว่าสายที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีความเหมาะสมกับงานติดตั้งที่มีการจ่ายกระแสสูง ซึ่งมีอากาศเป็นตัวพาความร้อน เนื่องจากมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับสายที่มีการผลิตใช้ และเมื่อมีการเดินสายเคเบิลในบริเวณที่มีน้ำคุณสมบัติการระบายความร้อนของสายที่ออกแบบจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสายที่มีการผลิตใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ผลทางกล

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดจากการดึง ระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ทำการออกแบบ

หัวข้อ	สายที่ผลิตใช้	สายที่ออกแบบ
ความเครียดสูงสุด (Pa) และบริเวณที่เกิด	1.0493×10^5 เกิดที่ขอบชั้น sheath	1.3950×10^5 เกิดที่ขอบ ripped
ความเครียดต่ำสุด (Pa) และบริเวณที่เกิด	2.3549×10^4 เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล	1.4268×10^4 เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล
ค่าประมาณความเครียดรวมของสายไฟฟ้า(Pa)	7.8×10^4	7.3×10^4

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดจากการหักโค้งสาย ระหว่างสายที่มีการผลิตใช้และสายที่ได้ทำการออกแบบ

หัวข้อ	สายที่ผลิตใช้	สายที่ออกแบบ
ความเครียดสูงสุด (Pa) และบริเวณที่เกิด	8.6269×10^6 เกิดที่ขอบชั้น sheath	1.0689×10^7 เกิดที่ขอบ ripped
ความเครียดต่ำสุด (Pa) และบริเวณที่เกิด	6.0859×10^4 เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล	2.9833×10^3 เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

การเพิ่ม Ripped เข้าไปในสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับสายเคเบิลและป้องกันส่วนประกอบหลักภายในของสายเคเบิลเพื่อให้สายเคเบิลจากความเสียหายจากการลากและการหักโค้งสายที่เกิดจากการติดตั้งลดน้อยลง ดังนั้นผลจากการจำลองจะพิจารณาในสองลักษณะได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.1 ความเครียดที่เกิดจากการดึงปลายสายเคเบิล

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าความเครียดโดยรวมที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบ มีค่าน้อยกว่าความเครียดโดยรวมของแบบจำลองสายเคเบิลที่ผลิตใช้ และ ซึ่งจะหมายความว่าโอกาส ที่จะเกิดความเสียหายต่อสายเคเบิลที่ได้ทำการออกแบบมีโอกาสเกิดการชำรุดเสียหายน้อยกว่าสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน ในกรณีที่มีการใช้สายในช่วงที่มีความยาวมาก ๆทำให้สายที่ได้รับการออกแบบสามารถทนความเครียดที่อาจเกิดขึ้นจากการดึงสายได้ดีกว่าสายที่มีการผลิตใช้ เนื่องการผลของการที่มี Ripped เป็นส่วนที่ช่วยป้องกันโครงสร้างของสายเคเบิลนั่นเอง

5.2.3.2 ความเครียดที่เกิดจากการโค้งงอสายเคเบิล

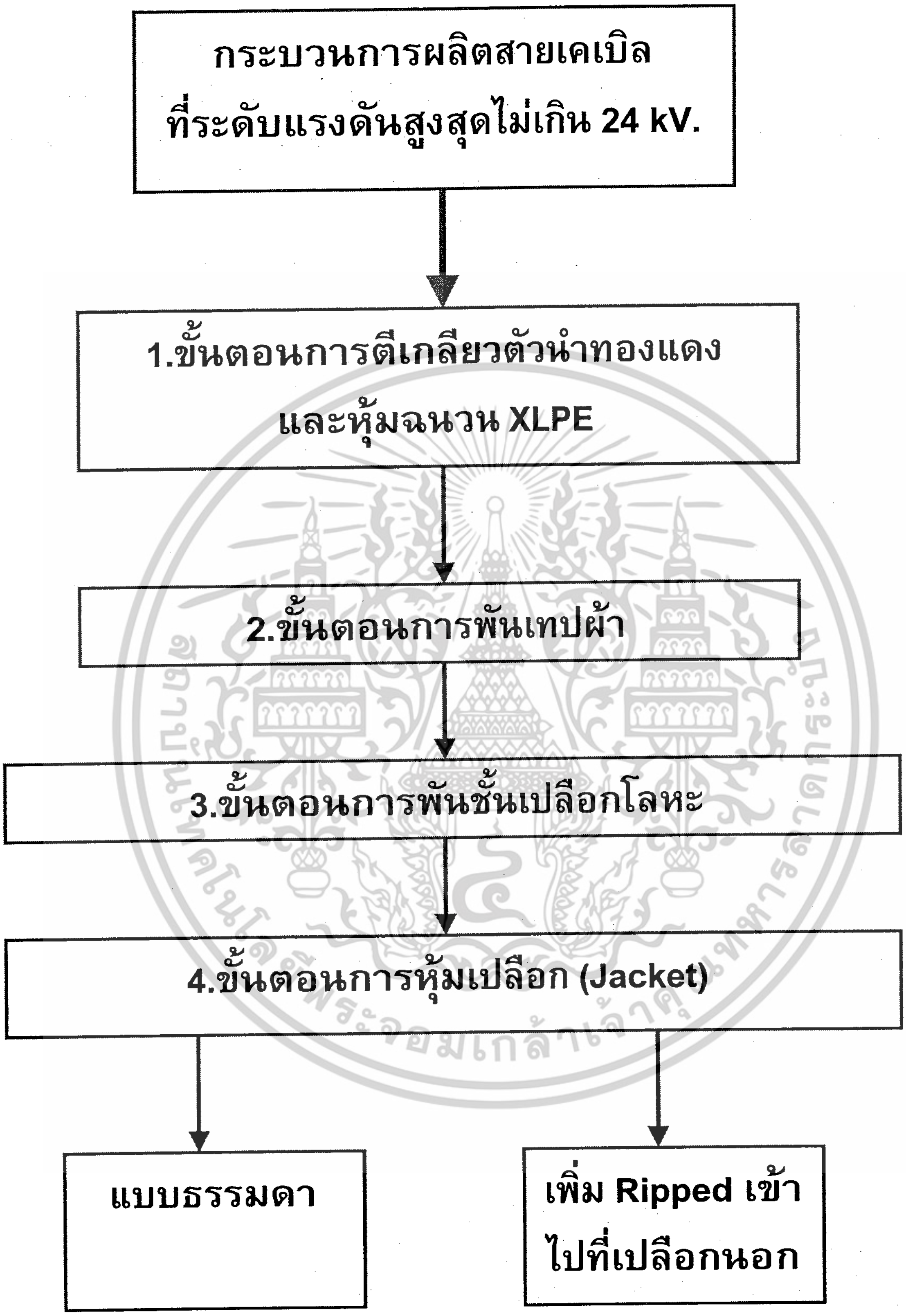
จากผลการจำลองเห็นได้ว่าความเครียดสูงสุดที่เกิดกับสายที่ได้ทำการออกแบบมีค่าสูงกว่าสายที่ได้มีการผลิตใช้ เนื่องจากเป็นการแสดงจุดความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนส่วน Ripped ของสายเคเบิลซึ่งมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยกว่าจึงทำให้เกิดค่าความเครียดสูงกว่า แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของความเครียดภายในสายที่ได้รับแรงจนเกิดการโค้งงอ สายที่มีการออกแบบจะมีค่าความเครียดต่ำกว่าเมื่อเทียบสายที่ได้ทำการผลิตใช้ในปัจจุบัน

ทั้งนี้จากการศึกษาจะพบว่า เราสามารถลดค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณ Ripped ได้โดยการออกแบบ Ripped ที่ผ่านการลดขอบคมของมุมของบริเวณขอบ ripped ทั้งนี้ความเครียดที่เกิดขึ้นสูงสุดจะเกิดขึ้นในบริเวณขอบคมของ Ripped มากที่สุด

5.3 ความเป็นไปได้ในการผลิตสายเคเบิลที่ได้ออกแบบใหม่

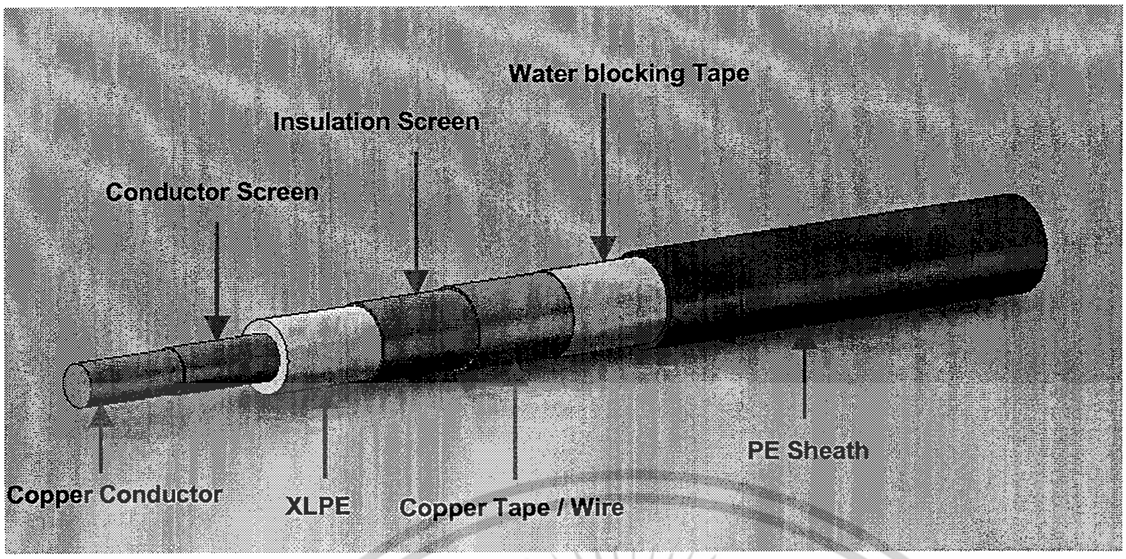
โดยโครงสร้างในส่วนของการผลิตสายเคเบิลที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบันนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตสายที่ได้ทำการออกแบบ เพียงมีการเปลี่ยนหัวฉีดในขั้นตอนการหุ้มเปลือก (Jacket) ให้สอดคล้องกับความต้องการ เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการผลิตอาจต้องเพิ่มขึ้น แต่หากเทียบกับค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนสายเมื่อเกิดปัญหาขึ้นกับสายเคเบิล ก็นับได้ว่าเป็นการคุ้มค่าอย่างยิ่ง ประกอบกับเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานให้กับสายเคเบิลอีกด้วย หากมีการเลือกใช้ชนิดของสายเคเบิลให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ ก็จะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

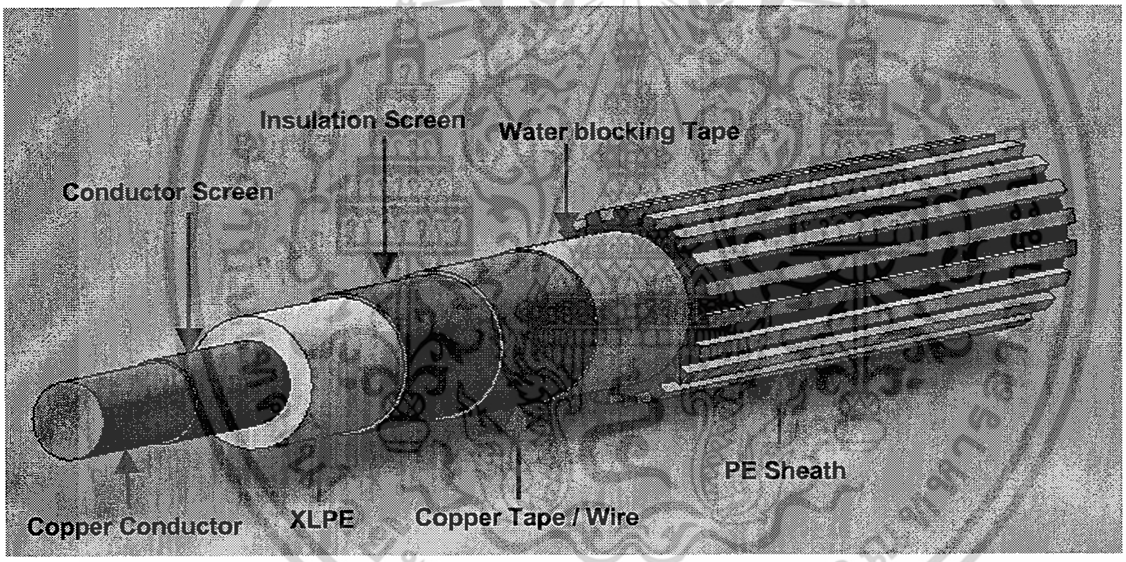


รูปที่ 5.1 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ก] ตัวอย่างสายเคเบิลใต้ดินที่มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน



[ข] ตัวอย่างสายเคเบิลใต้ดินที่ได้ทำการออกแบบ

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดัน 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัดตัวนำทองแดงขนาด 240 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการจำลองโครงสร้างแบบจำลองของสายที่ได้ทำการออกแบบเปรียบเทียบกับสายที่มีการผลิตใช้ สายที่ได้ทำการออกแบบมีการระบายความร้อนที่ดีขึ้นและจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสที่สูงขึ้นให้กับสายเคเบิล เพราะทำให้อุณหภูมิภายในสายมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสายที่มีการผลิตใช้งานในปัจจุบัน และสายที่ออกแบบสามารถทนแรงดึงได้ดีกว่ารวมถึงเมื่อสายมีการหักโค้งเนื่องจากการรับแรง จะมีค่าความเครียดโดยรวมภายในสายที่ทำการออกแบบน้อยกว่าสายที่มีการผลิตใช้ จึงอาจสรุปได้ว่าสายเคเบิลที่ทำการออกแบบมานั้น มีแนวโน้มที่จะสามารถช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากการติดตั้งสายที่ไม่ถูกต้อง รวมถึงการใช้งานของสายในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ที่จะส่งผลต่อส่วนประกอบใดๆภายในสายได้

หากว่าในอนาคตได้มีการทำการพัฒนาและศึกษาการออกแบบสายที่ใช้งานให้สอดคล้องกับลักษณะของงานที่นำไปใช้ ก็จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่าย เช่น ค่าใช้จ่ายจากการซ่อมแซม เปลี่ยนสายเคเบิล ตลอดจนค่าการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลงได้ และหากการใช้งานสายจะมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากเกิดจากการเลือกใช้รูปแบบของสายให้เหมาะสมกับลักษณะงานแล้ว ยังคงต้องควบคู่ไปกับการดูแลรักษา ซ่อมบำรุงตามระยะเวลาการใช้งานของสาย การให้ความรู้กับผู้ติดตั้งและใช้งานสาย ตลอดจนการดูแลสภาพแวดล้อมภายในบ่อพักสายให้มีสภาพที่เหมาะสม ก็จะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานสายและลดค่าใช้จ่ายที่อาจเกิดขึ้นได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด, **"วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง"** ,2547

[2] ศุลี บรรจงจิตร, **"อุปกรณ์และการติดตั้งในงานระบบไฟฟ้า"**,ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2547

[3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **"วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม2"**,2549

[4] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **"เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคนิคการวัดและการทดสอบด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง"**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2551

[5] บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด(มหาชน), **"คู่มือการเลือกใช้สายไฟฟ้า สำหรับงานออกแบบ และติดตั้งระบบไฟฟ้า"**

[6] บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด, **"คู่มือการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า"**

[7] **คำแนะนำการติดตั้งระบบสายใต้ดินในพื้นที่จัดสรร**, การไฟฟ้านครหลวง, 2544

[8] **คำแนะนำการจัดเตรียมอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า,** การไฟฟ้านครหลวง, 2544

[9] **ระบบเคเบิลใต้ดิน**, กองไฟฟ้ามาตรฐานระบบไฟฟ้า,ฝ่ายมาตรฐานและงานความปลอดภัย, 2548

[10] PEA , Specification No. R-777/2539, **Underground Power Cables of Rated Voltage 22 kV and 33 kV.**

[11] MEA , Specification No.418, **สายเคเบิ้ลตัวนำทองแดงฉนวนครอสลิงกด์พอลิเอทิลีน (XLPE) แรงดัน 8.7/15 และ 12/20 กิโลโวลต์**

[12] **Technical data**, THAI YAZAKI ELECTRIC WIRE co.,LTD.,2002

[13] **Technical data**, Charoong Thai Wire & Cable Public company Limited.

[14] **Underground power cables** / S.Y. King, N.A. Halfter, London : Longman, c1982

[15] IEC 60228, **"Conductors of Insulated Cables"**,2004

[16] IEC 60520-2, **"Extruded Solid Dielectric Insulated Power Cables for Rated Voltage from 1 kV up to 30 kV"**, 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลบริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิ้ล จำกัด(มหาชน)

ข้อมูลบริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิ้ล จำกัด(มหาชน) มีเครื่องหมายการค้า CTW เป็นหนึ่งผู้นำในการผลิตสายไฟฟ้าและผลิตสายเคเบิล เริ่มก่อตั้งครั้งแรกขึ้นในปี 2510 จากการร่วมทุนของนักลงทุนชาวไต้หวัน ด้วยทุนจดทะเบียนครั้งแรก 10 ล้านบาท เมื่อวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2510 ในขณะนั้นบริษัทฯได้นับการส่งเสริมการลงทุนในกิจการอุตสาหกรรมผลิตสายไฟฟ้า สายเคเบิลอะลูมิเนียม และอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย

รูปที่ 1ก เครื่องหมายการค้าของบริษัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำเลที่ตั้ง

สำนักงานใหญ่ : 1093/71 อาคารเซ็นทรัลซิตี้ทาวเวอร์ ชั้น 12A ถนน บางนา-ตราด ก.ม.3 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260
โทรศัพท์ : 0-2745-6118 -30 โทรสาร : 0-2745-6131-32

โรงงาน : 35/1 หมู่ 22 ถนน สุวินทวงศ์ กม.63 ตำบล ศาลาแดง อำเภอ บางน้ำเปรี้ยว จังหวัด ฉะเชิงเทรา 24000
โทรศัพท์ : 0-3859-3401-9 โทรสาร : 0-3859-3400

เว็บไซด์ : http://www.ctw.co.th

E-mail Address : sales@ctw.co.th

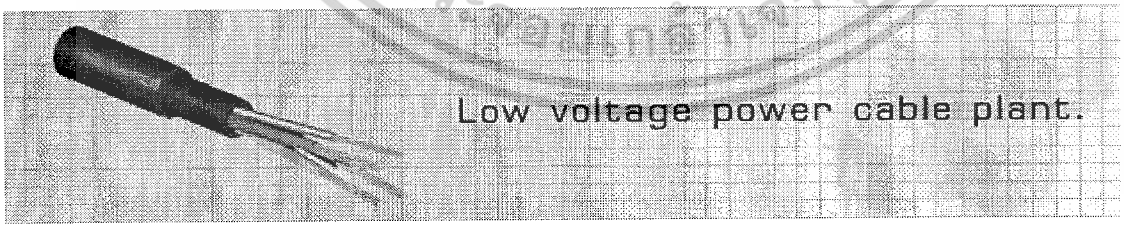
บริษัทฯดำเนินธุรกิจหลักในการผลิตและจำหน่ายสายไฟฟ้าอะลูมิเนียมและทองแดง สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนแรงดันต่ำ แรงดันสูงและสายโทรศัพท์ เพื่อจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมทั้งรับจ้างทำการผลิต แลกเปลี่ยนและแปรรูปสินค้าดังกล่าวด้วย

ระบบการผลิต

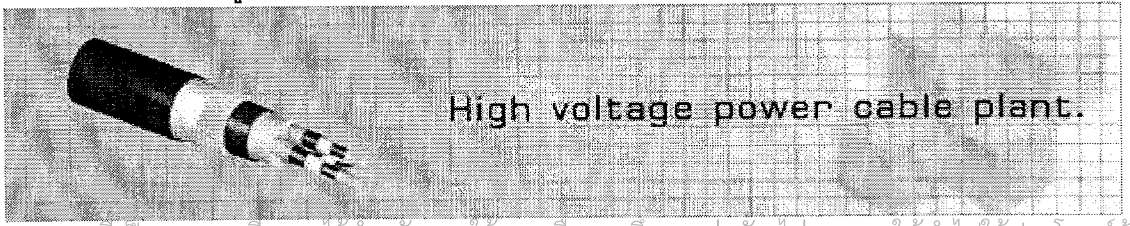
บริษัทมีระบบการผลิตสายไฟฟ้า สายเคเบิลที่ทันสมัย ที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า ซึ่งผลิตภัณฑ์ของบริษัทได้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1.สายไฟฟ้าตัวนำอลูมิเนียม (Aluminum Cables)

2.สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Low Voltage Cables)



3.สายไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Cables)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.สายเคเบิลโทรศัพท์ (Telephone and Communication Cables)

ผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ จำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ โดยตลาดในประเทศเป็นตลาดหลักที่สำคัญ ซึ่งลูกค้ามีทั้ง ภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ และเอกชน ลูกค้าสำคัญของบริษัท อาทิ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.-EGAT) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.-PEA) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.-MEA) และรวมถึงหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่แปรรูปแล้ว ได้แก่ บมจ.ทีโอทีคอร์ปอเรชั่น (TOT)

การผลิตผลิตภัณฑ์ ทางบริษัทได้ให้ความสำคัญกับกระบวนการผลิตที่มีคุณภาพ ทำให้ผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ ได้รับการรับรองมาตรฐานต่างๆ จากหน่วยงานราชการและสถาบันทดสอบอิสระที่น่าเชื่อถือต่างๆ อาทิ

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม จากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้แก่ ใบอนุญาตทำผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้า มอก.11-2531 , มอก. 2202-2547 , มอก.85-2548 และใบอนุญาตแสดงเครื่องหมายมาตรฐานผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้า มอก.64-2517 , มอก. 838-2531 , มอก. 2143-2546 เป็นต้น
- ใบรับรองผลิตภัณฑ์ (Licence) สายทนไฟ จาก PSB Corporation ประเทศสิงคโปร์
- ใบรับรองผลการทดสอบสายแรงดันสูงประเภท 69&115 kV. Underground Cable และสายแรงดันปานกลาง เช่น 12/20 kV, 22 kV,33kV และ 6/10 kV จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสถาบันไฟฟ้าและอิเลคทรอนิกส์(EEI) เป็นต้น

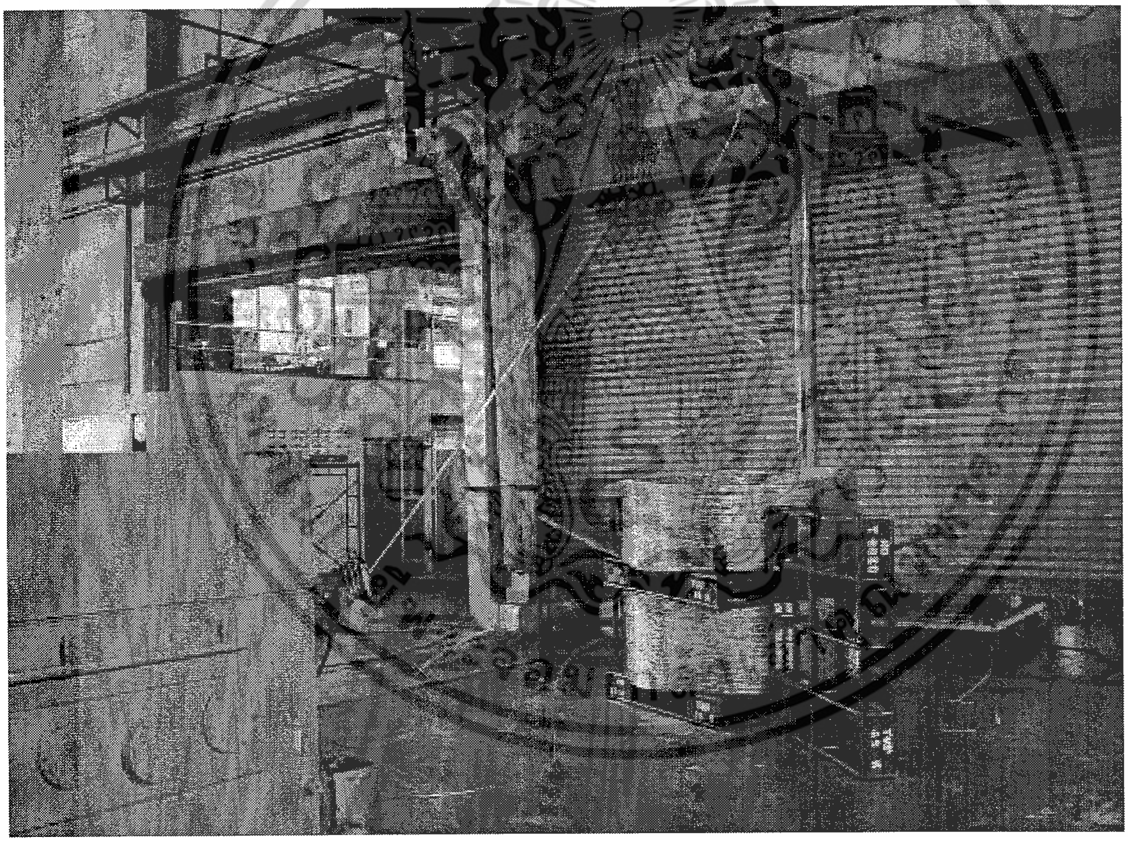
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตสายเคเบิล

แบ่งออกเป็น 4 กระบวนการ กล่าวคือ

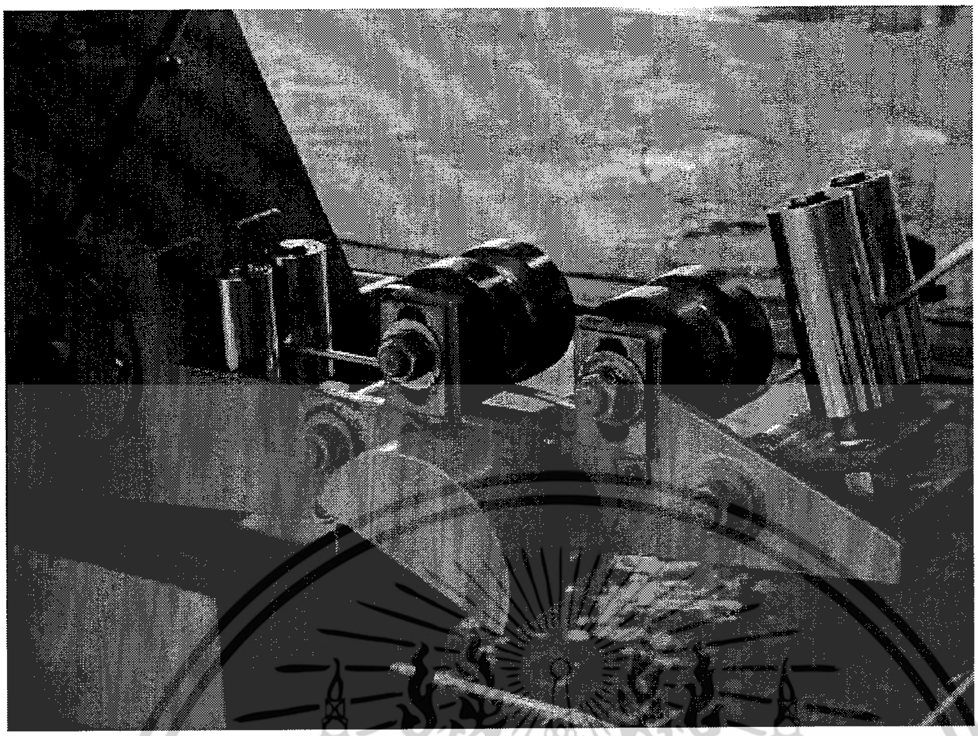
1.ขั้นตอนการรีดเป็นเส้น การตีเกลียว และหุ้มฉนวน

โดยจะมีการสั่งทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นลักษณะแท่ง (Rod) สำหรับ Copper rod จะมีขนาด 8 มิลลิเมตร แล้วนำมาผ่านกระบวนการรีดเป็นเส้นเล็กๆ จากนั้นนำมาตีเกลียวกัน โดยมากจะมีการตีเกลียวแบบสลับซ้าย-ขวา เนื่องมาจากทิศทางของสนามไฟฟ้าจะช่วยในการหักล้างกัน ซึ่งหลังจากตีเกลียวแล้วจึงจะนำไปหุ้มฉนวนต่อไป ซึ่งจะมีการตีชีท (Sheath) ในส่วนของ XLPE ซึ่งจะมีการผสม Carbon Black ช่วยในการป้องกันแสง UV ป้องกันการเสื่อมสภาพของฉนวน แต่ส่งผลให้ความเป็นฉนวนลดลง และมีกระบวนการผลิตในลักษณะแนวนอน เพื่อลดผลแรงกดของสายเคเบิล และในแต่ละกระบวนการต้องมีการความคุมอุณหภูมิและความสะอาดด้วย

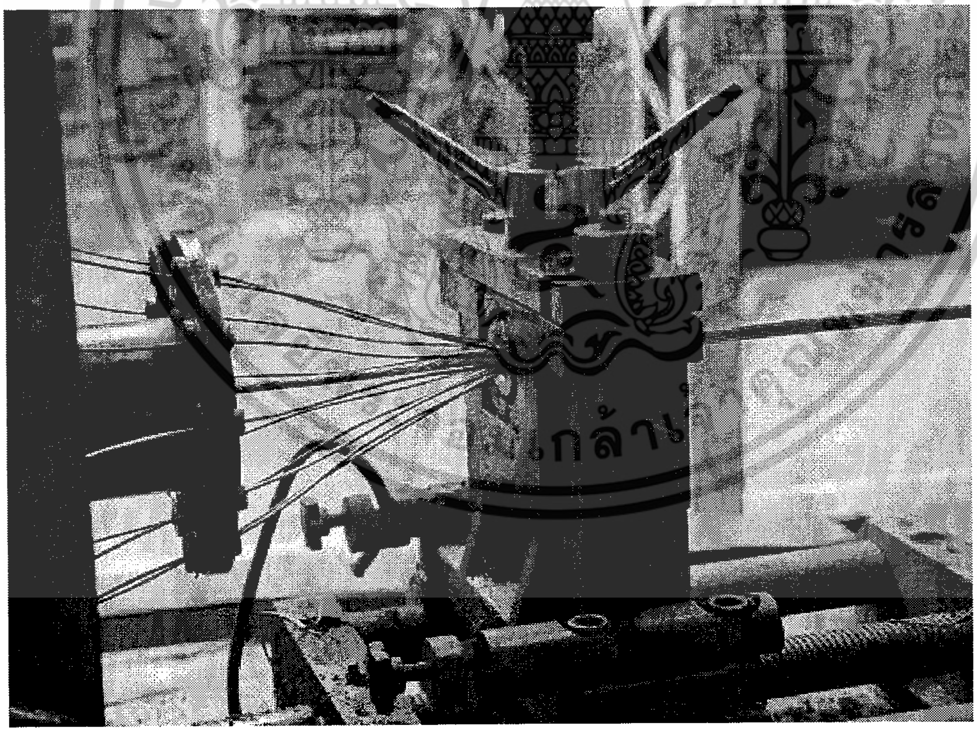


รูปที่ 2ก Copper Rod ที่สั่งซื้อสำหรับนำมารีดเป็นเส้นและตีเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

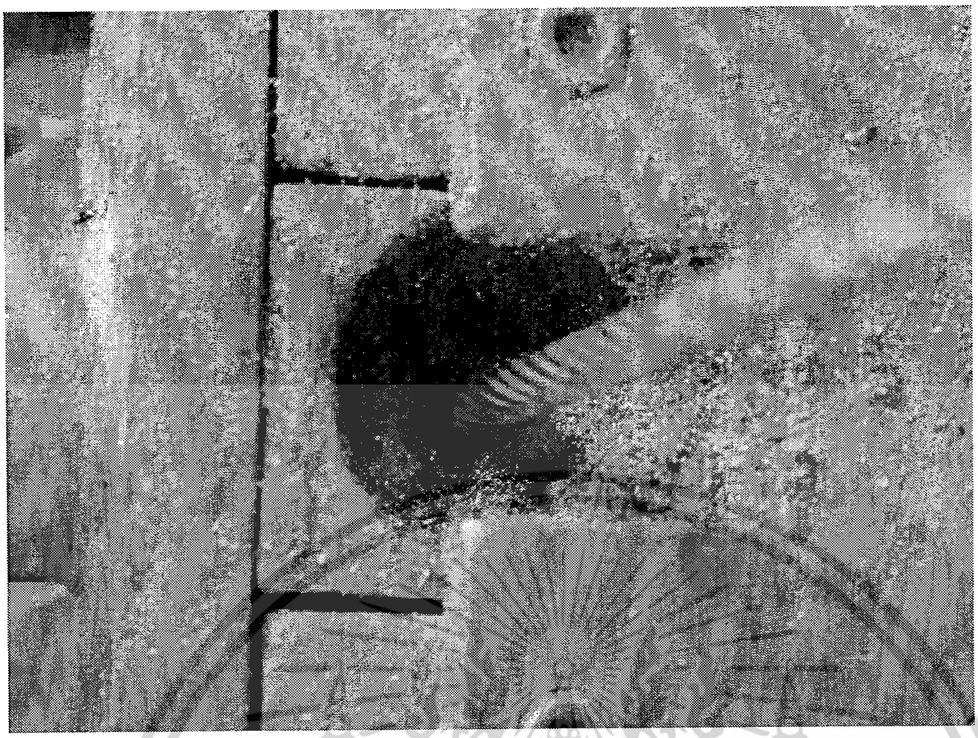


รูปที่ 3ก Copper Rod ที่ถูกนำมารีดเป็นเส้น

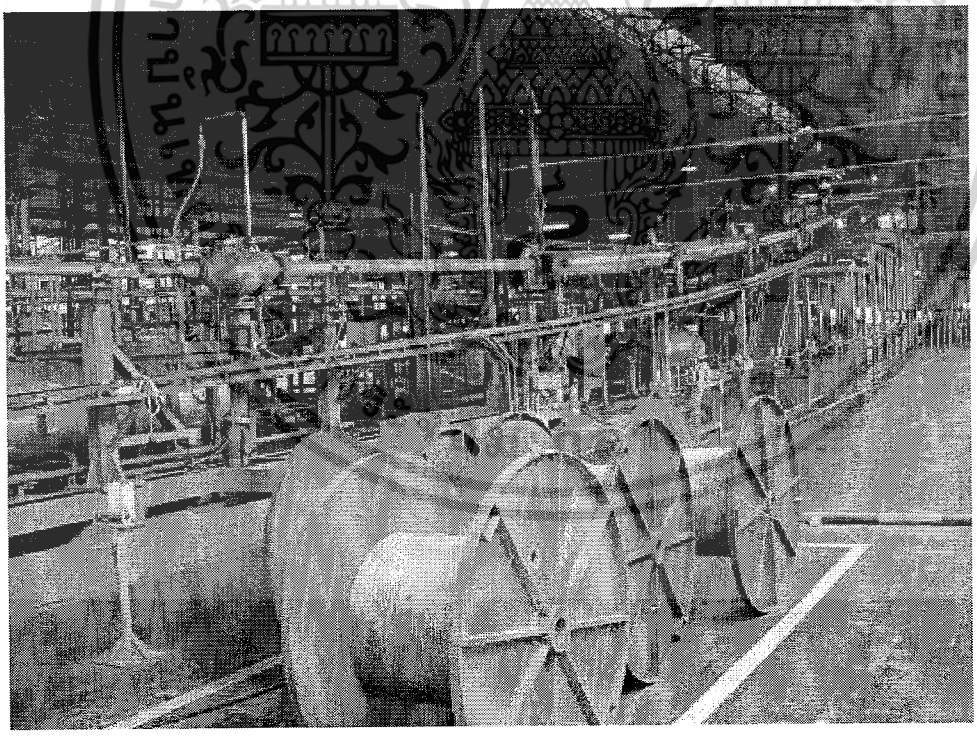


รูปที่ 4ก กระบวนการตีเกลียวลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

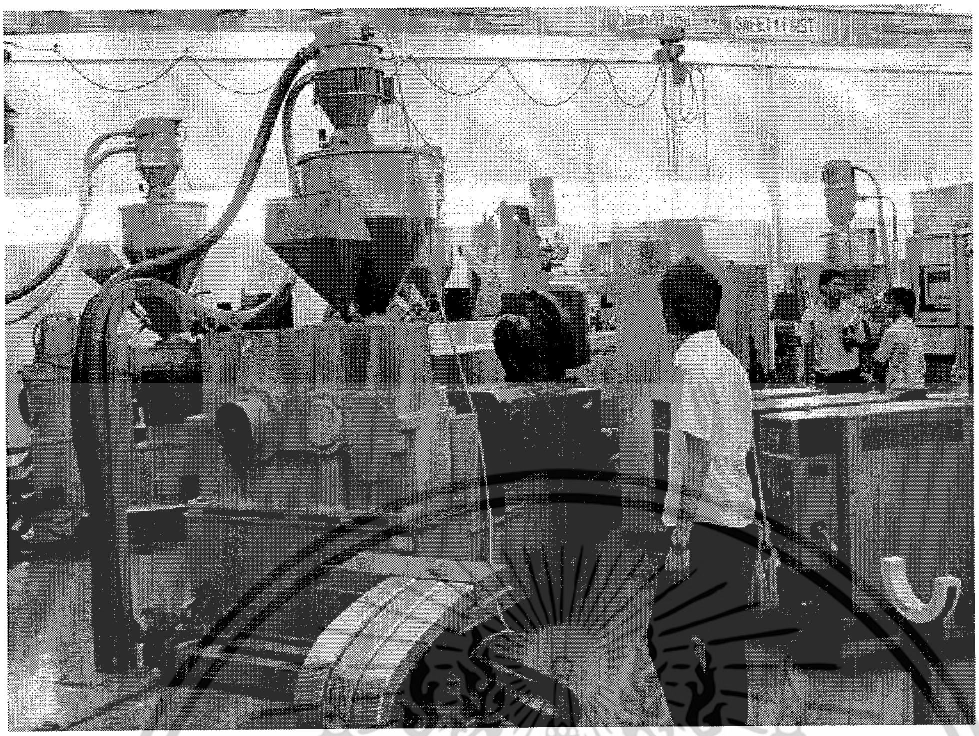


รูปที่ 5ก แสดงลวดตัวนำที่ถูกตีเกลียวแล้ว



รูปที่ 6ก แสดงขั้นตอนการหุ้มฉนวนที่มีกระบวนผลิตในลักษณะแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7ก ห้องควบคุมการหุ้มฉนวน

รูปที่ 8ก การแสดงผลผ่านเครื่องพิมพ์ ในกระบวนการหุ้มฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ขั้นตอนการพันชั้นเปลือกโลหะ

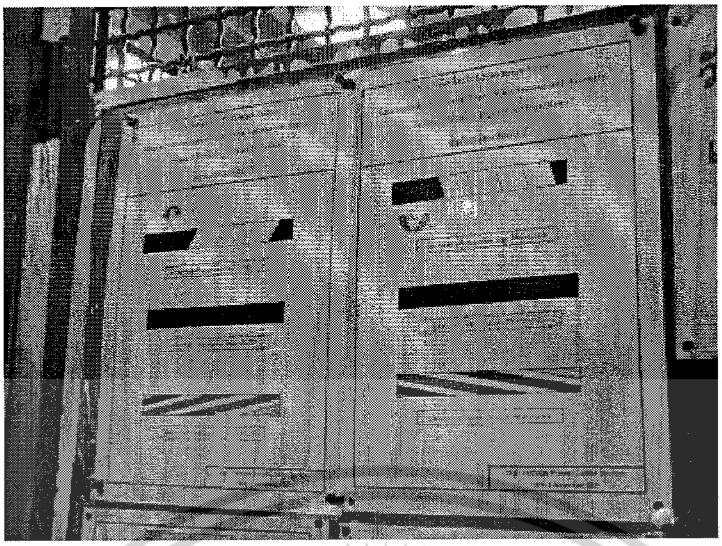
ที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์ให้กับสายเคเบิล เป็นการป้องกันอันตรายกับบุคคลภายนอกที่มีสัมผัสสายเคเบิล ซึ่งอาจเป็นแบบ Copper wire หรือ Copper Tape ก็ได้ ส่วนใหญ่ถ้าเป็น Type เล็ก ๆจะใช้เป็น Copper Tape

รูปที่ 9ก แสดงขั้นตอนการพันชั้นเปลือกโลหะ

3.ขั้นตอนการพันเทปผ้า

เป็นขั้นตอนก่อนที่จะมีการหุ้ม Jacket เพื่อที่ว่าเวลามีการหุ้ม Jacket แล้ว ชั้นของ Jacket จะได้ไม่ติดกับชั้นของเปลือกโลหะ ซึ่งจะทำให้ผิวด้านนอกเรียบและไม่เป็นคลื่น ตลอดจนช่วยในเรื่องของการปลอกสายเคเบิลด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

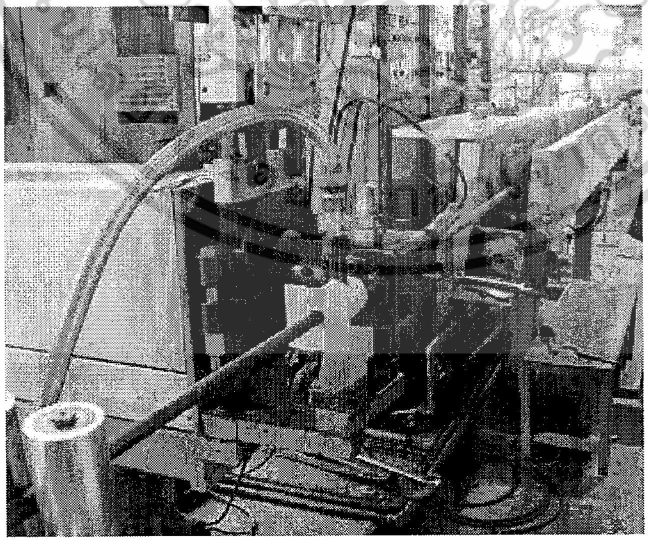


รูปที่ 10ก แสดงทิศทางการพันเทปผ้า

4.ขั้นตอนการหุ้ม Jacket

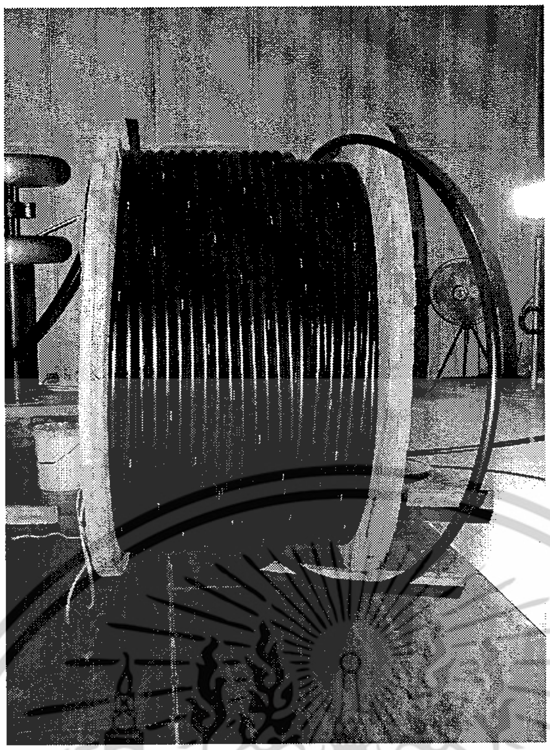
จะมีการหล่อเย็นด้วยน้ำสะอาด เพื่อลดอุณหภูมิของสายเคเบิลก่อนที่จะนำมาเก็บในวงล้อเพื่อนำไปทดสอบและจำหน่ายให้กับผู้ซื้อต่อไป

หมายเหตุ : แต่สำหรับสายทนไฟนั้น ก่อนที่จะทำการหุ้มฉนวนจะมี Mica พันอยู่ที่ชั้นของ Conductor เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจร (Short circuit) เป็นการเพิ่มคุณสมบัติเข้ามาอีกชั้น ซึ่งในชั้นของเปลือกนอก PE, PVC ที่ใช้จะเติมสาร Zero Halogen เข้าไป เพื่อว่าเวลาโดนไฟไหม้จะมีควันในปริมาณน้อย



รูปที่ 11ก แสดงกระบวนการหุ้ม Jacket และการหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12ก สายเคเบิลแรงดันปานกลางที่ได้จากกระบวนการผลิต

รูปที่ 13ก สายเคเบิลแรงดันสูงที่ได้จากกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสายไฟฟ้าแรงสูงในระหว่างขบวนการผลิต

การทดสอบไฟฟ้าแรงดันสูง ได้มีการแบ่งประเภทของการทดสอบออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1.การทดสอบแบบประจำ (Routine Test)

เป็นการทดสอบที่ทำโดยผู้ผลิตบนความยาวของสายไฟฟ้าที่ผลิตแต่ละเส้น เพื่อตรวจสอบว่าตลอดความยาวของสายไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตแต่ละเส้นเป็นไปตามข้อกำหนด

2.การทดสอบแบบสุ่มตัวอย่าง (Sample Test)

เป็นการทดสอบที่ทำโดยผู้ผลิตบนตัวอย่างของสายไฟฟ้าสำเร็จรูปแต่ละตัวอย่าง หรือส่วนประกอบที่ได้มาจากสายไฟฟ้าสำเร็จรูป เพื่อทดสอบว่าผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเป็นไปตามข้อกำหนด

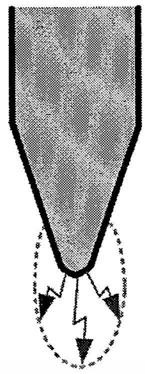
3.การทดสอบแบบเฉพาะหรือการทดสอบรับรอง (Type Test)

เป็นการทดสอบที่ทำก่อนนำผลิตภัณฑ์เข้าสู่ท้องตลาด เพื่อแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่เป็นน่าพอใจ ซึ่งต้องการการทดสอบที่สมบูรณ์เป็นหลักฐานเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องทดสอบซ้ำ ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในวัสดุประกอบของสายไฟฟ้า หรือการออกแบบ หรือกระบวนการผลิต ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

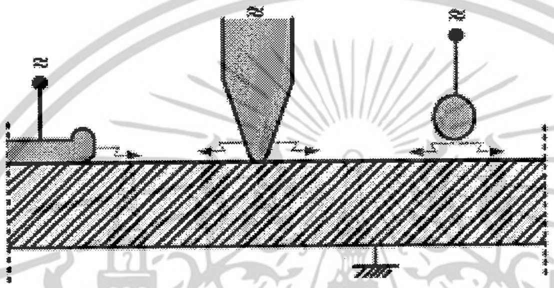
Partial Discharge Test

เป็นการทดสอบเกี่ยวกับการปล่อยประจุ หรือการดิสชาร์จบางส่วน โดยการวัดค่าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนของสายไฟฟ้า หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า ดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge) ซึ่งระดับของค่าดิสชาร์จภายในที่วัดได้นี้ จะบ่งชี้ถึงคุณภาพของฉนวนสายไฟฟ้าตลอดช่วงความยาวได้เป็นอย่างดี การทดสอบต้องเตรียมการวัดอย่างดีเพื่อลดปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวน (Noise หรือ Interference) สอดแทรกเข้ามาในระบบการวัด รวมทั้งผลของการเกิดดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) และโคโรน่าดิสชาร์จ (Corona Discharge) ต้องให้ลดน้อยลงมากที่สุด แล้วถ้าหากวัดระดับดิสชาร์จได้มีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดหรือสูงผิดปกติ นั่นอาจแสดงว่าภายในเนื้อฉนวนของสายไฟฟ้าอาจมีสิ่งเจือปนผิดปกติอยู่ เช่นอาจมี เศษผงวัสดุต่างๆ โลหะ หรือ ฝุ่น เป็นต้น หรือว่าภายในฉนวนมีโพรงอากาศ (Void) หรือมีความชื้นสูง หรือมีส่วนของชั้นสารกึ่งตัวนำแทรกเข้าไปเป็นปลายแหลมในเนื้อฉนวน สิ่งเหล่านี้จะทำให้อายุการใช้งานของสายไฟนั้นสั้นลง เพราะดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจะขยายเกิดเป็นรากทางไฟฟ้า (Electrical Tree) จนกระทั่งเกิดการเชื่อมโยงทางขั้วไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดการแตกหรือเบรกดาวน์ของชั้นฉนวนนี้ขึ้นในที่สุด การทดสอบนี้จะทำกับสายไฟฟ้าแรงดันสูงประเภทที่มีชีลด์หรือสายไฟฟ้าใต้ดิน

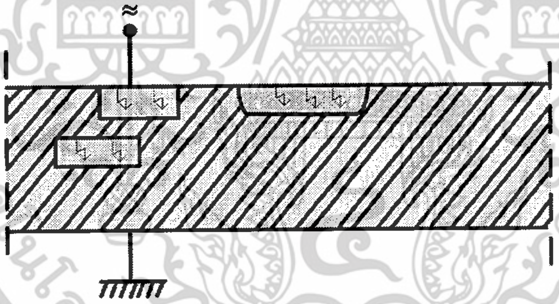
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[ก] โคโรนาดิสชาร์จ

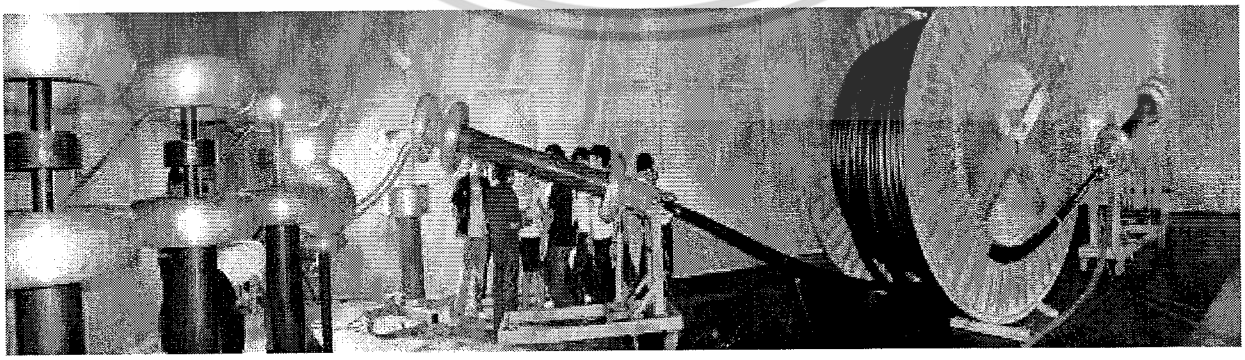


[ข] ดิสชาร์จตามผิว



[ค] ดิสชาร์จภายใน

รูปที่ 14ก รูปแสดงการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ



รูปที่ 15ก แสดงการทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟฟ้าทนไฟ (FIRE RESISTANT CABLE)

วัตถุประสงค์ของการใช้งานของสายประเภทนี้ เพื่อนำมาติดตั้งใช้งานในจุดที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยหรือเกิดไฟไหม้ที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีผู้คนอยู่อาศัยเป็นจำนวนมาก เช่น สถานีอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน สนามบิน ห้างสรรพสินค้า อาคารขนาดใหญ่ โรงแรม โรงภาพยนตร์ และโรงไฟฟ้า เป็นต้น

สายไฟฟ้าประเภททนไฟประกอบไปด้วยคุณลักษณะต่าง ๆตามที่ต้องการและความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ ซึ่งมีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

1.สามารถหน่วงเหนี่ยวการลุกลามของไฟ ไม่ให้ลุกลามต่อไปและดับลงได้ด้วยตัวเอง

2.ลดการปล่อยปริมาณควันไฟให้น้อยลง

3.สามารถที่จะจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะไฟไหม้ และทนทานต่อการลุกไหม้ ขณะที่มีการสเปรย์หรือฉีดน้ำ หรือขณะที่มีแรงกระแทก

4.ลดการเกิดก๊าซพิษและการกัดกร่อน

การเลือกใช้สายไฟชนิดนี้ต้องเลือกให้เหมาะสมตามลักษณะของการติดตั้งและใช้งาน นอกจากนี้สายไฟที่จะนำมาใช้นั้นต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐานด้วย

ชนิดของสายไฟฟ้าทนไฟ

สายไฟฟ้าทนไฟโดยทั่วไปแล้วแบ่งตามคุณลักษณะของสาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1.สาย Fire Resistant Cable เป็นสายประเภทที่มี Mica หรือ Glass Tape

2.สาย Flame Retardant Cable เป็นสายประเภทที่ไม่มี Mica หรือ Glass Tape

การทดสอบสายทนไฟ

1.การทดสอบ Flame Retardant Cable ตามมาตรฐาน IEC 60332-1

เป็นการทดสอบการลุกลามของเปลวไฟ สำหรับสายตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวประมาณ 600 มิลลิเมตร จำนวน 1 ท่อน ที่วางติดตั้งในตู้เผาขนาดเล็กในลักษณะแนวดั้ง (Single Vertical Cable) เผาด้วยเปลวไฟตามที่มาตรฐานกำหนดโดยระยะเวลาการทดสอบขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของสายตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1ก ตารางแสดงระยะเวลาการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60332-1

ขนาด D ของสายทนไฟ (mm.)	ระยะเวลาทดสอบ (วินาที)
D≤25	60
25<D≤50	120
50<D≤75	240
D>75	480

ค่าความต้องการของการทดสอบ

คือระยะลุกลามของเปลวไฟ จะต้องไม่เกิน 425 mm.

2.การทดสอบ Flame Retardant Cable ตามมาตรฐาน IEC 60332-3

เป็นการทดสอบการลุกลามของเปลวไฟ สำหรับสายตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวประมาณท่อนละ 3.5 เมตร จำนวน 1 ท่อน หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับประเภท Category ที่ต้องการทดสอบและปริมาตรของวัสดุอโลหะของสายไฟฟ้านั้น โดยติดตั้งแบบแนวตั้งภายในตู้เผาขนาดใหญ่ที่มีขนาดความกว้าง×ความยาว×ความสูง เท่ากับ $1m \times 2m \times 4m$ โดยประมาณ สายไฟฟ้าจะถูกผูกยึดติดไว้กับบันไดทดสอบ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 2ก ตารางแสดงระยะเวลาทดสอบตามมาตรฐาน IEC60332-3

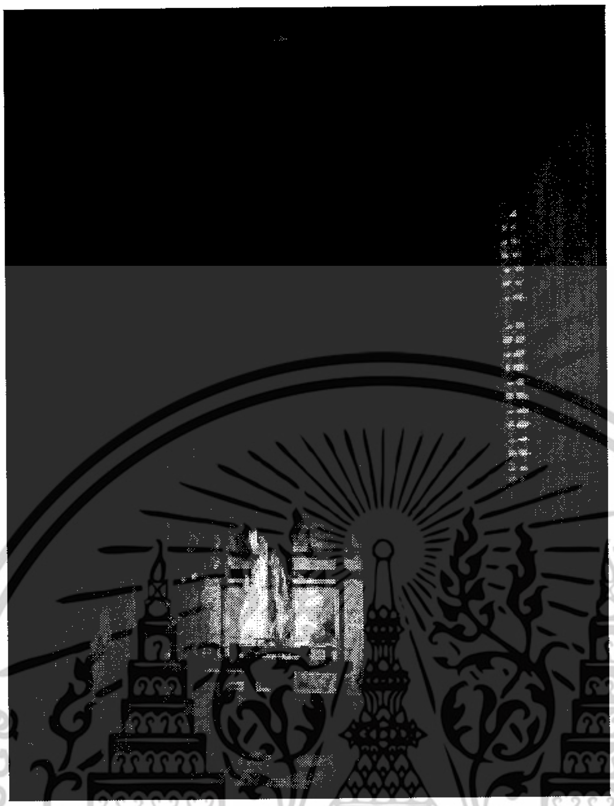
ประเภทของการทดสอบ	ปริมาตรของวัสดุอโลหะทั้งหมด	ระยะเวลาทดสอบ
Category A F/R	7 ลิตร ต่อ เมตร	40 นาที
Category A	7 ลิตร ต่อ เมตร	40 นาที
Category B	3.5 ลิตร ต่อ เมตร	40 นาที
Category C	1.5 ลิตร ต่อ เมตร	20 นาที
Category D	0.5 ลิตร ต่อ เมตร	20 นาที

ขณะทำการทดสอบเผาจะต้องควบคุมอัตราการไหลของลมและแก๊ส ดังต่อไปนี้

- Air Flow Rate 77.7 ± 4.8 LPM. ที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}C$ และความดัน 1 bar
- Gas (Propane) Flow Rate 13.5 ± 0.5 LPM. ที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}C$ และความดัน 1 bar
- Air Inlet Flow Rate 5000 ± 500 LPM. ที่อุณหภูมิ 20 ± 10 $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้องการของการทดสอบ คือ ระยะลุกลามของเปลวไฟ จะต้องไม่เกิน 2.5 เมตร



รูปที่ 16ก การทดสอบ Flame Retardant Cable ตามมาตรฐาน IEC 60332-3

3.การทดสอบ Smoke Density Test ตามมาตรฐาน IEC 61034

เป็นการทดสอบวัดปริมาณความหนาแน่นของควันที่เกิดจากการเผาสายตัวอย่างทดสอบภายในห้องทดสอบทึบแสงขนาด 27 ลูกบาศก์เมตร (กว้าง×ยาว×สูง=3×3×3 m) ที่ใช้หลักการส่องผ่านลำแสง (Light Transmission) ผ่านกลุ่มควันที่เกิดจากการเผาไหม้ชิ้นตัวอย่างด้วยเชื้อเพลิงที่เป็นแอลกอฮอล์ ปริมาณ 1 ลิตรโดยมีอัตราส่วนผสมของเอทานอล (Ethanol) 90±1% เมทานอล(Methanol) 4±1% น้ำ 6±1% และจำนวนชิ้นตัวอย่างที่ใช้เผา ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(D) ของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3ก ตารางแสดงจำนวนชิ้นตัวอย่างทดสอบ Smoke Density

เส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟ (mm.)	จำนวนชิ้นตัวอย่างทดสอบ (N)	
	แบบท่อน Cable	แบบ Bundles
D>40	1	-
20<D≤40	2	-
10<D≤20	3	-
5<D≤10	$N_1 = 45/(D)$	-
1<D≤5	-	$N_2 = 45/(3D)$

ในรายการทดสอบนั้น ต้องใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลของลม ระหว่าง 7-15 m^3/min. ในการกระจายควันที่เกิดจากการเผาไหม้ให้ทั่วทั้งตู้ทดสอบ

ค่าความต้องการของการทดสอบ

คือค่าต่ำสุดของ %Light Transmittance จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด หรือไม่ต่ำกว่า 60%

4.การทดสอบ Resistance to Fire Alone ตามมาตรฐาน BS 6387 (D2)

เป็นการทดสอบความทนทานต่อการลุกไหม้ของเปลวไฟฟ้าหรือสายเคเบิล ขณะที่มีการจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องในตู้เผา อุณหภูมิของเปลวไฟและระยะเวลาที่ทดสอบ จะแบ่งตามประเภทหรือสัญลักษณ์

ตารางที่ 4ก ตารางการแสดงประเภทและเงื่อนไขการทดสอบ Fire Alone

สัญลักษณ์	อุณหภูมิที่ทดสอบ	ระยะเวลาที่ทดสอบ
A	$650 \pm 40^{\circ}C$	3 ชั่วโมง
B	$750 \pm 40^{\circ}C$	3 ชั่วโมง
C	$950 \pm 40^{\circ}C$	3 ชั่วโมง
S	$950 \pm 40^{\circ}C$	20 นาที

โดยขณะทดสอบจะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบตามแรงดันพิกัดของสายไฟ และกระแสโหลดโดยประมาณ 0.25A (แรงดันพิกัดของสายไฟ เช่น 300/500V หรือ 450/750V หรือ 600/1000V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้องการของการทดสอบ

จะต้องไม่เกิดการลัดวงจรขึ้นที่เฟสใดๆ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขและระยะเวลาตามที่มาตรฐานกำหนด

รูปที่ 17ก การทดสอบ Resistance to Fire Alone

5.การทดสอบ Resistance to Fire with Water Spray ตามมาตรฐาน BS 6387 (D3)

เป็นการทดสอบความทนทานต่อการลุกไหม้ของเปลวไหม้ของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิลขณะที่มีการจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง และมีการสเปรย์น้ำหลังจากที่เกิดการเผาไหม้ไปเป็นเวลาที่กำหนดในการทดสอบ โดยขณะที่สเปรย์น้ำ ก็จะยังคงจ่ายแรงดันกระแสไฟฟ้า และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเช่นกัน อุณหภูมิของเปลวไฟและระยะเวลาทดสอบจะเป็นไปตามข้อกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

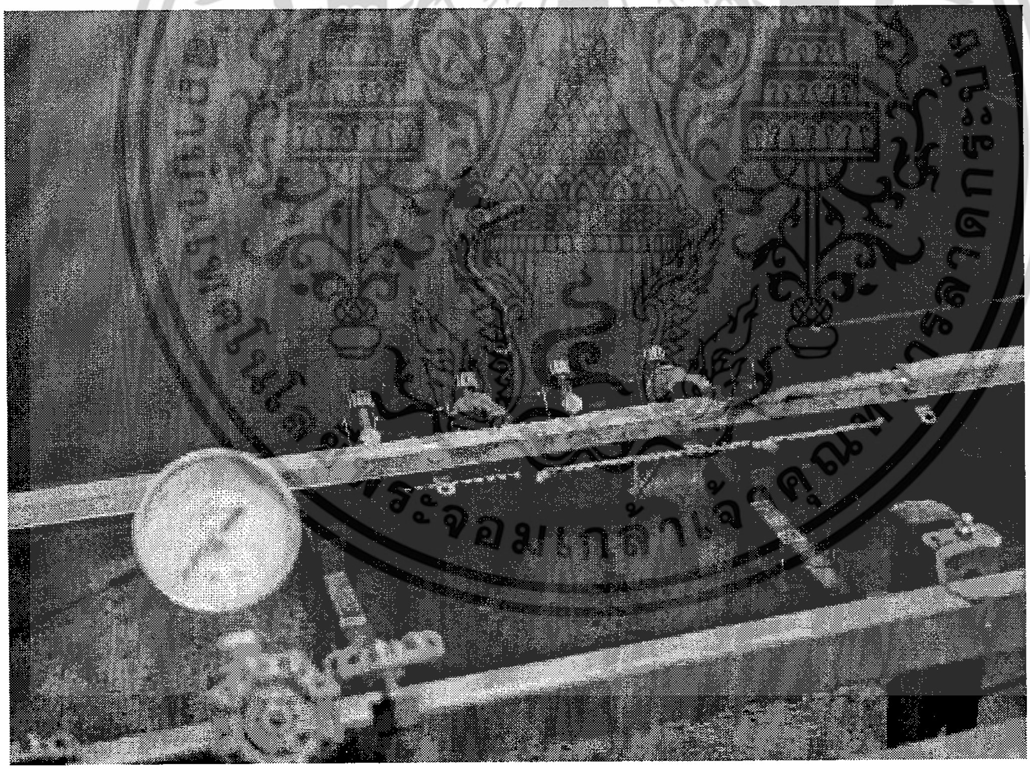
ตารางที่ 5ก ตารางแสดงเงื่อนไขการทดสอบ Water Spray Test

สัญลักษณ์	อุณหภูมิที่ทดสอบ	ระยะเวลาที่ทดสอบ
W	$650 \pm 40\,^{\circ}C$	15 นาทีและ ฉีดสเปรย์น้ำอีก 15 นาที

การทดสอบต้องใช้อัตราการฉีดหรือสเปรย์น้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.30 l/m^2.sec และมีความดันน้ำ 250-350 kPa ขณะทดสอบจะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบตามแรงดันพิกัดของสายไฟและกระแสโหลดโดยประมาณ 0.25A (แรงดันพิกัดของสายไฟ เช่น 300/500V หรือ 450/750V หรือ 600/1000V)

ค่าความต้องการของการทดสอบ

จะต้องไม่เกิดการลัดวงจรขึ้นที่เฟสใดๆ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขและระยะเวลาตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 18ก การทดสอบ Resistance to Fire with Water Spray

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.การทดสอบ Resistance to Fire with Mechanical Shock ตามมาตรฐาน BS 6387 (D4)

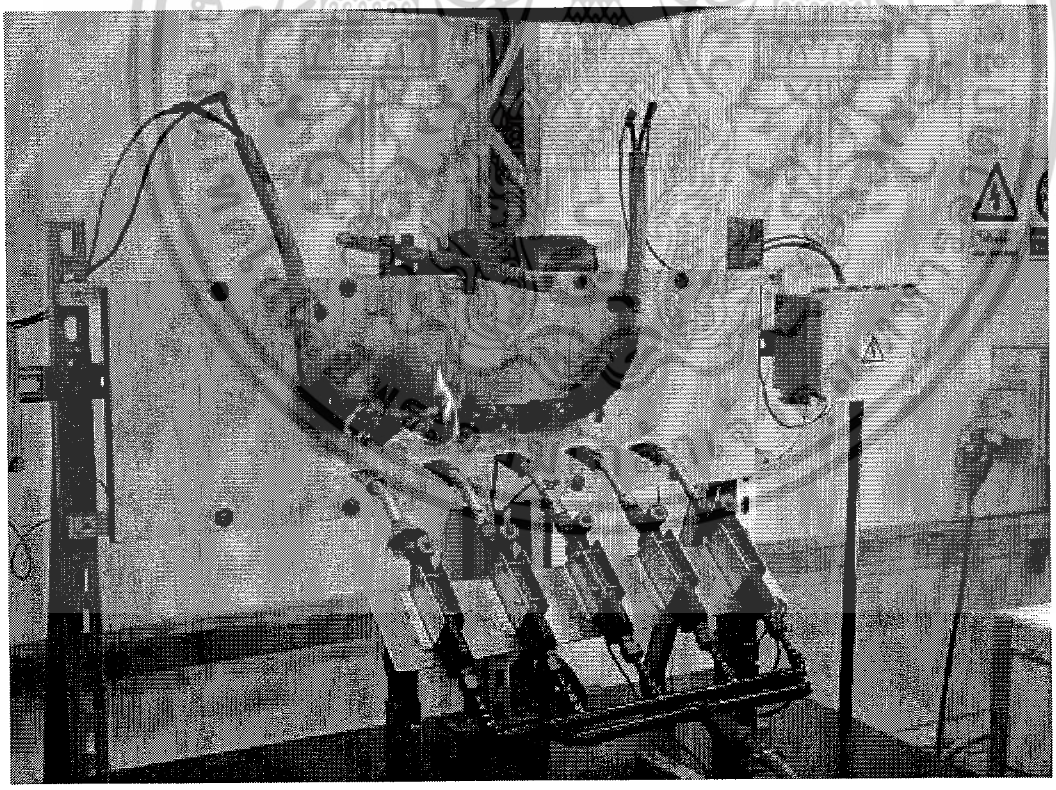
เป็นการทดสอบความทนทานต่อการลุกไหม้ของเปลวไหม้ของสายไฟหรือสายเคเบิล ขณะที่มีการจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง และมีแรงมากระทำทุกๆครึ่งนาที อุณหภูมิของเปลวไฟและระยะเวลาที่ทดสอบ จะแบ่งตามประเภทหรือสัญลักษณ์

ตารางที่ 6ก ตารางแสดงประเภทและเงื่อนไขของการทดสอบ Mechanical Shock Test

สัญลักษณ์	อุณหภูมิที่ทดสอบ	ระยะเวลาที่ทดสอบ
X	$650 \pm 40^{\circ}C$	15 นาที
Y	$750 \pm 40^{\circ}C$	15 นาที
Z	$950 \pm 40^{\circ}C$	15 นาที

ค่าความต้องการของการทดสอบ

จะต้องไม่เกิดการลัดวงจรขึ้นที่เฟสใดๆ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขและระยะเวลาตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 19ก การทดสอบ Resistance to Fire with Mechanical Shock

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.การทดสอบหาปริมาณก๊าซฮาโลเจน ตามมาตรฐาน IEC 60754-1

เป็นการทดสอบหาปริมาณของก๊าซฮาโลเจนที่เกิดจากการเผาวัสดุอโลหะที่เป็นองค์ประกอบของเคเบิล ภายในเตาเผาแบบปิดขนาดความยาว 500-600 mm. ด้วยอุณหภูมิความร้อนในช่วง $800 \pm 10^{\circ}C$ ภายในระยะเวลาทดสอบ 20 นาที ซึ่งก๊าซฮาโลเจนที่เกิดขึ้นนี้เป็นก๊าซพิษจะถูกส่งผ่านไปยังขวดแก้วที่บรรจุสารละลายมาตรฐาน 0.1 M Sodium hydroxide และสามารถหาปริมาณก๊าซฮาโลเจน ในรูปของกรดฮาโลเจนด้วยวิธีการไตเตรท

วิธีการทดสอบนี้ใช้ในกรณีที่วัสดุนั้น มีปริมาณกรดฮาโลเจน$\geq$ 5 มิลลิกรัม/กรัมของตัวอย่างค่าความต้องการของการทดสอบ

คือค่าปริมาณก๊าซฮาโลเจน ในรูปของกรดฮาโลเจน จะต้องไม่เกิน 0.5% ของปริมาณตัวอย่าง ตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60502-1 : 2004

หมายเหตุ : สำหรับวัสดุที่จะใช้ในการผลิตสายไฟฟ้าประเภททนไฟนี้ มักจะเป็นชนิด Halogen Free หรือ Zero halogen นั่นคือจะต้องไม่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบในวัสดุ ดังนั้นหัวข้อทดสอบนี้จึงไม่สามารถทดสอบได้ จะต้องใช้หัวข้อทดสอบ ข้อ 8. ต่อไป

8.การทดสอบหาค่า pH and Conductivity ตามมาตรฐาน IEC 60754-2

เป็นการทดสอบหาค่าความเป็นกรดของก๊าซฮาโลเจนที่เกิดจากการเผาวัสดุอโลหะที่เป็นองค์ประกอบของเคเบิล ภายในเตาเผาแบบปิด เช่นเดียวกับข้อ 7. แต่จะใช้อุณหภูมิความร้อนที่เผาไม่ต่ำกว่า 935 $^{\circ}C$ และใช้ระยะเวลาทดสอบเผา 30 นาที ก๊าซฮาโลเจนที่เกิดขึ้นขณะเผาจะถูกส่งผ่านไปยังขวดแก้วที่บรรจุน้ำไว้ ซึ่งก๊าซฮาโลเจนเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นกรด นำสารละลายที่ได้นี้ไปทดสอบหาค่า pH (ค่าความเป็นกรด-ด่าง) และค่า Conductivity (ค่าความนำไฟฟ้า) ด้วยเครื่องมือทดสอบ

วิธีการทดสอบนี้ใช้ในกรณีที่วัสดุนั้น มีปริมาณกรดฮาโลเจน > 5 มิลลิกรัม/กรัมของตัวอย่าง

ค่าความต้องการของการทดสอบ

คือค่า pH ต้องไม่ต่ำกว่า 4.3 และค่า Conductivity ต้องไม่เกินกว่า 10 microsiemen/mm.

9.การทดสอบหาค่าปริมาณออกซิเจน (Oxygen Index) ตามมาตรฐาน ASTM D 2863 หรือ ISO 4589

เป็นการทดสอบหาปริมาณออกซิเจนที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ วิธีการทดสอบนี้มักใช้ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตสายไฟฟ้าประเภททนไฟ อาจเป็นฉนวน หรือเปลือกนอก หรืออื่นๆ โดยการเริ่มเผาวัสดุในสภาวะบรรยากาศปกติ ซึ่งจะมีปริมาณออกซิเจน 21% และไนโตรเจน 79% ว่าเกิดการลุกไหม้ได้หรือไม่ หากวัสดุนั้นไม่เกิดการลุกไหม้หรือติดไฟได้ ก็ให้เพิ่มปริมาณออกซิเจนเข้าไปจนกระทั่งถึงปริมาณออกซิเจนที่ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุนั้นสามารถติดไฟได้ ซึ่งวัสดุที่ใช้ปริมาณออกซิเจนในการลุกไหม้ จะเป็นวัสดุที่สามารถติดไฟได้ยากกว่าวัสดุที่ใช้ปริมาณออกซิเจนน้อยในการลุกไหม้ และเหมาะที่จะนำมาใช้ในการผลิตสายไฟฟ้าประเภททนไฟ

ค่าความต้องการของการทดสอบ

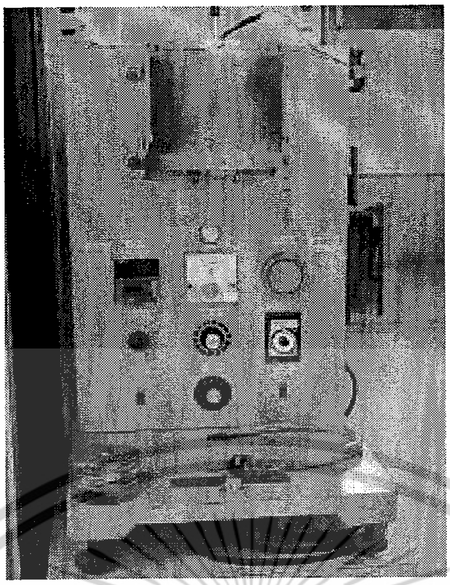
คือค่า Oxygen Index (OI) จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า ค่าที่มาตรฐานกำหนด หรือ ปกติจะต้องไม่น้อยกว่า 30%

รูปที่ 20ก การทดสอบหาค่าปริมาณออกซิเจน (Oxygen Index)

10.การทดสอบ Melt Index Tester

ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 160 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 นาที แล้วดูว่าค่า MI ที่ได้ต้องไม่เกิน 1 กรัม

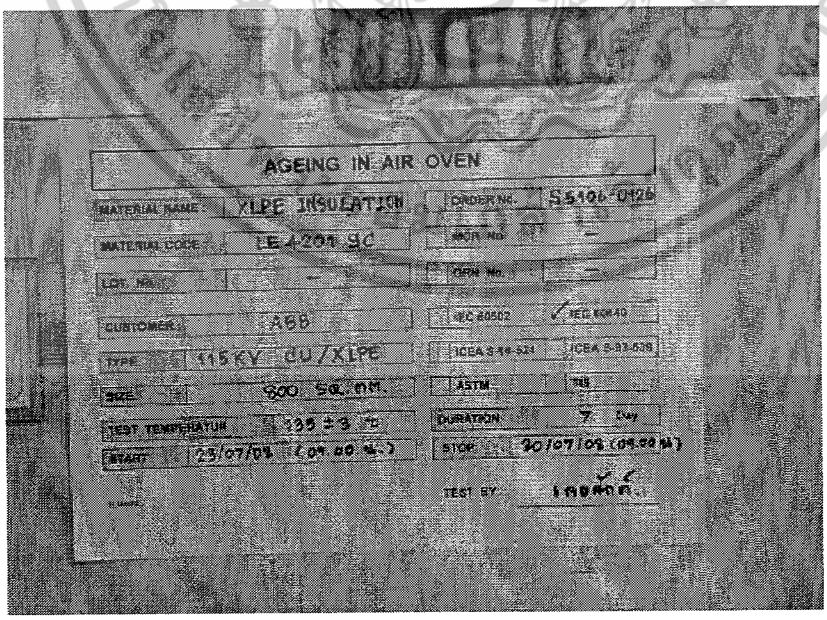
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21ก การทดสอบ Melt Index Tester

11.การทดสอบ Ageing in Air Oven

เป็นการเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพ เพื่อยืดอายุการใช้งาน โดยทำการบ่มวัสดุไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน ซึ่งอุณหภูมิทดสอบของแต่ละวัสดุจะแตกต่างกันออกไป เช่น อุณหภูมิทดสอบของ XLPE ที่ 135 $^{\circ}C$ และ PVC ที่ 100 $^{\circ}C$ หลังจากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องดึงและดูว่าทนแรงดึงได้กี่กิโลกรัม โดยแรงดึงของ XLPE $\geq$ 12.5 ตำแหน่งต่อมิลลิเมตร โดยก่อนและหลังการ Ageing จะต้องมีแรงดึงไม่ต่างกันเกินกว่า $\pm 25\%$



รูปที่ 22ก ข้อมูลการการทดสอบ Ageing in Air Ovenของฉนวน XLPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.การทดสอบ Hot Set Test

เป็นการดูเนื้อฉนวนที่ได้ทำการ Curing แล้วว่ามีความสมบูรณ์หรือไม่โดยอบในตู้ทดสอบที่อุณหภูมิ 200 $^{\circ}C$ $\pm 3^{\circ}C$ เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปทดสอบโดยการดึงให้เป็นไปตามค่ามาตรฐานต่อไป

13.การทดสอบ Shrinkage Test

เป็นการทดสอบการหดตัวของฉนวน โดยอบที่อุณหภูมิ 130 $^{\circ}C$ $\pm 3^{\circ}C$ เป็นเวลา 360 นาที เมื่อเวลาผ่านไปให้วัดว่าวัสดุหดไปเป็นระยะเท่าไหร่โดยตามมาตรฐาน IEC ต้องไม่เกิน 4%

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

รูปที่ 1ข เครื่องหมายการค้าของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

ก่อตั้งขึ้นเมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ.2507 ด้วยเงินทุนจดทะเบียนครั้งแรก 4 ล้านบาท โดยมีผู้ถือหุ้น ผู้บริหาร ตลอดจนวิศวกรเป็นคนไทยทั้งหมด เพื่อดำเนินกิจการการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้าชนิดตัวนำทองแดงและตัวนำอลูมิเนียม

ตลอดจนระยะเวลา 40 ปีที่ผ่านมา กิจการของบริษัทฯ ได้ขยายตัวเติบโตอย่างต่อเนื่อง และสามารถพัฒนาการบริหารในทุก ๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นการจัดการ การผลิต การตลาด หรือการพัฒนาทรัพยากรบุคคล

บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด มุ่งมั่นที่จะพัฒนาองค์กรให้มีความสมบูรณ์ทั้งในด้านผลิตภัณฑ์ และการบริการ ซึ่ง ณ วันนี้ บริษัทฯได้บรรลุเป้าหมายดังกล่าวและสามารถดำรงสถานะเป็นหนึ่งในบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายสายไฟฟ้าชั้นนำของประเทศไทยได้อย่างเต็มภาคภูมิ

ทำเลที่ตั้ง

สำนักงานใหญ่ : 187/1 ถ.ราชดำริ แขวงลุมพินี เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
โทร : 0-2651-9221-30, 0-1651-9252, 0-2254-4450-9
โทรสาร : 0-2253-6028, 0-2253-5973, 0-2254-3859,0-2252-9060

โรงงานสมุทรปราการ : 93 หมู่ 11 ถ.สุขสวัสดิ์ ต.ในคลองบางปลากด อ.พระสมุทรเจดีย์ สมุทรปราการ 10290
โทร : 0-2425-0441-3, 0-2425-0445-7, 0-2815-6291-5
โทรสาร : 0-2425-8686-7, 0-2815-6296

โรงงานฉะเชิงเทรา : 39/1 หมู่ 1 ถ.บางปะกง-เชิงเทรา ต.แสนภูดาษ อ.บ้านโพธิ์ ฉะเชิงเทรา 24140
โทร : 0-3857-7266-74, 0-3857-7272-4, 0-3857-7396-400
โทรสาร : 0-3857-7270-1, 0-3857-7401

Website : www.bangkokcable.com

E-mail : bcc@bangkokcable.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการดำเนินธุรกิจ : ผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้าชนิดตัวนำทองแดงและตัวนำอลูมิเนียม

ผลิตภัณฑ์คุณภาพมาตรฐาน

เพื่อตอบสนองความต้องการของการใช้สายไฟฟ้า บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ๙งมีโรงงานตั้งอยู่ ณ จังหวัดสมุทรปราการและฉะเชิงเทรา สามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้าทุกประเภท ทั้งชนิดตัวนำทองแดงและอลูมิเนียม รวมไปถึงสายเปลือยและสายหุ้มฉนวน XLPE , PVC และ PE จากกรรมวิธีการผลิตและเครื่องจักรที่ทันสมัย โดยมีกำลังการผลิตทองแดง 100,000 ตัน/ปี ผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้าของบริษัทฯสามารถแยกออกเป็นแต่ละประเภทได้ดังนี้

- สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ
- สายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง
- สายไฟฟ้าแรงดันสูง
- สายคอนโทรล
- สายอ่อน
- สายตัวนำเปลือย
- สายทนไฟ

การควบคุมคุณภาพ

บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด มีนโยบายชัดเจนในการผลิตสายไฟฟ้าด้วยคุณภาพที่เป็นไปตามมาตรฐานในทุกขั้นตอนของการผลิต ตั้งแต่การคัดสรรวัตถุดิบ กระบวนการผลิต รวมถึงเครื่องมือทดสอบอันทันสมัยจากช่างเทคนิคและวิศวกรที่ผ่านการฝึกฝนและเรียนรู้งานมาเป็นอย่างดี

ระบบบริหารงานคุณภาพ

ด้วยความมุ่งมั่นที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานตลอดจนปรับปรุงสินค้าและบริการให้มีคุณภาพตามนโยบายที่ได้วางไว้ บริษัทฯจึงได้นำระบบบริหารงานคุณภาพมาตรฐานสากลมาใช้ในการดำเนินงาน โดยจัดให้มีการอบรมแก่พนักงานทุกระดับ เพื่อเพิ่มทักษะ เพิ่มความรู้ รวมถึงส่งเสริมและสนับสนุนการทำงานเป็นทีม

ปัจจุบันบริษัทได้รับการรับรองระบบบริหารงานคุณภาพมาตรฐานสากลดังนี้

- ระบบคุณภาพ ISO 9001:2000 จาก RWTUV (THAILAND) LTD.
- ระบบคุณภาพ มอก./ISO 9001 : 2000 จากสถาบันรับรองมาตรฐานไอเอสโอ (สรอ.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบคุณภาพ ISO 9001:2000 ในด้านการออกแบบและผลิตสายไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องการความปลอดภัยในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ จาก LOSS PREVENSION CERTIFICATION BOARD (LPCB) ประเทศอังกฤษ
- ระบบจัดการอาชีวอนามัยและความปลอดภัย (มอก. 18001:2542 และ OHSAS 18001:1999) จากสถาบันรองรับมาตรฐานไอเอสโอ (สรอ.)

นโยบายคุณภาพ

มุ่งมั่นสู่ความเป็นผู้นำในการผลิตสายไฟฟ้าที่มีคุณภาพเป็นเลิศ ส่งสินค้าได้รวดเร็วโดยใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีที่ทันสมัย มีการปรับปรุงระบบบริหารคุณภาพอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างความพึงพอใจแก่ลูกค้า

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ

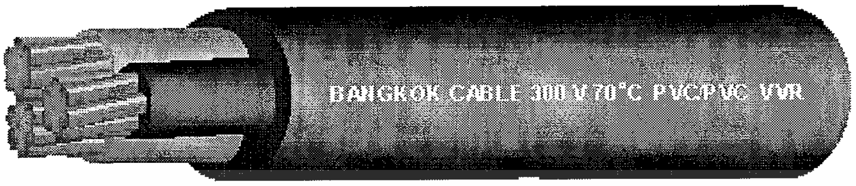
รูปที่ 2ข BUILDING WIRES AND CABLES
750 V 70°C PVC Insulated, Single Core

รูปที่ 3ข CONTROL CABLES
0.6/1 KV PVC Insulated and Sheathed Control Cable with Steel Wire Armour

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300V 70°C VVR

TIS 11-2531, TABLE 3 (3 CORE)



รูปที่ 4ข LOW VOLTAGE POWER CABLES VVR (3 CORE)

300 V 70°C PVC Insulated and Sheathed, Round Type

12/20(24) kV CV (CE optional)*

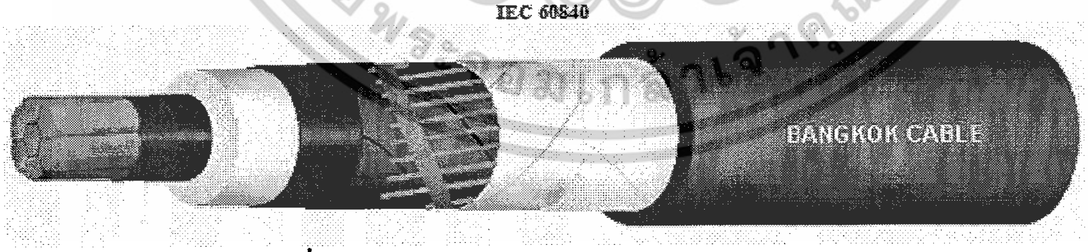
IEC 60502-2 (1 CORE)

รูปที่ 5ข MEDIUM VOLTAGE POWER CABLES

12/20 (24) kV XLPE insulated and PVC sheathed power cables

115 kV CE

IEC 60840



รูปที่ 6ข HIGH VOLTAGE POWER CABLES

115 kV XLPE insulated and PE sheathed underground power cable (IEC 60840)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงค่าต่าง ๆที่ใช้ในการออกแบบและทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

ตารางที่ 1ค : กระแส Short Circuit เมื่อป้อนกระแส Short Circuit เป็นระยะเวลา 1 วินาที

พื้นที่หน้าตัด (mm^2)	กระแส Short Circuit เมื่อป้อนที่เวลา 1วินาที. (KA)
	ทองแดง
10	0.955
16	1.53
25	2.39
35	3.34
50	4.78
70	9.94
95	13.5
120	17.0
150	21.3
185	26.3
240	34.1
300	42.6
400	56.8
500	71.0

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2ค : ค่า Correction , k สำหรับการคำนวณหาค่า Insulation Resistance

อุณหภูมิขณะวัด $(^{\circ}C)$	ค่า Correction Factor , k	
	15.6 $(^{\circ}C)$	20 $(^{\circ}C)$
20	1.72	1
21	1.95	1.13
22	2.22	1.29
23	2.51	1.46
24	2.81	1.63
25	3.17	1.84
26	3.6	2.09
27	4.06	2.36
28	4.62	2.69
29	5.1	2.97
30	5.9	3.43
31	6.7	3.89
32	7.5	4.36
33	8.5	4.94
34	9.6	5.58
35	11	6.39

- <u>หมายเหตุ</u> **<u>ความต้านทานมาตรฐานของฉนวน(สำหรับฉนวน XLPE) คำนวณได้ดังนี้</u>**

$$R_{15.6\,^{\circ}C} = K\log(D/d)$$ หน่วย MΩ-1000 feet

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของชั้นฉนวน

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของชั้นฉนวน

K = 20000 สำหรับสายไฟขนาดตั้งแต่ 2001 V ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3ค : สูตรคำนวณหาค่าความต้านทานของตัวนำ (Conductor Resistance) ของสายชนิดต่าง ๆ

ชนิด	มาตรฐานการทดสอบอ้างอิง	ประเภทเครื่องมือที่ใช้วัด	สูตรคำนวณหาค่าความต้านทาน	ค่าความต้านทานที่มาตรฐานกำหนด
PAC, CU/XLPE	IEC 60502-1 IEC 60502-2 IEC 60840 IEC 60228	-ใช้ Kelvin-type Bridge หรือ Potentiometer	$R_{20\,°C} = Rt * Kt(1000/L) \ldots \Omega/km$ R_t = ค่าความต้านทานที่วัดได้ที่อุณหภูมิ t (Ω) Kt = Correction Factor ที่อุณหภูมิ t $K_t = K_{AL} = 248/(228+t)$ $K_t = K_{CU} = 254.5/(234.5+t)$ L = ความยาวสายที่วัด (m)	Table II-IEC 60228 หรือ PEA Specification หรือ MEA Specification หรือ EGAT Specification

ตารางที่ 4ค : การทดสอบดูการทนทานไฟฟ้าของเปลือกสายไฟฟ้าแรงสูง

วิธีทดสอบ	วิธีการ	ความต้องการของการทดสอบ
1. วิธีทดสอบความทนทานไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage Test)	จ่ายแรงดันไฟฟ้า DC 8 kV ต่อมิลลิเมตรของความหนาเปลือกที่ระบุ เป็นเวลา 1 นาที ระหว่างลวดตัวนำชิลด์กับเปลือกด้านนอกที่เคลือบแกรไฟร์ หรือ โดยการแช่น้ำ แต่แรงดันทดสอบสูงสุดต้องไม่เกิน 15 kV	จะต้องไม่เกิดการแตก หรือเบรกดาวน์เกิดขึ้นกับเปลือกของสายไฟที่ทดสอบ
2. วิธีสปาร์กไฟฟ้ากระแสสลับ (AC. Spark Test)	จ่ายแรงดันไฟฟ้า DC 6 kV ต่อมิลลิเมตรของความหนาเปลือกที่ระบุ เป็นเวลา 1 นาที ระหว่างลวดตัวนำชิลด์กับเปลือกด้านนอกที่เคลือบแกรไฟร์ หรือ โดยการแช่น้ำ ซึ่งใช้เป็นกราวด์แทน แต่แรงดันทดสอบสูงสุดต้องไม่เกิน 15 kV	จะต้องไม่เกิดการแตก หรือเบรกดาวน์เกิดขึ้นกับเปลือกของสายไฟที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. . วิธีสปาร์กไฟฟ้ากระแสตรง (DC. Spark Test)	จ่ายแรงดันไฟฟ้า DC 8 kV ต่อมิลลิเมตรของความหนาเปลือกที่ระบุ เป็นเวลา 1 นาที โดยต่อขั้วบวกกับเปลือกด้านนอกและตัวขั้วลบกับตัวนำชิลด์ แต่แรงดันทดสอบสูงสุดต้องไม่เกิน 25 kV	จะต้องไม่เกิดการแตก หรือเบรกดาวน์เกิดขึ้นกับเปลือกของสายไฟที่ทดสอบ

ตารางที่ 5ค : การทดสอบ ELETRICAL TYPE TEST ตาม IEC60502-2 หรือ มอก.2143

ลำดับหัวข้อของการทดสอบ	พิกัดของสายเคเบิล (kV)
	12/20(24)
1. Partial Discharge Test 1.1 ทดสอบที่แรงดัน AC $1.73U_0$ เท่ากับ 1.2 ค่า Partial Discharge ต้องไม่เกิน	 21 kV 5 pC
2. Bending Test Followed by a Partial Discharge Test	
3. Partial Discharge Test 3.1 ทดสอบที่แรงดัน AC $1.73U_0$ เท่ากับ 3.2 ค่า Partial Discharge ต้องไม่เกิน	 21 kV 5 pC
4. Bending Test Followed by a Partial Discharge Test 4.1 ขนาด Diameter ของ Test Cylinder ที่จะใช้ในการโค้งงอ (D = Diameter ของสาย , d = diameter ของตัวนำ) 4.2 ทำการดัดโค้งงอในทิศทางไปและกลับถือเป็น 1 ครั้ง จำนวน 4.3 หลังทำการโค้งงอให้นำมาทดสอบ Partial Discharge 4.3.1 ทดสอบที่แรงดัน AC $1.73U_0$ เท่ากับ 4.3.2 ค่า Partial Discharge ต้องไม่เกิน	 20(D+d) $\pm 5\%$ 3 ครั้ง 21 kV 5 pC
5. Tan Delta Measurement **(ยกเว้นหัวข้อนี้สามารถใช้สายอีกเส้นหนึ่งได้)** 5.1 ทำการ Heating ตัวนำให้ได้อุณหภูมิ 5.2 ให้วัดค่าที่ระดับแรงดัน ไม่ต่ำกว่า 5.3 ค่า Tan Delta ที่วัดได้ ต้องไม่เกิน	 95-100 ^{o}C 2 kV 80×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Heating cycle Test , Followed by Partial Discharge Test	
6.1 ทำการ Heating ตัวนำให้ได้อุณหภูมิ	95-100 ^{o}C
6.2 ระยะเวลาในการ Heating	8 ชม.
6.3 ระยะเวลาในการปล่อยให้ตัวนำเย็นลงหรือ Cooling อย่างน้อย	3 ชม.
6.4 จำนวนรอบของการ Heating และ Cooling	20 รอบ
6.5 หลังการ Heating Cycle แล้ว ให้นำมาทดสอบ Partial Discharge	
6.5.1 ทดสอบที่แรงดัน AC $1.73U_0$ เท่ากับ	21 kV
6.5.2 ค่า Partial Discharge ต้องไม่เกิน	5 pC
7. Impulse Voltage Test , Followed by Partial Discharge Test	
7.1 ทำการ Heating ตัวนำให้ได้อุณหภูมิ	95-100 ^{o}C
7.2ใช้แรงดันทดสอบ Lightning Impulse (ขั้ว+10 และขั้ว -10 ครั้ง)	125 kV
7.3 หลังจากนั้นให้นำมาทดสอบ AC Voltage Test ที่ห้องปกติ	
7.3.1 ทดสอบที่แรงดัน AC $3.5U_0$ เท่ากับ	42 kV
7.3.2 ต้องทนได้ภายในระยะเวลา	15 นาที
8. High Voltage Test for 4 h	
8.1 ทดสอบที่แรงดัน AC $4U_0$ เท่ากับ	18 kV
8.2 ต้องทนได้ภายในระยะเวลา	4 ชม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6ค : คุณสมบัติของวัสดุทางไฟฟ้า

ชนิดของวัสดุ	ε_r: Dielectric Constant	σ : Electrical Conductivity (S/m)	Electric Breakdown (kV/mm)	อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ $^{\circ}C$
XLPE	2.3	1×10^{-15}	30-50	90
PE	2.3	0.1	30-50	90-115
Copper	1	5.998×10^{7}	40 MV/m(4)	90

ตารางที่ 7ค : คุณสมบัติของวัสดุทางความร้อน

ชนิดของวัสดุ	K:Thermal Conductivity $(w/(m.K))$	ρ :Density (Kg/m^3)	C_p :Heat capacity $(J/(Kg.K))$
XLPE	0.5	950	1850
PE	0.33	925	2300
Copper	400	8700	385

ตารางที่ 8ค: คุณสมบัติของวัสดุทางกล

ชนิดของวัสดุ	E: Young's modulus (Pa)
XLPE	1.08×10^{9}
Copper	110×10^{9}

ข้อกำหนดโดยทั่วไปที่สำคัญ

สายเคเบิลใต้ดินที่ได้รับการออกแบบ , จัดสร้าง และ ติดตั้ง สำหรับการปฏิบัติภายใต้เงื่อนไขดังนี้.

ระบบแรงดัน : 3-phase, 22 kV and 33 kV,

ความถี่ : 50 Hz

อุณหภูมิตัวนำ

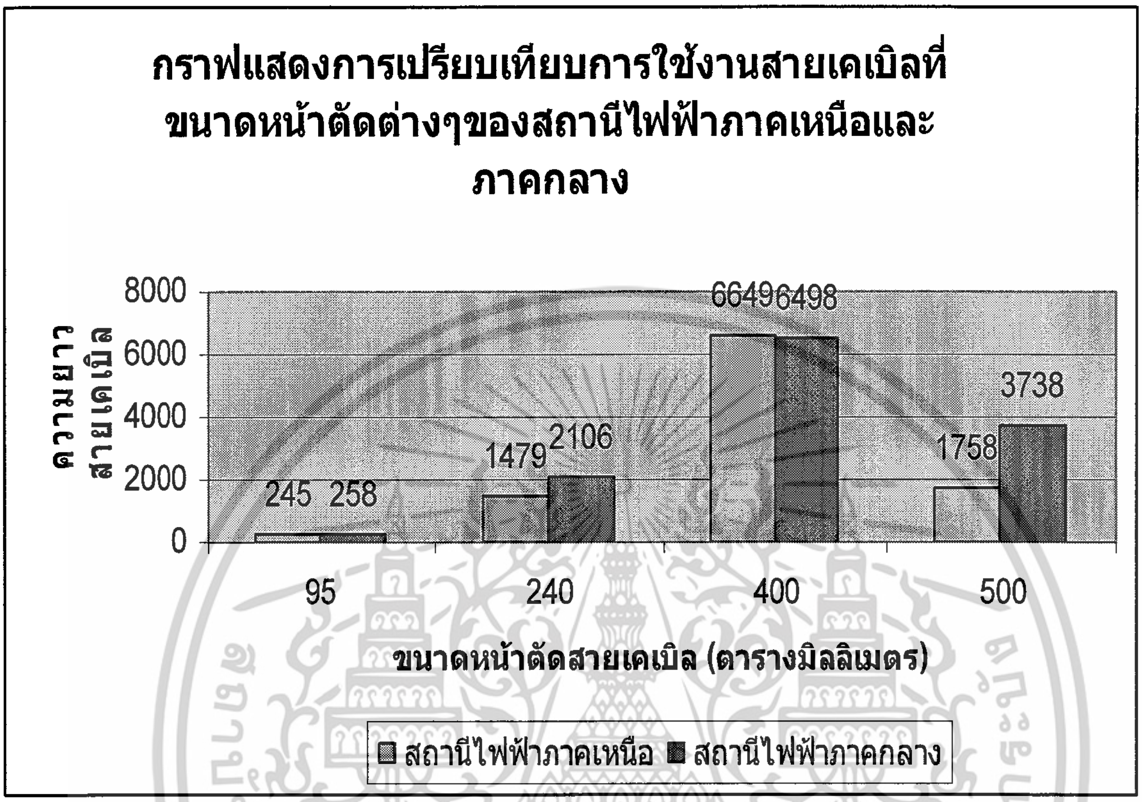
สำหรับอุณหภูมิปกติ : ต่อเนื่องที่ 90 ^{o}C

สำหรับอุณหภูมิวิกฤติ : 130 ^{o}C

สำหรับอุณหภูมิกระแส short-circuit condition : 250 ^{o}C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
การประยุกต์ใช้งานสายเคเบิล



รูปที่ 1ง เปรียบเทียบการใช้งานสายเคเบิลของสถานีไฟฟ้าภาคเหนือและภาคกลาง สำหรับระบบแรงดัน 22 kV

สายเคเบิลใต้ดิน

XLPE 240 mm^2 สำหรับ Line main

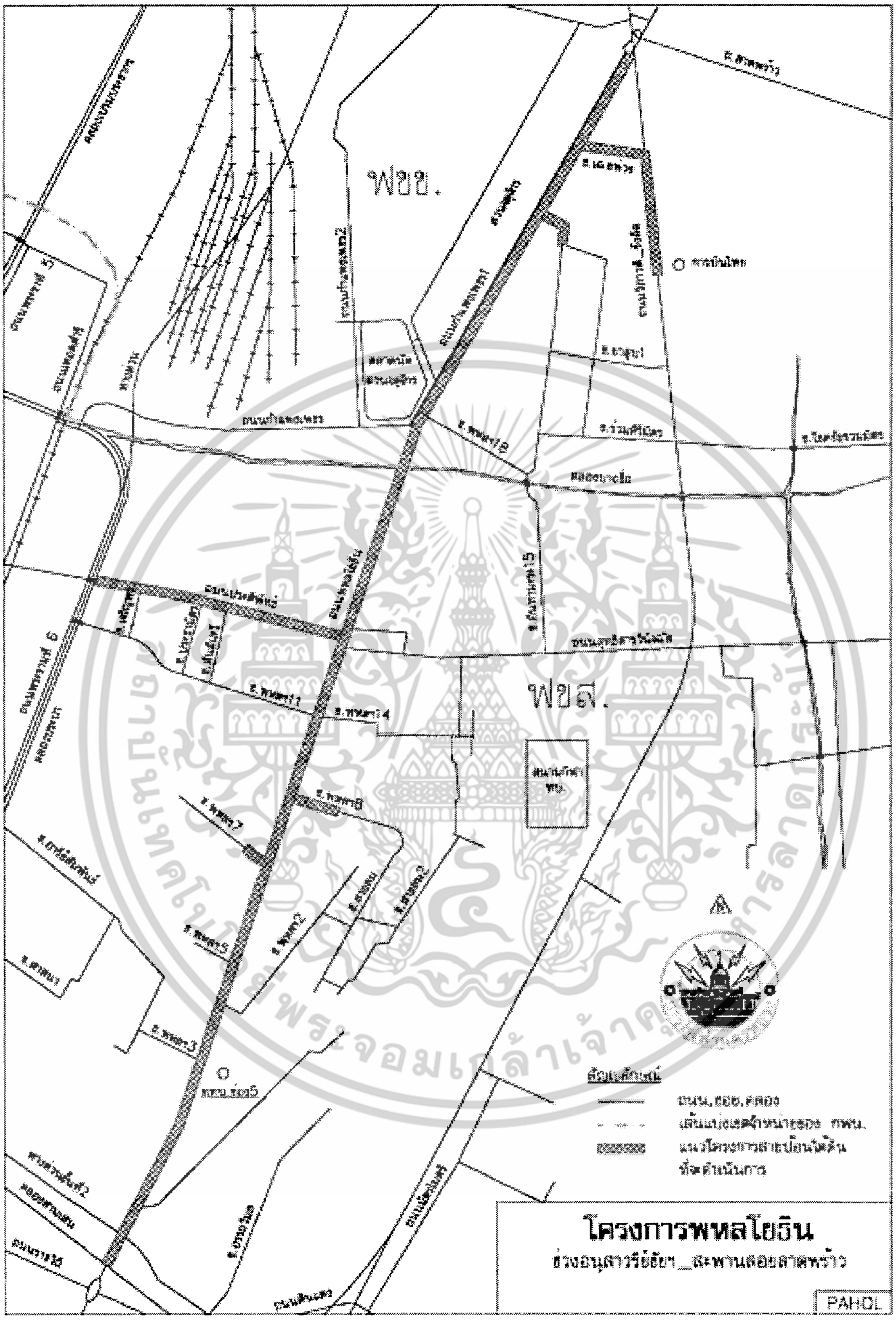
XLPE 1-50 mm^2 สำหรับ วงจรแยกให้ผู้ใช้ไฟฟ้า

สายแรงต่ำ

CV 1-185 mm^2 สำหรับวงจรหลัก

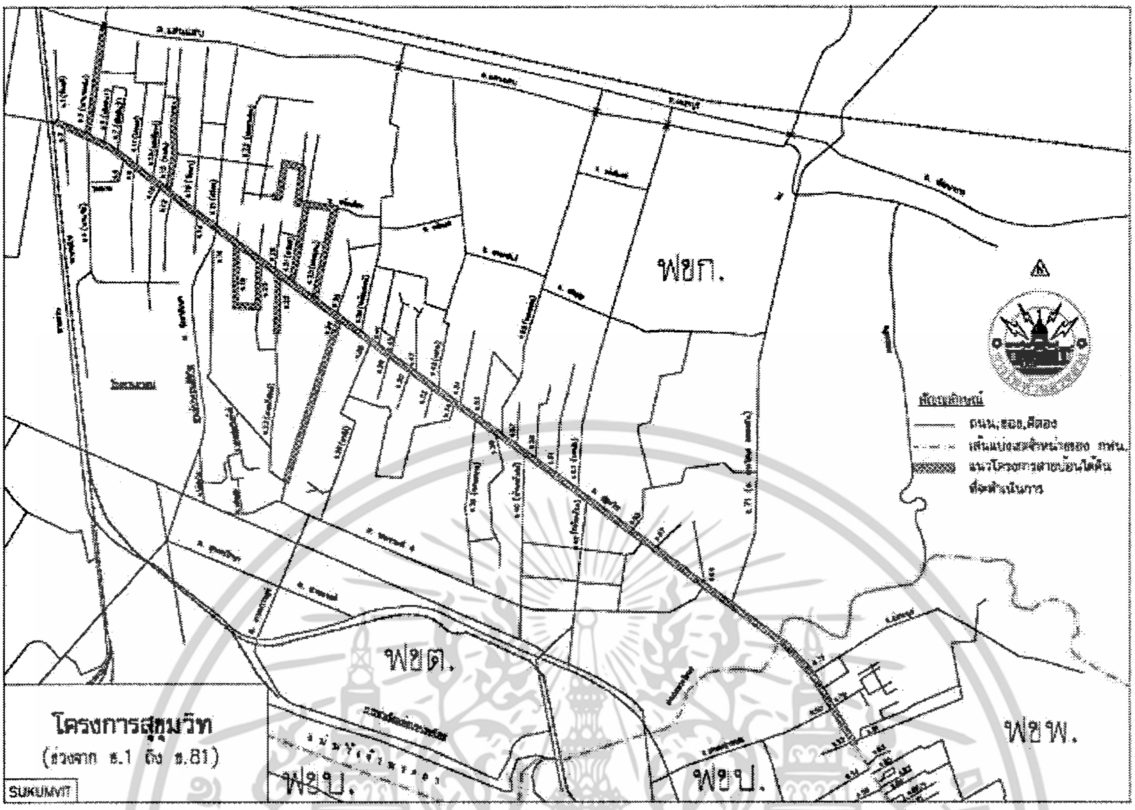
CV 1-95 mm^2 สำหรับ วงจรแยกให้ผู้ใช้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

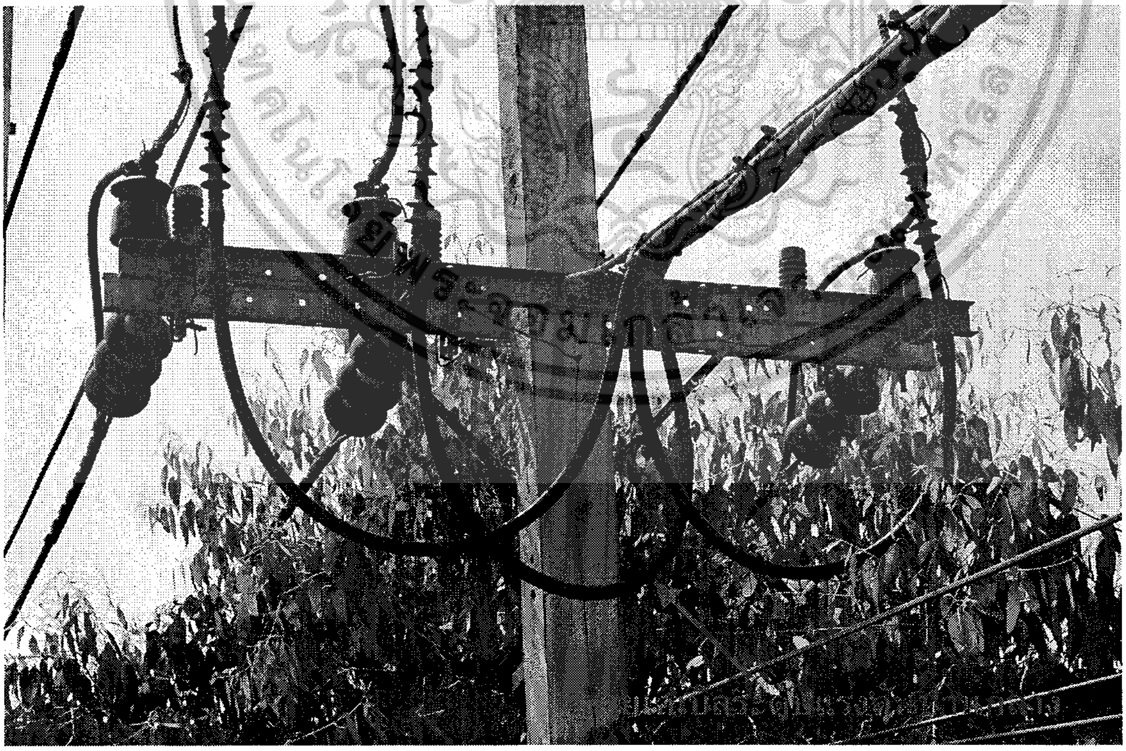


รูปที่ 2ง แนวโครงการสายป้อนใต้ดินของโครงการพหลโยธิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

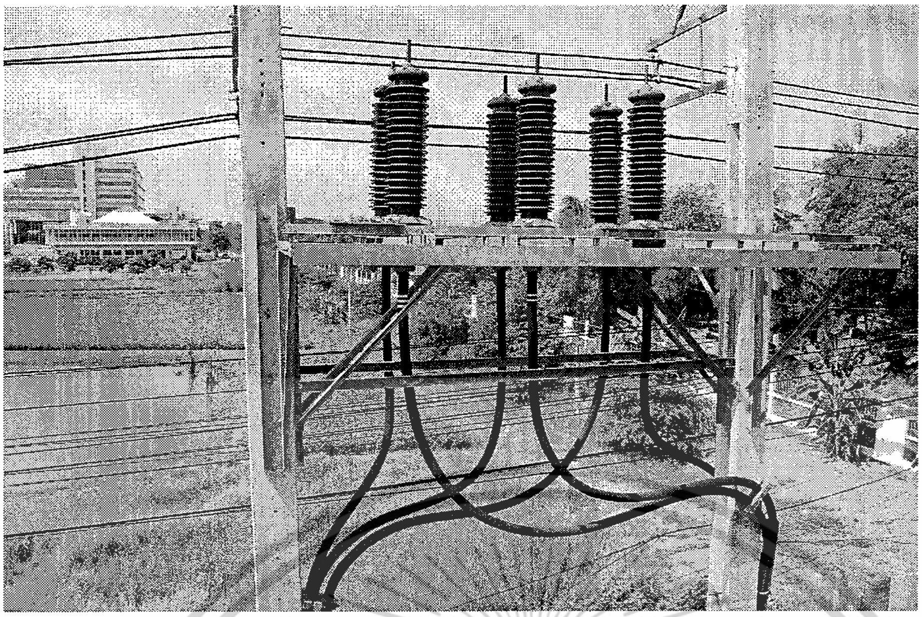


รูปที่ 3ง แนวโครงการสายป้อนใต้ดินของโครงการสุขุมวิท

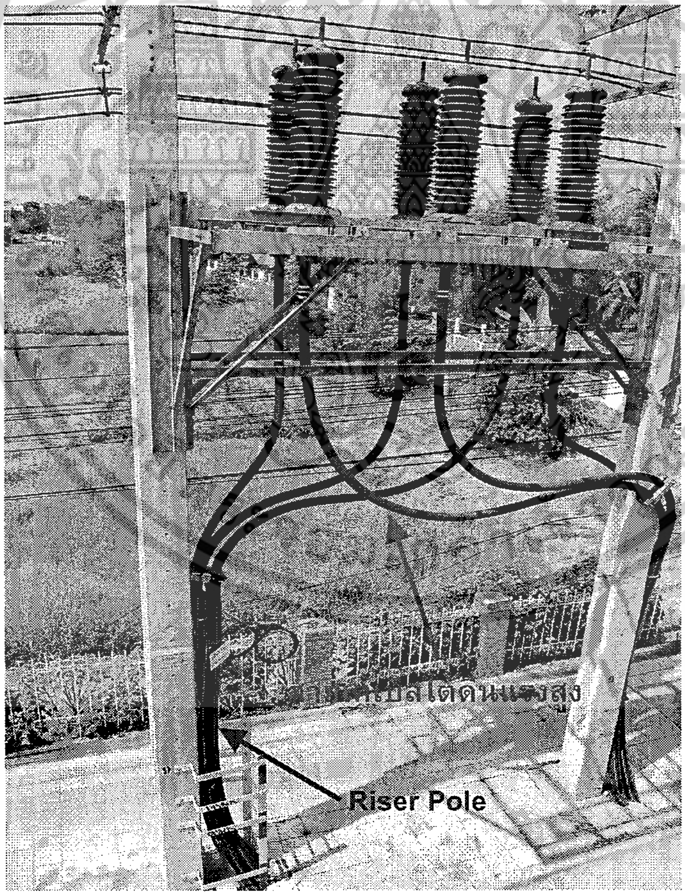


รูปที่ 4ง การใช้งานสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



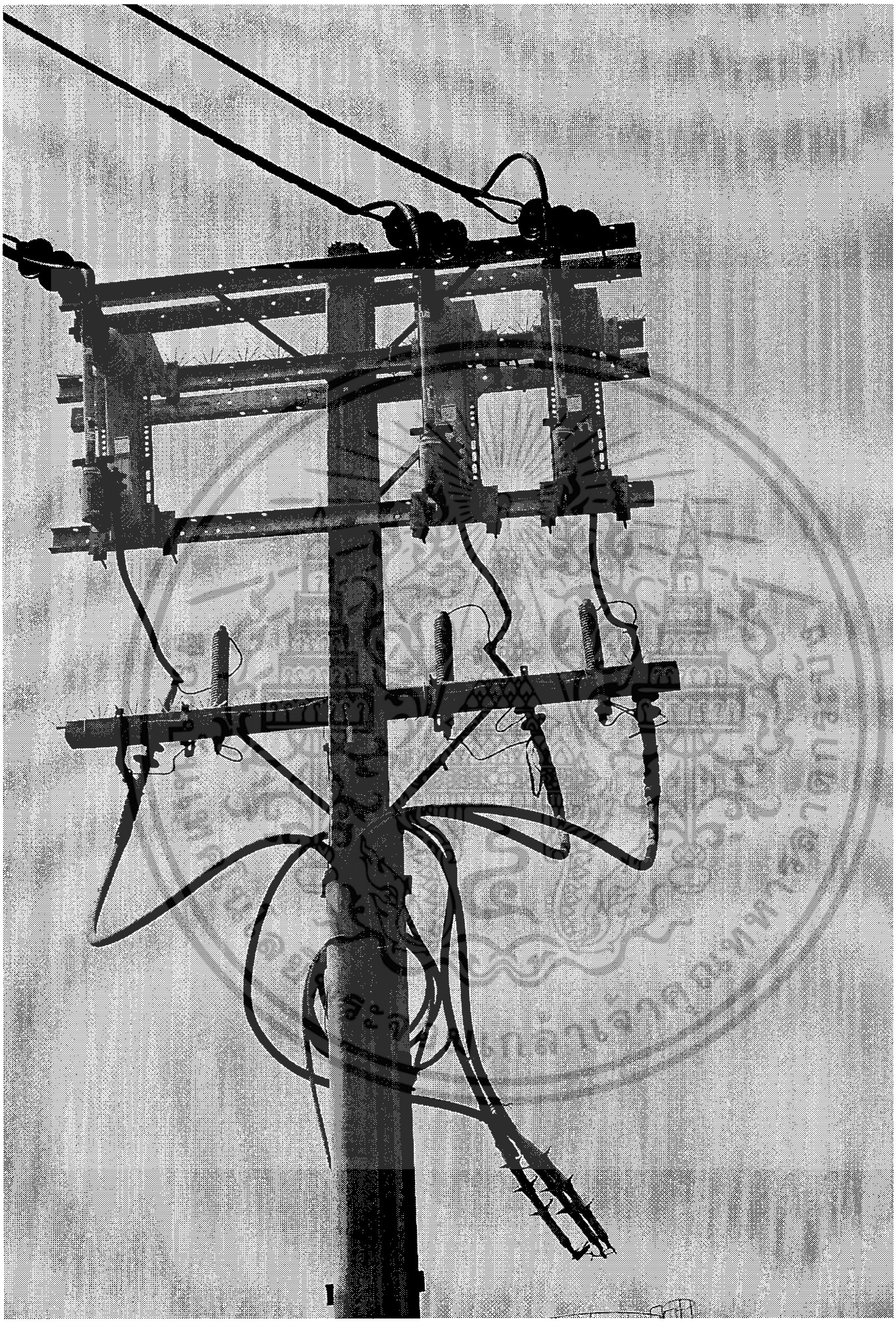
[ก]



[ข]

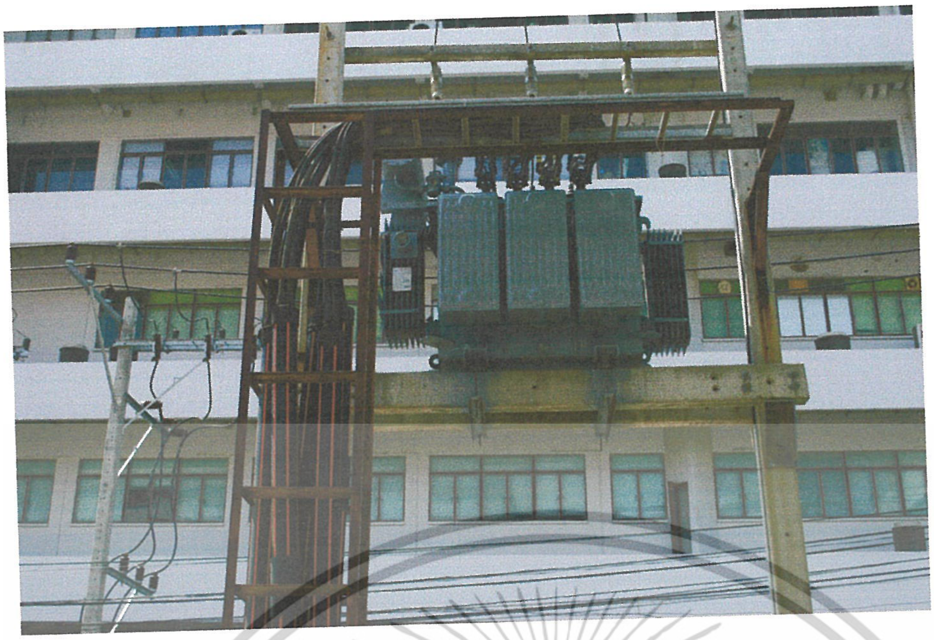
รูปที่ 5ง การใช้งานสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6ง การใช้งานสายเคเบิลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



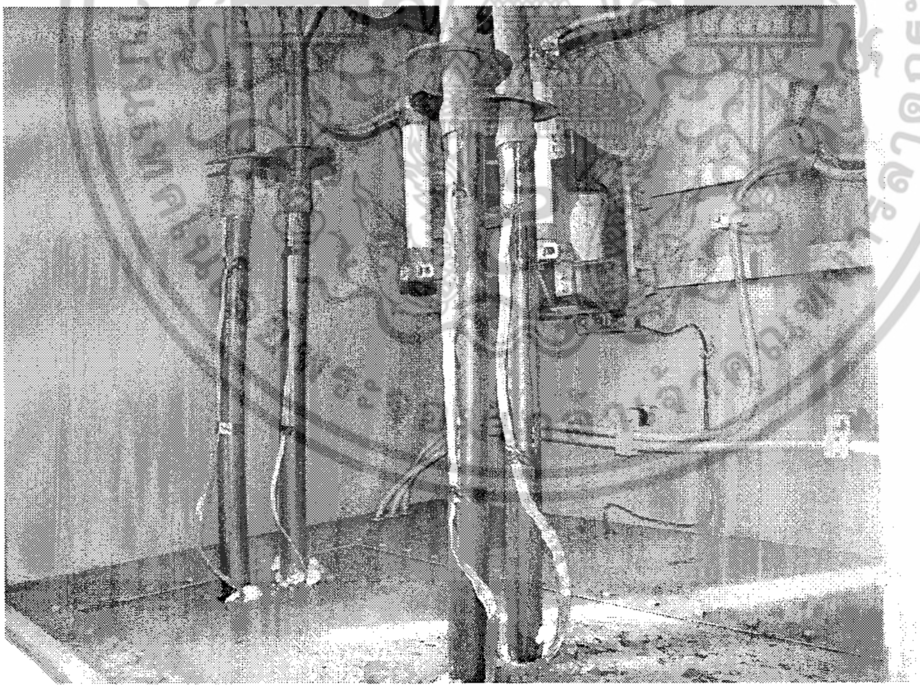
รูปที่ 7ง การใช้งานสายเคเบิลบริเวณคณะครุอุตสาหกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าฯลาดกระบัง

[ก]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

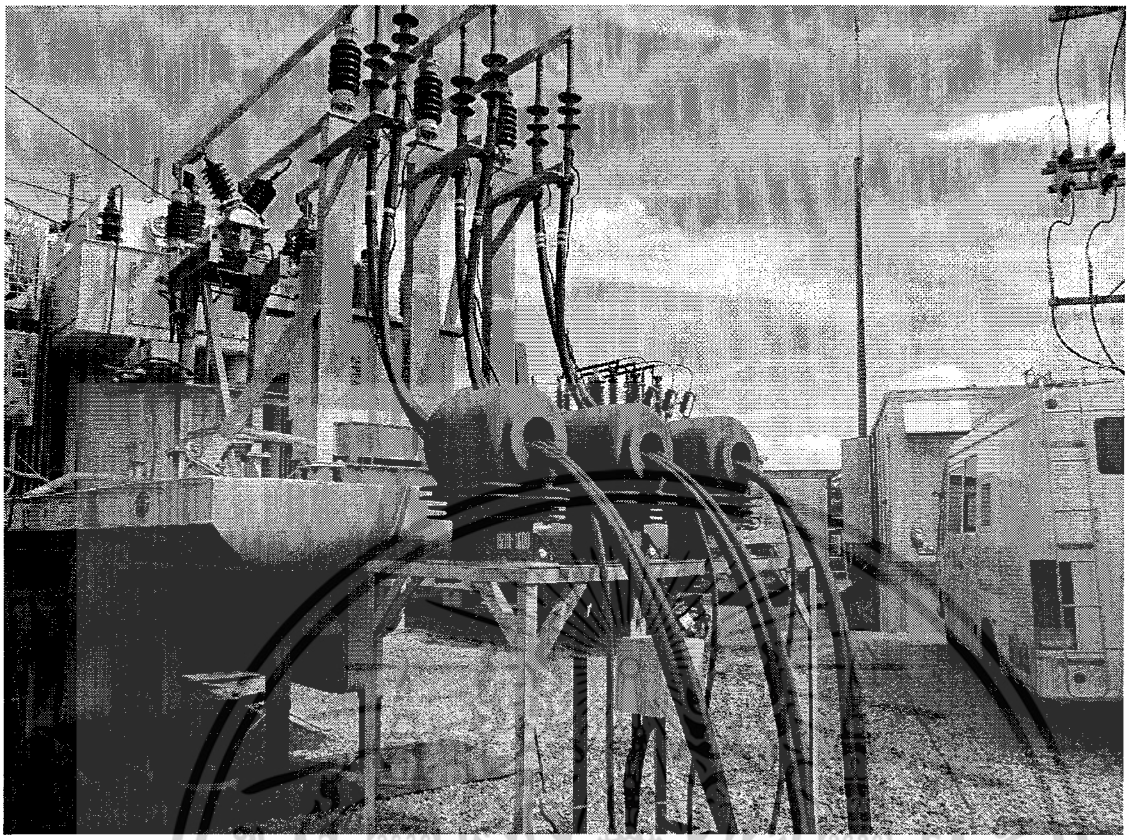
[ข]

รูปที่ 8ง การใช้งานสายเคเบิลบริเวณอำเภอมาบตาพุด จังหวัด ระยอง



รูปที่ 9ง การใช้งานสายเคเบิลใน Unit Substation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10ง การใช้งานสายเคเบิลในสถานีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นางสาวสุวพี ก้อนจันทร์เทศ เกิดวันที่ 22 มิถุนายน 2528 จังหวัดเชียงใหม่

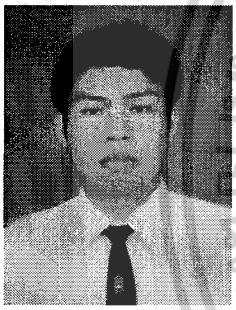
สำเร็จมัธยมศึกษาจากโรงเรียนดาราวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ฯ ในปี พ.ศ.2548 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม COMSOL,Solid Work,Auto Cad, PSpice และ Microsoft office.

ทักษะทางภาษาต่างประเทศ คือ ภาษาอังกฤษ

ฝึกงานที่หน่วยงานวิศวกรรมอากาศยาน สนามบินสุวรรณภูมิ บริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) ระหว่างเดือนเมษายน ถึง พฤษภาคม พ.ศ.2551



นาย เสกสรรค์ แสนนิทา เกิดวันที่ 14 มิถุนายน 2529 จังหวัดน่าน

สำเร็จมัธยมศึกษาจากโรงเรียนปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ.2548 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม COMSOL,Solid Work,Auto CAD, PSpice และ Microsoft office.

ทักษะทางภาษาต่างประเทศ คือ ภาษาอังกฤษ

ฝึกงานที่หน่วยงาน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระหว่างเดือนเมษายน ถึง พฤษภาคม พ.ศ.2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้