

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน  
Calculating the Ampacity of Underground Cables



โดย  
นายทวี นำพาเจริญ  
นายคณวัศ แซ่โง้ว  
นายคณภูว เก่งวินิจ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 36995  
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2548

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542

การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน

Calculating the Ampacity of Underground Cables



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศุภี บรรจงจิตร

อ.ชาย ชมภูอินไหว

อ.เชาว์ ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน

ผู้จัดทำ

1. นายทวี นำพาเจริญ
2. นายคณวัศ แซ่โจ้ว
3. นายคตภวัฏ เก่งวินิจ

  
อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.สุที บรรจงจิตร)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.ชาย ชมภูอินไหว)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.เชาว์ ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน

นายกวี นำพาเจริญ

นายคนูวัต แซ่โจ้ว

นายคลงกู๋ เก็งวินิจ

รศ.ศุทธิ บรรจงจิตร

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ชาย ชมภูอินไหว

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.เชาว์ ชมภูอินไหว

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการคำนวณหาค่ากระแสที่ยอมรับได้ของสายเคเบิลใต้ดิน โดยอ้างอิงมาตรฐานของ IEC และการไฟฟ้านครหลวง แล้วนำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นภาษาเคลไฟ 4.0 หลักการทำงานของโปรแกรมจะทำการประมวลผลจากพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่เราป้อนเข้าไป ซึ่งเกี่ยวข้องกับภารกิจ เช่น ชนิดและขนาดของสายเคเบิล, ชนิดของการติดตั้ง, สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของวัสดุต่างๆ ของระบบ เป็นต้น โดยในส่วนของคำนวณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ พิจารณาเฉพาะแต่ละวงจร และพิจารณาทั้งระบบ เพื่อความเหมาะสมและความสะดวกในการใช้งาน

โปรแกรมนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกในการคำนวณหาค่ากระแสที่ยอมรับได้ของสายเคเบิลใต้ดิน เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบติดตั้งระบบสายเคเบิลใต้ดินได้อย่างเหมาะสม

## Calculating the Ampacity of Underground Cables

Kawee Numpachanroen

Danuwat Sac-ngow

Donpoo Kengvinij

Assc.Prof.Surce Bunjongjit      Advesor

Lecturer Chai Chompoo-inwai      Advesor

Lecturer Chow Chompoo-inwai      Advesor

1999

### Abstract

This project studies about calculating the ampacity of underground cables based on IEC and MEA standard, then writes computer program by Delphi Language version 4.0. The principle procedure of the program can compile parameters and variables of installation such as kind and size of cables, kind of installation, thermal resistivity of materials in the system etc. The computation is divided into two parts, separate circuit and multi-circuits, for appropriation and facilitation.

This application accommodates in calculating the ampacity of underground cables for use in designing a suitable installation of underground cable systems.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	I
1.1. ที่มาของปัญหา	I
1.2. วัตถุประสงค์	I
1.3. ขอบเขตงาน	I
1.4. ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ความรู้ทางด้านงานออกแบบระบบสายใต้ดิน	4
2.1. บทนำ	4
2.2. ระดับแรงดันของระบบสายไฟฟ้าใต้ดินของ กฟน.	4
2.3. ส่วนประกอบของระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground System Component)	6
2.4. การออกแบบระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน	26
2.5. การออกแบบต่อลงดินของสายชีท (Sheath Bonding)	30
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน	33
3.1. โครงสร้างสาย	33
3.2. ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น	33
3.3. การจำลอง โครงสร้างสายจากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	34
บทที่ 4 การคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน ระบบวงจรเดี่ยว (Separate Circuit)	37
4.1. บทนำ	37
4.2. สัญลักษณ์ต่างๆ (Symbols)	37
4.3. การคำนวณ	41
4.4. ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำ (A.C. Resistance of Conductor, R)	42
4.5. ค่าความสูญเสียในฉนวน (Dielectric loss, $W_d$ )	44
4.6. ค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียของชีทและสกรีน ( $\lambda_1$ )	45
4.7. ค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียของอาร์เมอร์, ส่วนที่เสริมความแข็งแรง (Reinforcement) และ ใปปีเหล็ก (Steel Pipes) ( $\lambda_2$ )	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8. ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิล ( $T_1, T_2, T_3$ )	50
4.9. ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกสายเคเบิล ( $T_4$ )	52
บทที่ 5 การคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน ระบบหลายวงจร (Multi-Circuits)	55
5.1. บทนำ	55
5.2. สัญลักษณ์ต่างๆ (Symbols)	55
5.3. การคำนวณ	56
บทที่ 6 การทำงานของ โปรแกรมและวิธีการใช้โปรแกรม	60
6.1. การทำงานของ โปรแกรม	60
6.2. วิธีการใช้โปรแกรม	60
บทที่ 7 การทดสอบ โปรแกรม	68
7.1. ผลการคำนวณ	68
7.2. การวิเคราะห์	77
บทที่ 8 บทสรุป	79
8.1. สรุปผล	79
8.2. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ	80
ภาคผนวก ก.	
ภาคผนวก ข.	
ภาคผนวก ค.	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

บทที่ 2	หน้า
รูปที่ 2.1 เฟล็กซิเบิล คอนรูเกต ไปป์ (Flexible Corrugated)	8
รูปที่ 2.2 (ก) ลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน โดยทั่วไป, (ข) ภาพถ่ายการก่อสร้างบ่อพักสายเคเบิล และ (ค) ภาพจำลองของบ่อพักสายเคเบิล	9
รูปที่ 2.3 (ก) อาร์ชอร์ โบลท์ (Anchor Bolt), (ข) กราวด์ ร็อด (Ground Rod), (ค) พูลลิ่ง ไอออน (Pulling Iron) และ (ง) ทางเข้าบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน (Manhole Entrance Step)	10
รูปที่ 2.4 ชนิดของบ่อพักโดยทั่วไป	11
รูปที่ 2.5 ชนิดของบ่อพักตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง (ก)ชนิด B, (ข)ชนิด L และ (ค)ชนิด T	12
รูปที่ 2.6 เคเบิลในจนวนก๊าซ (Gas Filled Cable)	13
รูปที่ 2.7 สายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) (ก) กระแสสลับ และ (ข) กระแสตรง	14
รูปที่ 2.8 สายแอเรียล เคเบิล (Aerial Cable)	14
รูปที่ 2.9 รูปจำลองของไปป์ ไทป์ เคเบิล (Pipe Type Cable)	15
รูปที่ 2.10 รูปแบบต่างๆ ของตัวนำ	17
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของสายเคเบิล ชนิด 1 แกน และ 3 แกนตามลำดับ	19
รูปที่ 2.12 การตัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน (Splice) (ก) วิธีต่อ และ(ข) ส่วนประกอบ	24
รูปที่ 2.13 หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน (Terminator)	24
รูปที่ 2.14 ไรเซอร์โพล (Riser Pole)	25
รูปที่ 2.15 เครื่องหมายแสดงเส้นทางเคเบิล (Cable Route Marker)	26
รูปที่ 2.16 การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แบบหล่อปูนหุ้มท่อ (Concrete Encased Duct Bank)และ (ข) แบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial)	29
รูปที่ 2.17 ชิงเกิล พอยท์ บอนด์ (Single Point Bond)	30
รูปที่ 2.18 ครอส บอนด์ (Cross bond) (ก) แบบไม่ทรานสโพสิชัน (not Transposition) และ (ข) แบบทรานสโพสิชัน (Transposition)	31
รูปที่ 2.19 โบท เอนด์ (Both End)	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1	33
รูปที่ 3.2	34
แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ	
แลดเดอร์ ไดอะแกรม (Ladder Diagram)	
สำหรับการคำนวณในภาวะคงที่	
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1	51
โมเดลของสายเคเบิลแบบเบสท์ (Belt) (ซ้าย)	
และแบบสกรีน (Screen) (ขวา)	
บทที่ 6	
รูปที่ 6.1	60
รูปที่ 6.2	61
รูปที่ 6.3	61
รูปที่ 6.4	62
รูปที่ 6.5	62
รูปที่ 6.6	63
รูปที่ 6.7	64
รูปที่ 6.8	64
รูปที่ 6.9	65
รูปที่ 6.10	66
รูปที่ 6.11	67
รูปที่ 6.12	67
แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงาน โปรแกรม	
ป้อนข้อมูลกรณีที่ตั้งแบบในคักเบงค์	
ป้อนข้อมูลกรณีที่ตั้งแบบฝังดิน โดยตรง	
การติดตั้งแบบในคักเบงค์	
การติดตั้งแบบฝังดิน โดยตรง	
ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 1 แกน 1 เส้น	
ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 1 แกน 3 เส้น แบบทรีฟอยล์	
ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 1 แกน 3 เส้น แบบเครเคิล	
ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 3 แกน	
รายละเอียดของข้อมูลทั้งหมดที่ป้อน	
ผลการคำนวณของกรณีแยกคิดแต่ละท่อ (Separate Circuit)	
ผลการคำนวณของกรณีคิดผลกระทบของทั้งระบบ (Multi-Circuits)	
บทที่ 7	
รูปที่ 7.1	68
รูปที่ 7.2	69
รูปที่ 7.3	70
รูปที่ 7.4	71
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและขนาดกระแส	
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการบอนด์แบบต่างๆและขนาดกระแส	
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการติดตั้งแบบต่างๆและขนาดกระแส	
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการวางสายเคเบิลแบบต่างๆและขนาดกระแส	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของขอบดักเบงก์ และขนาดของกระแส	72
รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างท่อในดักเบงก์ กับขนาดของกระแส	73
รูปที่ 7.7 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเคเบิลที่จุดต่างๆ ของดักเบงก์และขนาดกระแส (ข) ตำแหน่งของเคเบิลในดักเบงก์ 3x4	74
รูปที่ 7.8 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสของสายเคเบิลที่ติดตั้งในตำแหน่งริมและตำแหน่งกลางของดักเบงก์	75
รูปที่ 7.9 ตำแหน่งของเคเบิลในดักเบงก์ 4x6	77
ภาคผนวก ก.	
รูปที่ ก.1 แฟกเตอร์ทางเรขาคณิต (Geometric Factor, G) สำหรับสายเคเบิลแบบเบลดท์ (Belted Cable) ชนิด 3 แกนที่มีตัวนำเป็นแบบกลม (Circular Conductor)	
รูปที่ ก.2 ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) สำหรับสายเคเบิลแบบสกรีน (Screened Cable) ชนิด 3 แกนที่มีตัวนำเป็นแบบกลม (Circular Conductor) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลที่ไม่มีสกรีน (Unscreened Cable)	
ภาคผนวก ค.	
รูปที่ ค.1 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณแบบระบบวงจรเดี่ยว (Separate Circuit)	
รูปที่ ค.2 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณแบบระบบหลายวงจร (Multi-Circuits)	

## สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 1	
ตารางที่ 1.1	2
ตารางที่ 1.2	3
บทที่ 2	
ตารางที่ 2.1	7
บทที่ 7	
ตาราง 7.1	72
ตาราง 7.2	74
ตาราง 7.3	75
ตาราง 7.4	76
ตาราง 7.5	76
ภาคผนวก	
ตารางที่ ก.1	8
ตารางที่ ก.2	9
ตารางที่ ก.3	10
ตารางที่ ก.4	11
ตารางที่ ก.5	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.6 สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดินในประเทศต่างๆ  
(Thermal Resistivities of Materials)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1. ที่มาของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบันมีข้อจำกัดหลายอย่างในการจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยระบบสายอากาศ (Overhead System) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบใหม่ขึ้นทดแทน ซึ่งระบบนั้นก็คือ ระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground System) แต่ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งของระบบสายไฟฟ้าใต้ดินจะแพงกว่าระบบสายอากาศประมาณ 8 – 12 เท่า เราจึงศึกษาการคำนวณขนาดในกระแสสายเคเบิลใต้ดินเพื่อนำมาใช้ในการเลือกขนาดของสายเคเบิลใต้ดินให้เหมาะสมกับค่าของกระแส และวิธีการติดตั้งแบบต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในบางส่วนของระบบไฟฟ้าใต้ดินลงได้

#### 1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่ากระแสในสายเคเบิลใต้ดินเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการคำนวณได้
- 1.2.2. คำนวณหาค่ากระแสของระบบสายเคเบิลใต้ดินแบบต่างๆ ได้
- 1.2.3. สามารถประยุกต์โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณไปช่วยในการออกแบบได้
- 1.2.4. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดของกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของกระแสและค่าความสูญเสียต่างๆ เมื่อพารามิเตอร์เหล่านั้นเปลี่ยนไป

#### 1.3. ขอบเขตของงาน

ในเรื่อง การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน (Calculation Ampacity of Underground Cables) เราจะศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อขนาดกระแสของสายใต้ดิน แล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อนำมาคำนวณขนาดของกระแสในสายใต้ดินเพื่อให้ได้กระบวนการที่เชื่อถือได้และเหมาะสมที่สุด สำหรับการออกแบบจะเน้นในรูปแบบที่ใช้ในงานไฟฟ้าสาธารณูปโภคใต้ดินในประเทศไทย เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้า ชนิดของสายเคเบิล ลักษณะการติดตั้ง และอื่นๆ โดยจะคำนึงถึงขนาดกระแสในสภาวะปกติเท่านั้น และนำข้อมูลจากผู้ผลิตจริงในปัจจุบันมาใช้อ้างอิง มีการนำเสนอในรูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่เขียนด้วย โปรแกรม Borland Delphi4

#### 1.4. ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงาน

	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน
รวบรวมข้อมูล	←→	←→		←→
กำหนดขอบเขต ของงาน	←→			
ศึกษาข้อมูล	←→	←→		←→
ศึกษาโปรแกรม Delphi	←→	←→		
วิเคราะห์ข้อมูล		←→	←→	←→
เขียนฟลัวร์ชาร์ท ของโปรแกรม		←→		
เขียนโปรแกรม การคำนวณ			←→	
พัฒนาโปรแกรม				←→

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานในภาคเรียนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์
รวบรวมข้อมูล และศึกษาเพิ่มเติม	←	→		
วิเคราะห์ผลการ คำนวณ		←		→
พัฒนาโปรแกรม	←			→
จัดทำคู่มือการใช้ โปรแกรม			←	→
จัดทำปฏิญญา นิพนธ์		←		→

ตารางที่ 1.2 แสดงขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานในภาคเรียนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ความรู้ทางด้านงานออกแบบระบบสายใต้ดิน

#### 2.1. บทนำ

ในสภาวะปัจจุบัน สภาพภูมิทัศน์ และสภาพของพื้นที่ต่างๆ ยังมีข้อจำกัดมากยิ่งขึ้น ทำให้ เกิดอุปสรรคในการที่จ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบสายไฟฟ้าอากาศ (Overhead Cable System) ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าใหม่ โดยใช้ระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable System) แทน ซึ่งสาเหตุดังกล่าวนี้สามารถสรุปได้เป็นข้อๆ ดังนี้

- ก. เนื่องจากไม่มีเส้นทาง (Right of Way) เพียงพอ ที่จะทำการปักเสาและพาดสาย
- ข. ในบางพื้นที่ ต้องการความปลอดภัย เนื่องจากระบบสายไฟฟ้าอากาศนั้นมีสภาพ ทำให้เกิดอันตรายมากกว่า
- ค. ในบางพื้นที่ เช่น ย่านชุมชน หรือ แหล่งธุรกิจการท่องเที่ยว เมื่อมีระบบสายไฟฟ้าอากาศแล้วจะทำให้ทัศนียภาพไม่น่ามอง
- ง. ระบบสายไฟฟ้าใต้ดินมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของระบบสูงกว่าระบบสายไฟฟ้าอากาศมาก
- จ. เพื่อหลบทางคว้น สะพาน หรือระบบขนส่งมวลชน ในกรณีที่ไม่มียะห้วง (Clearance) เพียงพอที่จะให้ลอดหรือข้ามสิ่งดังกล่าวได้

#### 2.2. ระดับแรงดันของระบบสายไฟฟ้าใต้ดินของ กฟน.

ในปัจจุบันระดับของแรงดันทั้งสายป้อนและสายส่ง มีดังนี้

##### 2.2.1. ระบบ 12 kV

- เริ่มแรกใช้สายชนิด เปเปอร์ อินซูลेटเต็ด ลีด เคเบิล (Paper Insulated Lead Covered, PILC) ซึ่งใช้จ่ายไฟในเขตวงจรถาย (Secondary Network Area) ขนาดสายที่ใช้ 500 MCM, 350 MCM, 4/0 AWG, 2/0 AWG โดยสายขนาด 500 MCM และ 350 MCM เป็นแบบแกนเดี่ยว (Single-core) ส่วนขนาด 4/0 AWG และ 2/0 AWG เป็นแบบ 3 แกน (Three-core) ส่วนการจ่ายไฟนอกเขตวงจรถายจะใช้สายขนาด 500 MCM เป็นสายป้อนที่ออกจากสถานีย่อย (Outgoing Feeder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต่อมาได้เปลี่ยนชนิดของสายไฟฟ้าใต้ดินมาเป็นแบบ โซลิดไดอิเล็กทริก (Solid Dielectric) ที่มีฉนวนทำมาจาก ครอส-ลิงค์ โพลีเอทรีน (Cross – Linked Polyethylene ,XLPE) โดยมีขนาดสาย 650 MCM, 500 MCM, 2/0 AWG และ 2 AWG เป็นแบบแกนเดี่ยว โดยสาย 650 MCM ใช้เป็นสายป้อนขาออก สำหรับการจ่ายไฟนอกเขตวงจรถาย และ ขนาดสาย 500 MCM ใช้เป็นสายป้อนขาออก สำหรับการจ่ายไฟในเขตวงจรถาย
- ประมาณปี 2526 ได้เปลี่ยนระบบของขนาดสายมาเป็นระบบ เมทริกซ์ (Metrix) ขนาดสายจึงเปลี่ยนจาก 650 MCM, 500 MCM, 2/0 AWG และ 2 AWG เป็น  $400 \text{ mm}^2$ ,  $240 \text{ mm}^2$ ,  $70 \text{ mm}^2$  และ  $35 \text{ mm}^2$  ตามลำดับ พร้อมกันนั้น ก็ได้เปลี่ยน มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) จาก ICEA มาเป็น IEC

#### 2.2.2. ระบบ 24 kV

- ใช้สายไฟฟ้าใต้ดินที่มีฉนวนทำมาจาก XLPE มีสายขนาด  $800 \text{ mm}^2$ , 650 MCM, 2/0 AWG และ 2 AWG โดยสายขนาด  $800 \text{ mm}^2$  ใช้เป็นสายป้อนขาเข้า (Incoming Feeder) ระหว่างหม้อแปลงกับสวิตช์เกียร์ (Switchgear) ทั้งกรณีที่สถานีย่อยที่จ่าย 12 kV และ 24 kV ส่วนสายขนาด 650 MCM ใช้เป็นสายป้อนขาออก สำหรับสถานีย่อยที่จ่าย 24 kV
- ต่อมาได้เปลี่ยนระบบของขนาดสายเป็นระบบเมทริกซ์ ดังนั้นขนาดสายจึงเปลี่ยนจาก 650 MCM, 2/0 AWG และ 2 AWG เป็น  $400 \text{ mm}^2$ ,  $70 \text{ mm}^2$  และ  $35 \text{ mm}^2$  ตามลำดับ

#### 2.2.3. ระบบ 69 kV

- ใช้สายไฟฟ้าใต้ดินที่มีฉนวนทำมาจาก XLPE มีสายขนาด  $800 \text{ mm}^2$  และ  $500 \text{ mm}^2$

#### 2.2.4. ระบบ 115 kV

- ในระยะแรกๆ สายที่ใช้ฉนวนน้ำมัน (Oil-Filled Cable) ขนาด  $800 \text{ mm}^2$  วางอยู่ในเคเบิ้ล เทรินช์ (Cable Trench)
- ต่อมาเปลี่ยนเป็นสายชนิดที่มีฉนวนเป็น XLPE ขนาด  $800 \text{ mm}^2$

### 2.2.5. ระบบ 230 kV

- เป็นสายชนิดสายเคเบิลในน้ำมัน ซึ่งได้มีการติดตั้งเป็นครั้งแรกจากสถานีดับทางบางกะปิไปยังสถานีดับทางชิดลม จำนวน 2 วงจร ระยะทางประมาณ 8 km สายที่ใช้ ขนาด  $800 \text{ mm}^2$  วางอยู่ใน รังเคเบิล (Cable Trough) และสายขนาด  $1200 \text{ mm}^2$  วางอยู่ในท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (Ducts or Duct Bank)

## 2.3. ส่วนประกอบของระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground System Component)

- ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน
- บ่อพักท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (Manhole or Handhole)
- สายไฟฟ้าใต้ดิน
- ตัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน (Splice)
- หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน (Terminator)
- ไรเซอร์โพล (Riser Pole)

### 2.3.1. ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

มีลักษณะเป็นท่อกดภายในกลวง วัสดุที่ใช้ทำมาจากไฟเบอร์ (Fiber), คอนกรีต (Concrete), แอสเบสทอส ซิเมนต์ (Asbestos Cement, A/C), โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE), ฯลฯ ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้ใน กฟน. มีหลายประเภทเป็นท่อ HDPE ,ท่อ A/C ,ท่อเหล็ก (Rigid Steel) ,ท่อโพลีไวนิล คลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) (ปัจจุบันเลิกใช้แล้วเนื่องจากไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ) แต่ที่ใช้ส่วนใหญ่จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ A/C และ HDPE

ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ดี ควรจะกันน้ำได้ และไม่เกิดปฏิกิริยาทั้งทางเคมีและทางไฟฟ้าซึ่งคุณสมบัติท่อชนิดต่างๆ สามารถแสดงได้ ดังตาราง

	ไฟเบอร์	แอสเบสตอส ซีเมนต์	คอนกรีต	เหล็ก
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสายเคเบิล	0.25-0.3	0.4-0.6	0.35-0.55	0.55
ความทนทานต่อการผุกร่อน	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ดี
การทนทานต่อกระแสอาร์ค	ปานกลาง	ดีมาก	ดีมาก	ดี
การชดเชยทางความร้อน	ปานกลาง	ดี	ดี	ดีมาก
ข้อดี	น้ำหนักเบา	ทนทาน	ทนทาน	ยึดหยุ่นได้ และแข็งแรง
ข้อเสีย	เทอะทะ, ราคาแพง	เทอะทะ, ราคาแพง	หนัก	มีผลทางด้านสนามแม่เหล็ก

## ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างๆของท่อแต่ละชนิด

### 2.3.1.1. แอสเบสตอส ซีเมนต์ (Asbestos Cement .A/C)

เป็นท่อไร้ตะเข็บที่ผลิตขึ้นจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และใยหิน มีความยาวท่อละ 4.00 m โดยทั่วไปจะวางแล้วหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

ขนาดของท่อ ที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน คือ  $\phi 100$  mm,  $\phi 115$  mm,  $\phi 140$  mm (ภายในเขต มีแค่  $\phi 100$  mm และ  $\phi 115$  mm นอกจากของสายเคเบิล 69 kV) ซึ่งท่อขนาด  $\phi 140$  mm (ID) เป็นท่อที่กพน. ใช้มากที่สุด

ข้อดี ของท่อชนิดนี้ก็คือ ราคาถูกกว่าท่อชนิดอื่นๆ มีความทนทานต่อการผุกร่อน และสามารถระบายความร้อนได้ดีด้วย

ข้อเสีย ก็คือ มีโอกาสแตกหักง่ายกว่าท่อชนิดอื่น มีน้ำหนักมากกว่า

### 2.3.1.2. โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene .HDPE)

เป็นท่อโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) ซึ่งได้พัฒนาให้ทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ให้ดีมากยิ่งขึ้น ท่อ HDPE นี้ แบ่งออกเป็น 2 คลาส (Class) คือ คลาส I และ คลาส II

ข้อดี ของท่อชนิดนี้คือสามารถยึดหยุ่นและดัดโค้งได้ง่ายกว่า เพราะฉะนั้นเวลาวางมักจะวางโดยไม่ต้องมีคอนกรีตมาหุ้ม

ข้อเสีย ของท่อชนิดนี้คือมีราคาแพงกว่าท่อ A/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของท่อ HDPE ที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (OD) ตั้งแต่ 125 mm, 140 mm และ 160 mm ซึ่งขนาด 140 mm เป็นขนาดที่ กพน. ใช้กันมากที่สุด

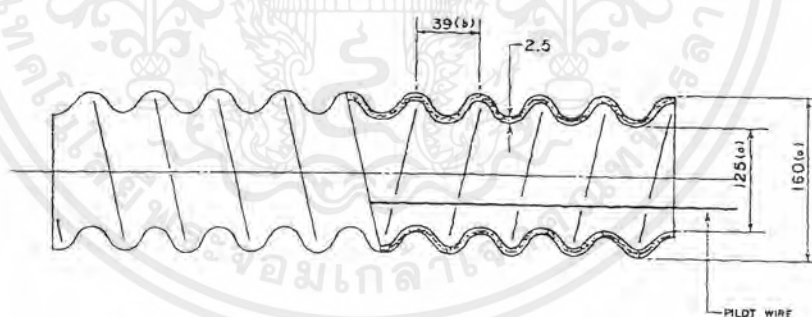
### 2.3.1.3. เฟล็กซีเบิ้ล คอนรูเกต ไปป์ (Flexible Corrugated Pipe)

เป็นท่อที่ทำมาจาก PE ชนิดแข็ง มีลักษณะเป็นลูกฟูก จึงสามารถโค้งงอได้ง่าย (Flexible) ดังนั้น ในการขนส่งจึงม้วนมาเป็นขด โดย 1 ขด จะมีความยาวประมาณ 50 หรือ 100 เมตร ดังรูปที่ 2.1

ข้อดี ของท่อชนิดนี้ก็คือ

- น้ำหนักเบากว่าท่อชนิดอื่น
- สามารถวางท่อที่มีความยาวมากกว่าท่อชนิดอื่นที่ใช้งานทั่วไป โดยมีตำแหน่งของการต่อท่อที่น้อยกว่า
- แรงเสียดทานในการร้อยสายเคเบิลน้อยกว่า
- หลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ง่าย

ข้อเสีย ของท่อชนิดนี้ก็คือ ราคาแพง การทำความสะอาดท่อลำบากกว่าท่อชนิดอื่น ขนาดของท่อคอนรูเกต ที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ตั้งแต่ 80 mm 100 mm 125 mm และ 150 mm ซึ่งขนาด 125 mm เป็นขนาดที่ กพน. ใช้มากที่สุด



รูปที่ 2.1 เฟล็กซีเบิ้ล คอนรูเกต ไปป์ (Flexible Corrugated Pipe)

### 2.3.1.4. ไฟเบอร์กลาส เรนฟอส อีพอกซี (Fiberglass Reinforced Epoxy, FRE):

เป็นท่อชนิดใหม่ ทำจากวัสดุใยแก้วหรือ ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) และเสริมด้วย สารอีพอกซี (Epoxy) อย่างดี มีความทนทานและอายุการใช้งานที่ยาวนานมาก

ขนาดของท่อ ที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน คือ 2 นิ้ว, 2.5 นิ้ว, 3.5 นิ้ว, 4 นิ้ว, 4.5 นิ้ว, 5 นิ้ว และ 6 นิ้ว ซึ่งท่อขนาด  $\phi 127$  mm (5 นิ้ว) เป็นท่อที่ กพน. ใช้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อดี

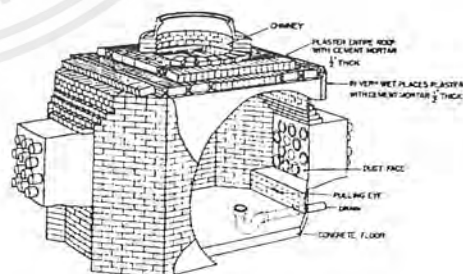
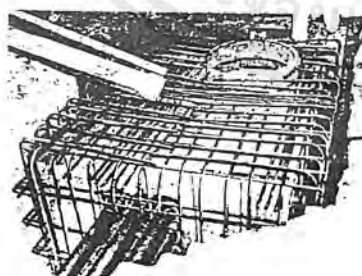
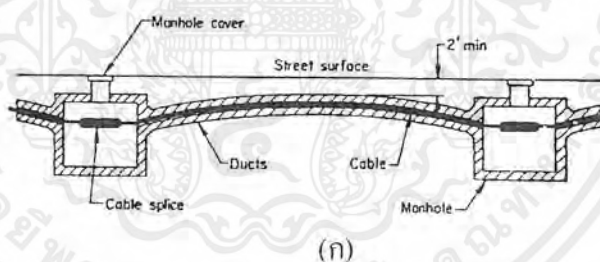
- น้ำหนักเบา
- มีความเหนียว แตกหักยาก ทนทานเป็นพิเศษ อายุการใช้งานนานกว่าท่อชนิดอื่นๆ
- สามารถโค้งงอ โค้งได้โดยใช้ความร้อน

### ข้อเสีย

- ราคาแพงมาก
- ระบายความร้อนได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับ Asbestos Cement

### 2.3.2. บ่อพักสายใต้ดิน

บ่อพักสายใต้ดิน เป็นชนิดคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งส่วนใหญ่จะก่อสร้างอยู่ใต้ผิวดิน ซึ่งมีการจราจรของยานพาหนะต่างๆ ซึ่งจะต้องรับน้ำหนักสูงสุดได้ 18 ตัน ผนังด้านนอกของบ่อพัก ส่วนบนต้องอยู่ใต้ระดับผิวดินไม่น้อยกว่า 40 cm บ่อพักจะมีฝาปิด (Manhole Frame and Cover) ทำด้วยเหล็ก ลักษณะของการจัดหน้าต่างของบ่อพักขึ้นอยู่กับการวางท่อที่จะออกจากบ่อพักนั้นๆ บ่อพักที่มีขนาดเล็กๆ เราสามารถจะหล่อสำเร็จรูป และยกลงมาวางในที่ที่จะติดตั้ง แต่ถ้าเป็นบ่อพักขนาดใหญ่จำเป็นต้องก่อสร้างในที่ที่จะใช้งานเพราะน้ำหนักมาก การติดตั้งและลักษณะของบ่อพัก สายในรูปที่ 2.2

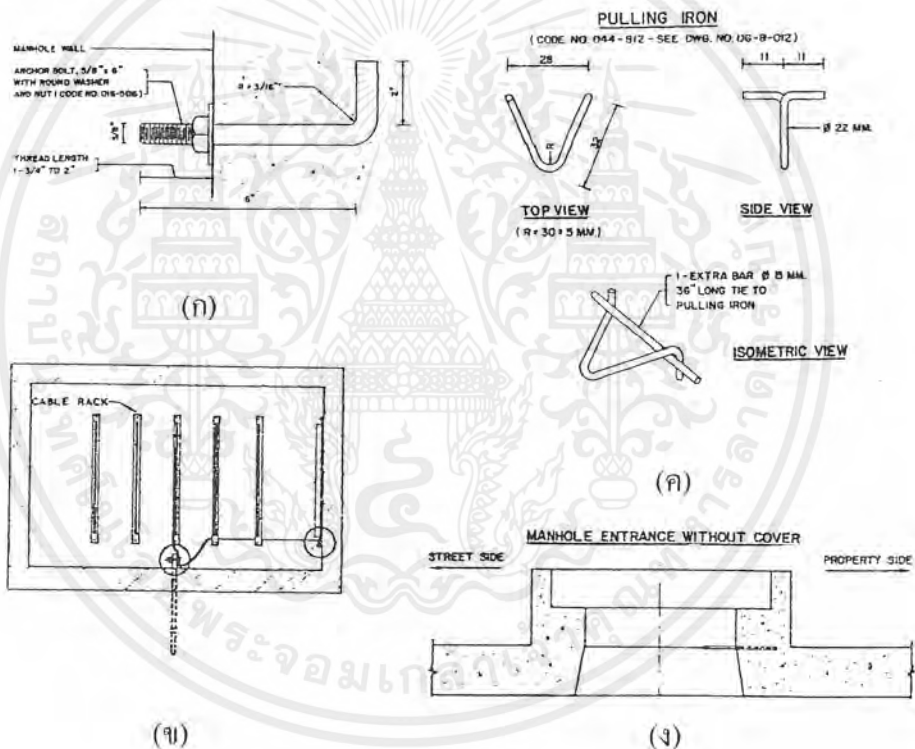


รูปที่ 2.2 (ก) ลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน โดยทั่วไป, (ข) ภาพถ่ายการก่อสร้างบ่อพักสายเคเบิล และ (ค) ภาพจำลองของบ่อพักสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการก่อสร้างตัวบ่อพัก มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- อาร์ชอร์ โบลท์ (Anchor Bolt) เป็นตัวยึดมีลักษณะและการติดตั้งดังรูปที่ 2.3 (ก)
- กราวด์ ร็อด (Ground Rod) เป็นตัวที่ใช้สำหรับท่อนของ ลงดินเพื่อลดอันตรายเนื่องจากสนามไฟฟ้า มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 (ข)
- พูล์ลิ่ง ไอออน (Pulling Iron) เป็นตัวช่วยในการลาก มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 (ค)
- ทางเข้าบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน (Manhole Entrance Step) เป็นตัวช่วยอำนวยความสะดวกในการลงไปปฏิบัติงานในบ่อพัก มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 (ง)
- ไดรเวอร์ ฮุค (Driver Hook) มีลักษณะเป็นตะขอติดอยู่บนเพดานบ่อ มีไว้อำนวยความสะดวกในขณะทำงาน



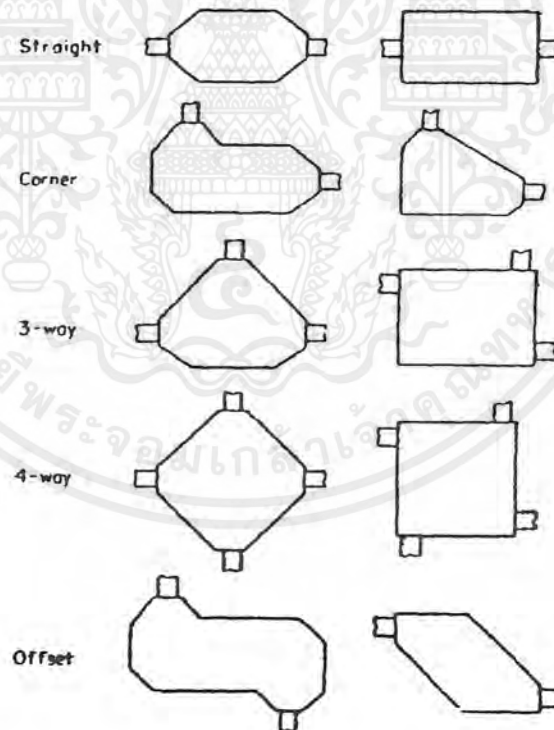
รูปที่ 2.3 (ก) อาร์ชอร์ โบลท์ (Anchor Bolt), (ข) กราวด์ ร็อด (Ground Rod), (ค) พูล์ลิ่ง ไอออน (Pulling Iron) และ (ง) ทางเข้าบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน (Manhole Entrance Step)

### 2.3.2.1. หน้าที่ของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

- ใช้วางและ จัดทำหัวต่อสายไฟฟ้า เนื่องจากไม่สามารถลากสายออกจากเคเบิลเทร็นช์ไปขึ้น ไรเซอร์ได้ (กรณีระยะทางตรงมากกว่า 150 เมตร)
- ใช้ในการทำระบบกราวด์(Grounding) สำหรับระบบสายป้อน (12,24 kV) และ ทำ ครอสบอนด์ (Cross – Bonding) สำหรับระบบสายส่ง (69,115,230 kV)
- ใช้ในการเปลี่ยนหรือแยกทิศทางของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (เช่นกรณีแยกขึ้น ไรเซอร์ หรือแยกไปเข้าชอยหรือถนน)
- เพื่อช่วยในการลากเคเบิลให้สะดวกมากยิ่งขึ้น

### 2.3.2.2. ชนิดของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

ชนิดของบ่อพักโดยทั่วไปจะมีสำหรับทางตรง (Straigh), สำหรับทางโค้ง (Corner), สำหรับ 3 ทาง (3-Way), สำหรับ 4 ทาง (4-Way) และสำหรับทางเฉียง (Offset) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ชนิดของบ่อพัก โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง สามารถจำแนกออกตามระดับของแรงดันได้ดังนี้

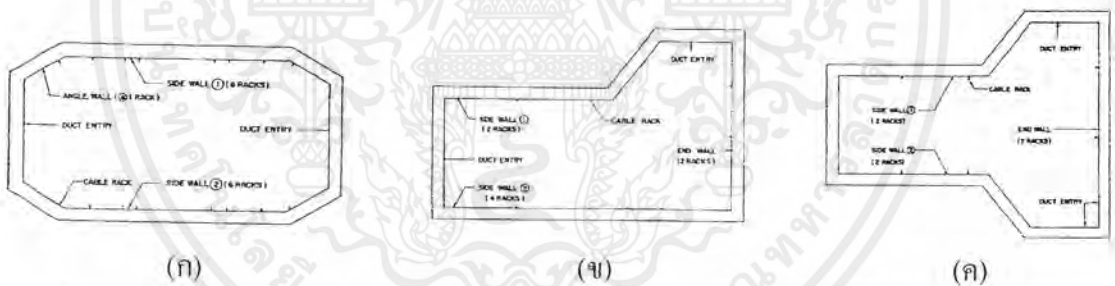
ก. ระดับแรงดัน 69 – 115 kV ประกอบด้วย บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน ชนิด A-4/1, A-4/2, B-3/1, B-3/1S\*, B-3/2, L-1/1, T-3/1 และ T-5/1

ข. ระดับแรงดัน 12 – 24 kV สามารถแยกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- แฮนด์โฮล (Handhole) ซึ่งประกอบด้วย ชนิด C, C-1, C-2/1 และ C-3sdh
- แมนโฮล (Manhole) ซึ่งประกอบด้วย ชนิด A-1/1, A-1/2, A-2/1, A-3/1, B-4/1, B-4/2, L-2/1, L-2/2 และ T-4/1

\*หมายเหตุ เป็นบ่อชนิดพิเศษซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะเช่น

- D (Deep) บ่อชนิดนี้จะมีคอบ่อลึกกว่าปกติ (ปกติ ประมาณ 65 ซม.)
- W (Wide) บ่อชนิดนี้จะมีควมกว้างกว่าปกติ
- H (Hide) บ่อชนิดนี้ตัวบ่อจะลึกกว่าปกติ



รูปที่ 2.5 ชนิดของบ่อพักตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง (ก)ชนิด B, (ข)ชนิด L และ (ค)ชนิด T

### 2.3.3. สายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable)

#### 2.3.3.1. ชนิดของสายเคเบิลใต้ดิน

สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- แบ่งตามชนิดของฉนวนที่ใช้
- แบ่งตามลักษณะการใช้งาน
- แบ่งตามจำนวนตัวนำ (Conductor) ที่มีอยู่ในเคเบิลแต่ละเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.1.1. แบ่งตามชนิดของฉนวนที่ใช้

- ก. โซลิดไดอิเล็กทริกเคเบิล (Solid Dielectric Cable) ได้แก่ สายที่มีฉนวนเป็นพวกนีโอพรีน (Neoprene) ,XLPE เป็นต้น
- ข. เคเบิลในฉนวนน้ำมัน (Oil Filled Cable) ได้แก่ สายที่มีฉนวนเป็นฉนวนน้ำมัน อาจจะอยู่ในรูปของกระดาศอบน้ำมัน เช่นพวก PILC , ฉนวนน้ำมันความดันต่ำ/กลาง/สูง (Low/Medium/High Pressure Oil Filled) ซึ่งอาจจะเป็นแบบ ไปป์ไทป์ (Pipe Type) หรือแบบ เซลฟ์ คอนเทนนิ่ง ไทป์ (Self Containing Type)
- ค. เคเบิลในฉนวนก๊าซ (Gas Filled Cable) ได้แก่สายที่มีฉนวนเป็นก๊าซเฉื่อย (Inert Gas) เช่น  $N_2$  , $SF_6$  แยกเป็น ฉนวนน้ำมันความดันต่ำ/กลาง/สูง เช่นเดียวกับพวกฉนวนน้ำมัน และแยกเป็น ไปป์ ไทป์ หรือ เซลฟ์ คอนเทนนิ่ง

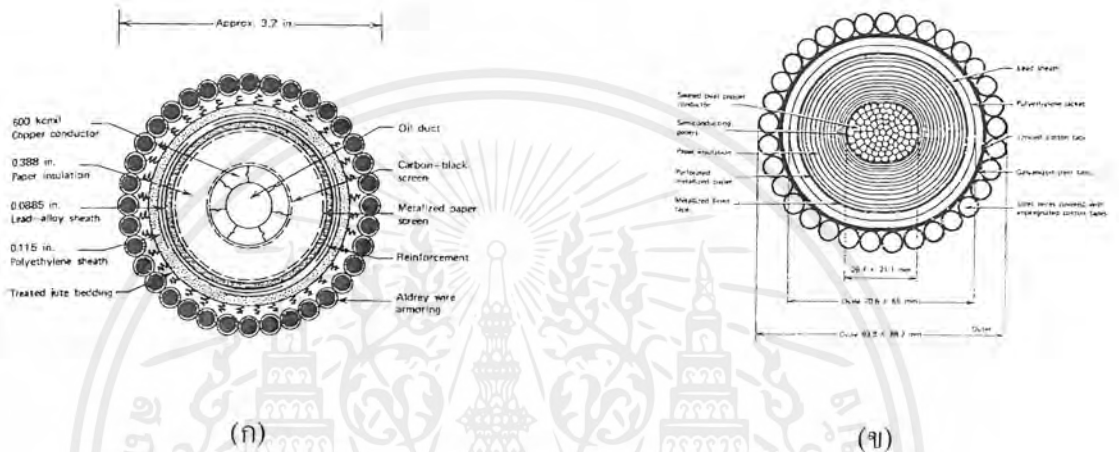


รูปที่ 2.6 เคเบิลในฉนวนก๊าซ (Gas Filled Cable)

### 2.3.3.1.2. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

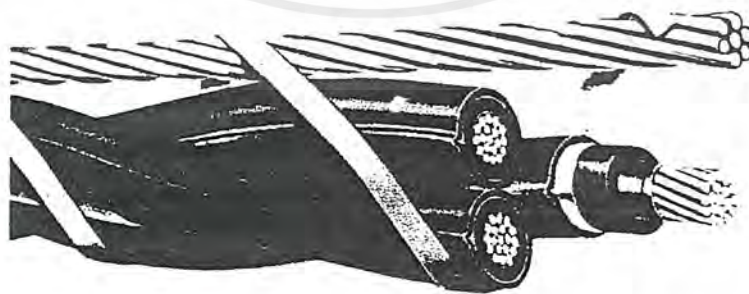
- ก. เคเบิลที่ฝังดินโดยตรง (Direct Buried Cable) เป็นสายพวกติดตั้งใต้ดิน โดยตรงเลย ตัวสายใต้ดินเองจะมีอาร์เมอร์ (Armour) เป็นการป้องกันทางกล (Mechanical Protection) หรืออาจจะใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Slab) เป็นเครื่องป้องกันในการติดตั้งไว้วางลงไปโดยไม่ต้องมีการดึงหรือลาก โครงสร้างสายจะผิwapleกไปบ้างหรือจะใช้สายแบบที่ใช้ลากก็ได้ การติดตั้งสายแบบนี้ข้อเสียคือการหาฟอลท์ (Fault) ยาก การแก้ไขซ่อมแซมมีค่าใช้จ่ายสูง
- ข. สายไฟใน ท่อ (Conduit) เป็นสายที่ใช้ติดตั้งอยู่ในท่อสำหรับร้อยสายในการติดตั้ง ต้องมีการดึงลาก โครงสร้างของสายต้องทนต่อการดึงลาก ข้อดีของการติดตั้งแบบนี้คือ การหาฟอลท์ง่าย ซ่อมง่ายกว่า มีโอกาสขยายระบบได้ง่าย แต่มีการลงทุนสูงมาก

ค. สายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) เป็นสายที่ใช้ติดตั้งใต้น้ำ ข้ามแม่น้ำ ข้ามช่องแคบในทะเล เป็นพวกสายที่มี อาร์เมอร์ ซึ่ง อาร์เมอร์ ต้องรับแรงดึงได้ และ ต้องทนต่อการถูกร่อน ดังรูปที่ 2.6 สายชนิดนี้จะมีชนิดช่วงสายยาวมาก ไม่นิยมม้วนมาในโรล (Roll) เพราะเวลาติดตั้งปลายสายด้านในโรล จะถอยออกมา จึงนิยมขดเป็นวงมาในรถ หรือเรือแทน แล้วนำไปติดตั้งเลย



รูปที่ 2.7 สายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) (ก) กระแสสลับ และ (ข) กระแสตรง

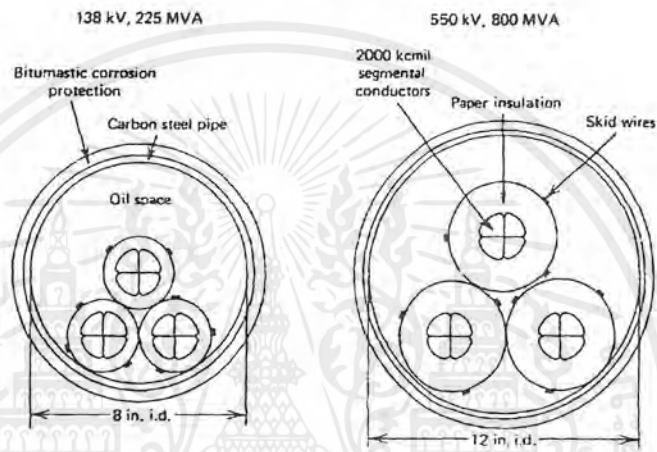
ง. แอเรียล เคเบิล (Aerial Cable) เป็นสายที่ใช้เดินแทนสายเปลือย ในกรณีที่มีปัญหาเกี่ยวกับระยะปลอดภัย ความสวยงาม อื่นๆ ซึ่งส่วนหนึ่งจะเดินไปกับ ทางเดินสาย (Messenger Wire) หรือมาผูกมัดกับทางเดินสาย ภายหลัง สายประเภทนี้จะต้องมีน้ำหนักเบา จึงมักเป็นพวกตัวนำอลูมิเนียม (Aluminum Conductor)



รูปที่ 2.8 สายแอเรียล เคเบิล (Aerial Cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จ. ไปป์ ไทพ์ เคเบิล เป็นสายพวงที่ต้องทำ เมทัลลิก ชีท (Metallic Sheath) หุ้มจึงเอา โลหะ (Metal) ที่จะทำชีท มาทำเป็นท่อและวางแทนท่อ(duct) การวางท่อและ เชื่อมต่อกันต้องทำอย่างดี โดยไม่ให้มีรอยรั่วเลย สามารถทนแรงดันและแรงอื่นๆ ได้ หลังจากนั้น ก็เอาสายที่มีฉนวนหุ้ม และ มีอินซูลेशन ชีลด์ ( Insulation Shield) ลากเข้าไป เมื่อเรียบร้อยก็จะเติม ฉนวนน้ำมันหรือก๊าซ เข้าไปและ ทำ ความดันให้ได้ความดันตามกำหนด



รูปที่ 2.9 รูปจำลองของไปป์ ไทพ์ เคเบิล (Pipe Type Cable)

#### 2.3.3.1.3. แบ่งตามจำนวนตัวนำ ที่มีอยู่ในเคเบิลแต่ละเส้น

- ก. เคเบิลแกนเดียว (1/C) หมายถึงสายเคเบิล ที่มีตัวนำ พร้อมฉนวน อยู่เพียง 1 เส้น และใช้เดินสายไฟได้เพียง 1 เฟส
- ข. เคเบิล 2 แกน (2/C) หมายถึงสายเคเบิล ที่มีตัวนำ พร้อมฉนวน อยู่ 2 เส้น และสามารถเดินสายไฟฟ้าสำหรับระบบไฟ 1 เฟส
- ค. เคเบิล 3 แกน (3/C) หมายถึงสายเคเบิล ที่มีตัวนำ พร้อมฉนวน อยู่ 3 เส้น และสามารถใช้งานในระบบไฟ 3 เฟสได้
- ง. เคเบิล 4 แกน (4/C) หรือมากกว่า ก็เช่นเดียวกับที่กล่าวมา โดยเฉพาะพวกมากกว่า ส่วนมากจะไม่ใช้งานในระบบส่งพลังงานไฟฟ้า แต่จะใช้งานเป็นสายควบคุม หรือสายสัญญาณ

### 2.3.3.2. โครงสร้างและส่วนประกอบของ สายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน (Underground Power Cable)

ส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับ สายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน ที่สำคัญมีดังนี้

#### 2.3.3.2.1. ตัวนำ

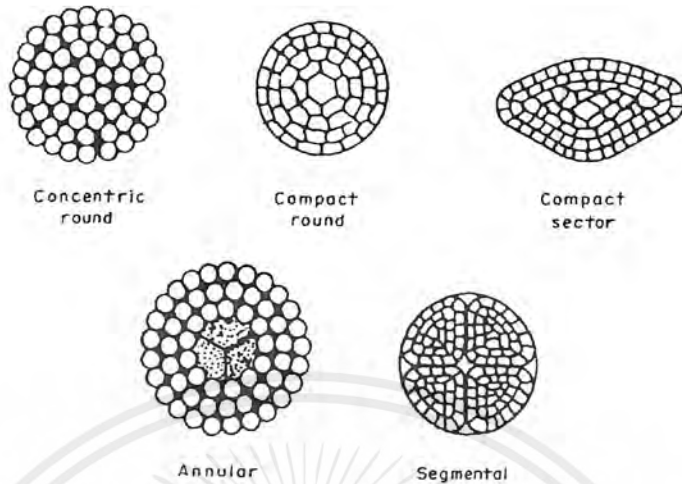
ในการส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ทั่วโลกมนุษย์ได้ใช้ธาตุสองชนิดเป็นตัวนำ คือทองแดง และอลูมิเนียม โดยในระยะเริ่มแรก ได้มีการใช้ทองแดงอย่างมาก จนถึงประมาณกว่าปีคริสต์ศักราชที่ 1960 จึงได้มีการพัฒนาอลูมิเนียมและได้นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้นจนกระทั่งทุกวันนี้

สำหรับ กพน. ประวัติการใช้ตัวนำเหมือนกับทั่วโลก คือระยะแรกใช้ทองแดงต่อมาได้ทำอลูมิเนียมมาเป็นตัวนำ โดยเริ่มในช่วงการเปลี่ยนแรงดันระบบจำหน่ายจาก 110 V เป็น 220 V ซึ่งได้เริ่มกระทำเมื่อต้นพุทธศตวรรษที่ 25 นับจนถึงปัจจุบัน (พ.ศ. 2527) กพน. ได้ใช้อลูมิเนียมกว่า 20 ปีแล้ว และกาลเวลาที่ได้พิสูจน์ว่า อลูมิเนียมสามารถใช้เป็นตัวนำได้ในสภาพแวดล้อมและมลภาวะในเขต กพน.

อย่างไรก็ตามการใช้อลูมิเนียมของ กพน. มีขีดจำกัด คือมีการใช้เฉพาะส่วนที่เป็นสายอากาศเท่านั้น ส่วนที่เป็นสายใต้ดิน หรือ เคเบิลและบัสบาร์ (Bus Bar) ที่สถานีย่อยยังคงใช้ทองแดงอยู่เนื่องจากเคเบิลและบัสบาร์เป็นส่วนน้อยของระบบ และมีความสำคัญ ดังนั้นจึงยังคงใช้ทองแดงอยู่ด้วย ความเชื่อที่ว่าทองแดงดีกว่าอลูมิเนียม

ในงานวิศวกรรมนั้นองค์ประกอบที่จะต้องพิจารณามีมากมาย ซึ่งได้แก่ ความปลอดภัย ราคาเหมาะสม (Economic) ความเชื่อถือได้ ความยืดหยุ่น (Flexibility) การใช้งาน (Operation) การก่อสร้าง การติดตั้งการบำรุงรักษา รายละเอียดข้อกำหนดการวิเคราะห์ ราคามาตรฐาน กำหนดเวลาการจัดหา มลภาวะ สภาพอันตราย การขยายในอนาคต ความสวยงาม (Aesthetic Consideration)

สำหรับลักษณะของตัวนำภายในสายเคเบิลนั้น อาจจะเป็นสายตัวนำเดี่ยว (Solid) หรือสายตีเกลียวหลายๆเส้น (Stranded) ซึ่งอาจจะเป็นเส้นกลมๆ หรืออาจจะเป็นเส้นที่ถูกบีบอัด (Compact) แล้วนำมาตีเกลียวก็ได้ดังรูปที่ 2.10 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายตีเกลียว



รูปที่ 2.10 รูปแบบต่างๆ ของตัวนำ

ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำจะเป็นตัวบ่งบอกถึงขนาดของสายเคเบิลแรงสูงนั้นๆ ซึ่ง ขนาดของสายไฟฟ้าใต้ดินที่ กฟน.ใช้จะมีขนาดตั้งแต่ 35, 70, 240, 400, 500, 800 mm<sup>2</sup> จนถึง 1200 mm<sup>2</sup> โดยสามารถจำแนกตามระดับของแรงดันได้ดังนี้

- แรงดัน 12 kV ใช้ สายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 35,70,240,400 mm<sup>2</sup>
- แรงดัน 24 kV ใช้ สายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 400,800 mm<sup>2</sup>
- แรงดัน 69 kV ใช้ สายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 500,800 mm<sup>2</sup>
- แรงดัน 115 kV ใช้ สายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 800 mm<sup>2</sup>
- แรงดัน 230 kV ใช้ สายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 800,1200 mm<sup>2</sup>

2.3.3.2.2. คอนดักเตอร์ สกรีน (Conductor Screen)

ส่วนมากจะทำด้วย สารกึ่งตัวนำ (Semi-Conduction Material) ซึ่งอาจจะเป็นเซมิ-คอนดักเตอร์ เทป (Semi-Conducting Tape) หรือ เอ็กซ์ทรูด เลเยอร์ (Extruded Layer) ของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) พร้อมสายตัวนำ มีหน้าที่ทำให้ผิวของตัวนำที่เป็น สายตัวนำเดี่ยวราบเรียบสม่ำเสมอ เสมือนเป็นผิวของทรงกลม (Sphere) เพื่อให้สนามไฟฟ้า (Electric Field) สม่ำเสมอทุกทิศทาง อีกทั้งยังเป็นตัวที่ช่วยลดความเครียดของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำและฉนวน

2.3.3.2.3. ฉนวน (Insulation)

เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายไฟฟ้าใต้ดินมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้พลังไฟฟ้ารั่วออกมาทำอันตรายต่อบุคคลหรือสภาพแวดล้อม และป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจร คุณค่าและคุณภาพของ

สายไฟฟ้าใต้ดินนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวนซึ่งคุณสมบัติของฉนวนที่ใช้นั้น จะต้องมิดังต่อไปนี้

- มีค่าไดอิเล็กทริก สเตร็งท์ (Dielectric Strength) สูง
- มีลักษณะเหนียว และยืดหยุ่นได้
- ไม่ดูดความชื้นจากอากาศหรือสิ่งแวดล้อม
- ทนต่ออุณหภูมิได้สูง
- ไม่ติดไฟ
- ไม่ทำปฏิกิริยาต่อกรดหรือด่าง

วัสดุที่ใช้ทำฉนวนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่ดีและเลวแตกต่างกันออกไป สำหรับระบบสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินของการไฟฟ้าานครหลวงในยุคแรกๆ จะใช้ฉนวนที่เป็น PILC ซึ่งใช้กระดาษชุบน้ำมันเป็นฉนวน แต่เนื่องจาก PILC มีค่าความผิดพลาด (Failure) สูง (เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้เคเบิล ยืดหรือหดตัว ทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ที่ฉนวน จึงเป็นสาเหตุให้เกิดฟลอทที่ใต้โดยง่าย) อีกทั้งยังใช้ต้นทุนการผลิตสูง

การต่อเคเบิลเสียค่าใช้จ่ายมาก รวมถึงได้มีการพัฒนาฉนวนแบบเดี่ยวย (Solid Type) จาก PE และ EPR จนถึง XLPE ซึ่งทำให้สามารถใช้งานเคเบิลในที่ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าเดิมได้ ( $>90^{\circ}\text{C}$ )

2.3.3.2.4. อินซูลेशन ชีลด์ (Insulation Shield) หรือ อินซูลेशन สกรีน (Insulation Screen)

วัสดุที่ใช้จะทำมาจากเซมิ-คอนดักเตอร์ เทป หรือชั้นของเอ็กซ์ทราดูด์ เซมิคอนดักติงคอมพาวด์ (Extrude Semiconducting Compound) หรือใช้ควบคู่กันไป ส่วนหน้าทีนั้น จะเหมือนกับหน้าที่ของคอนดักเตอร์ สกรีน

2.3.3.2.5. เมทัลลิก ชีลด์ (Metallic Shield)

เป็นส่วนที่ใช้ป้องกันสนามไฟฟ้า มิให้เกิดอันตรายต่อบุคคลหรือสิ่งแวดล้อมและป้องกันมิให้ไปรบกวนต่อระบบอื่นๆ โดยการทำให้ระบบกราวด์ของระบบไฟฟ้า (12.24 kV) อีกทั้งยังใช้ในการทำทรอสบอนด์สำหรับเคเบิลที่ใช้กับระดับแรงดัน 69 kV และ 115 kV เพื่อที่จะลด แรงดันเหนี่ยวนำ (Induced Voltage) ที่เกิดขึ้นในเมทัลลิก ชีลด์

เมทัลลิก ชีลด์ นี้จะมีทั้งแบบเมทัลลิก เทป (Metallic Tape) และแบบ เมทัลลิก ไวร์ (Metallic Wire) โดยวัสดุที่ใช้จะทำมาจากทองแดงซึ่งเคเบิลที่ กพ. ใช้นี้ปัจจุบันจะเป็นแบบ เมทัลลิก ไวร์ โดยเรียกว่า คอปเปอร์ ไวร์ สกรีน (Copper Wire Screen) หรือ คอปเปอร์ ไวร์ ชีลด์ (Copper Wire Shield)

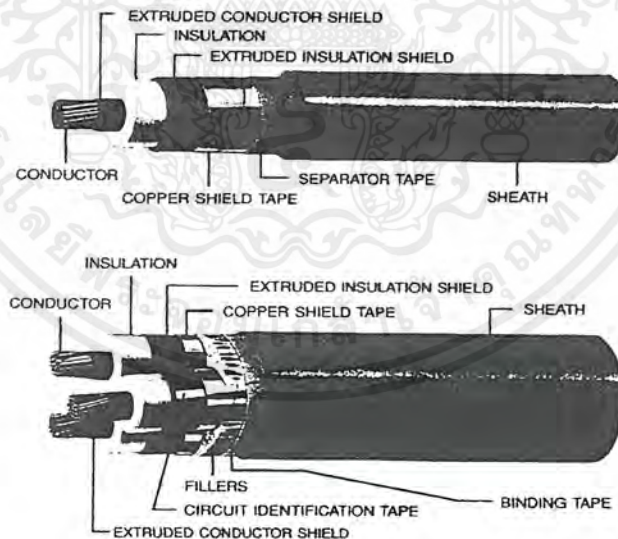
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2.6. นอน-เมทัลลิก ชีลด์ (Non-Metallic Shield)

ซึ่งสามารถแยกออกเป็นส่วนประกอบย่อยได้อีก 2 ส่วนคือ

- เซพเรเตอร์ เทป (Separator Tape) หรือ คูชั่น (Cushion) เป็นตัวป้องกันไม่ให้ส่วนที่เป็นโลหะไปทำให้เกิดรอบหรือสัมผัสโดยตรงกับส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งอาจจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ วัสดุที่ใช้โดยมากจะเป็นผ้าหรือ โยสังเคราะห์ หรือ เทป ของการสังเคราะห์ เช่น ไมลาร์ ,ไนลอน เป็นต้น
- แจ็คเก็ต (Jacket) คือส่วนส่วนที่หุ้มอยู่ด้านนอกสุด จะเป็นการป้องกันทางกลของเคเบิลทั้งในขณะที่ทำการติดตั้งและหลังการติดตั้ง วัสดุที่ใช้เป็นพวก PVC ต่อมาได้เปลี่ยนเป็น แบล็ค โพลีเอทรีน (Black PE) ซึ่งทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีกว่า

นอน-เมทัลลิก ชีลด์ นี้ อาจจะมีส่วนประกอบมากกว่า 2 ส่วนนี้ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตที่มองเห็นถึงปัญหาที่จะเกิดขึ้น เช่น อาจจะบรรจุชั้นของวัสดุที่ใช้ป้องกันน้ำซึม (Water Blocking) เข้าไปในเคเบิลอีกชั้นหนึ่ง โดยชั้นนี้จะมีลักษณะเป็นสารสังเคราะห์คล้ายเจลลี่ (Jelly) วางชั้นอยู่ระหว่าง อินซูลेशन ชีลด์ กับ เมทัลลิก ชีลด์ ซึ่งถ้าสารสังเคราะห์นี้ถูกน้ำมันจะพองตัวพร้อมกับปิดกั้นน้ำมิให้ซึมไปยังจุดอื่น



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของสายเคเบิล ชนิด 1 แกน และ 3 แกนตามลำดับ

### 2.3.3.3. การทดสอบสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน

การทดสอบเกี่ยวกับเรื่องต่างๆ ของเคเบิลมีอยู่มากมาย ตั้งแต่เกี่ยวกับ ระยะ (Dimension), วัสดุ (Material) ,โครงสร้าง ,การทดสอบสำหรับโรงงาน ซึ่งแต่ละองค์การ,แต่ละบริษัท, ได้กำหนดการทดสอบไว้มากมาย ที่สำคัญและใช้อยู่เป็นของ IPCEA (Insulated Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cable Engineer Association) AEIC (Association Of Edison Illuminating Companies) IES (International Electrotechical Commission) ซึ่งจะเขียนอธิบายและข้อกำหนดวิธีการทดสอบ ไว้โดยละเอียด รวมทั้งกำหนดค่าที่จะต้องให้ไว้ด้วย

สำหรับการทดสอบอาจจะเรียกได้เป็น 2 อย่าง

- การทดสอบประจำ (Routine Test)
- การทดสอบเพื่อการออกแบบ (Design Test)

#### 2.3.3.3.1. การทดสอบประจำ (Routine Test)

การทดสอบประจำได้แก่การทดสอบที่จะต้องดำเนินการทดสอบความยาวของเคเบิลไม่ใช้ตัดมาส่วนใดส่วนหนึ่ง หัวข้อในการทดสอบส่วนที่ดำเนินการที่โรงงาน ได้แก่ การทดสอบแรงดัน (Voltage Test) ต่างๆ เช่น การวัดค่าความต้านทาน (Resistance), การวัดค่าความต้านทานของฉนวน, คาปาซิแทนซ์ พาวเวอร์ แฟคเตอร์ (Capacitance Power Factor) และก็เป็นทดสอบเพียงให้ผ่านค่าที่กำหนดเท่านั้น หรือบางทีก็เรียกว่าการทดสอบโดยการพิสูจน์ (Proof Test) และบางรายการก็มาทำหลังจากการติดตั้งอีกด้วย

- ก. การทดสอบแรงดันแบ่งเป็นการทดสอบแรงดันระดับสูง (Power Voltage Test) ซึ่งความถี่ของแรงดันที่ใช้ทดสอบ (Power Frequency Voltage) ตามค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานรวมทั้งกำหนดเวลาด้วย (5 นาที) บางครั้งอาจจะใช้แรงดันกระแสตรงแทน โดยใช้ค่าเป็น 3 เท่า ของแรงดันกระแสสลับ และเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 15 นาที นอกจากนี้ยังมีการกำหนดว่าจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าครั้งละเท่าใด อย่างไร เริ่มจากเท่าใด ถึงค่าเท่าใด ในเวลาไม่เกินเท่าไร ส่วนการทดสอบ หลังจากการติดตั้งแล้วก็คล้ายๆ กับในโรงงาน แต่ค่าแรงดันของการทดสอบ จะต้องลดลงส่วนค่าอื่นๆ จะแตกต่างกันไป แต่ทั้งนี้ต้องเป็นไปตาม มาตรฐาน ที่องค์การหรือเจ้าของที่กำหนดไว้
- ข. การทดสอบไดอิเล็กทริก พาวเวอร์ แฟคเตอร์ (Dielectric Power Factor Test) เป็นการวัดค่า พาวเวอร์ แฟคเตอร์ (P.F.) ของฉนวน เพื่อจะเป็นการตรวจสอบแรงดันและความไม่บริสุทธิ์ (Impurity) ภายในสายเคเบิล โดยการวัดค่า P.F. ที่ค่าแรงดันต่างๆ ค่า P.F. ที่ได้จะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก การวัดกระทำโดยใช้เครื่องมือซึ่ง เซอริง บริดจ์ (Schering Bridge) วัด โดยการเทียบความจุไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard Capacitance) จะได้ค่าความจุไฟฟ้า ของสายมาจากค่าความจุไฟฟ้า นี้จะไปคำนวณหา  $\cos \theta$  ซึ่งเท่ากับ P.F. ของสาย

- ค. การทดสอบแบบอ็อนิเกเลียน (Ionigalion Test) เป็นการวัดในโรงงาน เพื่อให้ทราบค่าแรงดันในฉนวน วัดโดยชาร์จ เคเบิล (Charge Cable) ด้วยความถี่ แล้ววัดกระแสชาร์จจิ่ง (Charging Current) ด้วยเครื่องมือพิเศษ โดยต่อเข้าออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
- ง. การทดสอบความต้านทานของฉนวน (Insulation Resistance Test) โดยการวัดค่าความต้านทานต่อ 100 ft ของเคเบิล แต่ละรีล (Reel) นี้ ค่านี้จะต้องไม่ลดลงที่อุณหภูมิ 15.5 °C ถ้าลดลงแสดงว่าได้มีการเปลี่ยนแปลงและบกพร่องในการผลิต แล้วค่าความต้านทานหาจากการวัดด้วย กัลวานอมิเตอร์ชนิดตอบสนองไว (Sensitive Galvanometer) ร่วมกับค่าความต้านทานมาตรฐาน (Standard Resistance)
- จ. การทดสอบความต้านทานของตัวนำ (Conductor Resistance Test) การวัดค่าความต้านทาน โดยละเอียดของตัวนำ เพื่อที่จะได้ทราบว่าสายขาดหรือเปลาขนาดของหน้าตัดสายถูกต้อง โดยใช้ วิทสโตน บริดจ์ (Whetstone Bridge) หรือ เคลวิน บริดจ์ (Kelvin Bridge)
- 2.3.3.3.2. การทดสอบเพื่อการออกแบบ (Design Test)
- ก. การทดสอบแรงดัน-เวลา (Voltage - Time Test) เป็นการทดสอบความทนทานของฉนวน โดยการเร่งเวลาและค่าความเข้มทางไฟฟ้าเป็น 2 ระยะ เช่นที่ระยะแรก ความเครียดของแรงดันไฟฟ้า จำนวนหนึ่งเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พอระยะที่ 2 เพิ่มความเครียดให้สูงขึ้น และเพิ่มเวลามากขึ้น ทั้งนี้ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของสเปค (Spec) จากผลการทดลอง เราสามารถจะเอามาคำนวณอายุของสายเคเบิลนั้นๆ ได้
- ข. การทดสอบด้วยแรงดันเบรคดาวน์ (Voltage Break Down Test) การทดสอบ ด้วยความถี่ของแรงดันที่ใช้ทดสอบ เพิ่มไปให้สุดขึ้นจนสายชำรุด ทั้งนี้เพื่อจะได้ทราบค่า แฟคเตอร์ความปลอดภัย (Safety - Factor) เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบได้
- ค. การทดสอบด้วยแรงดันเบรคดาวน์แบบอิมพัลส์ (Voltage Break Down Impulse Test) เป็นการทดสอบ ด้วยสตีฟ เวฟ ฟรอนท์ เซิร์จ (Steep Wave Front Surge) 1.5/40 เพื่อในการทราบค่าแฟคเตอร์ความปลอดภัย เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบได้

- ง. การทดสอบด้วยโคโรนาและโอโซน (Corona And Ozone Test) เพื่อทดสอบความทนทานของฉนวน ซึ่งมีต่อโอโซน ทดสอบโดยการปล่อยฉนวนไว้ในบรรยากาศของโอโซนเวลาหนึ่ง หรือจะทดสอบโดยการกระตุ้น (Energize) ตัวอย่างสายจะเกิดปรากฏการณ์โคโรนา แล้วตรวจดู นับจำนวนรอยร้าว หรือรอยชำรุด
- จ. การทดสอบโดยการวัดความสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss Measurement Test) เนื่องจากความสูญเสียของฉนวนจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าไดอิเล็กทริกลดลง จึงต้องมีการวัดค่าความสูญเสียโดยการวัดค่า P.F. ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน (Operating Voltage) และอุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  และที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติอีกหลายค่า แล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลง และต้องอ่านค่า P.F. อีก 4 ค่า เพื่อจะได้เท่าค่ามาใช้คำนวณในการออกแบบว่าควรจะออกแบบอย่างไรอุณหภูมิใช้งานจึงจะไม่สูงจนเป็นอันตราย
- ฉ. การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Test) เป็นการทดสอบเพื่อจะได้ยืนยันว่าสายเคเบิลจะไม่เป็นอันตรายเมื่อลากผ่านโค้ง อาจจะเป็นการโค้งกลับมาก็ได้ การทดสอบทำโดยเอาสายเคเบิลมาโค้งตามข้อกำหนด บนแบบที่มีมิติ (Diameter) เป็น 3 เท่า 4 เท่า 10 เท่า 16 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของสายเคเบิลต้องโค้งไปและโค้งกลับ แล้วนำมาทำ การทดสอบแรงดันเบรคความถี่ของมิติของสายเคเบิล (Diameter Cable Voltage Break Down Test) หรือการตรวจสอบอื่นๆ
- ช. การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Integrity Test) เป็นการตรวจสอบความถูกต้องอื่นๆ เช่น วัดความหนา ของส่วนประกอบทั้งหมด ,คุณภาพส่วนประกอบ ,รายละเอียดของฉนวน, พื้นที่หน้าตัด , น้ำหนัก, ความบริสุทธิ์
- นอกจากนี้ยังมี การทดสอบโดยใช้ความดัน (Pressure Test), การทดสอบด้วยแรงดึง (Tensile Test), การทดสอบด้วยความเค้นเฉือน (Shearing Test), การทดสอบปรากฏการณ์ออกซิเดชัน (Oxidation Test) เป็นต้น

#### การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

- ใช้เพราะเป็นการคุ้นเคยมาแต่เก่าก่อน จึงมีประวัติอยู่มาก
- ใช้เพื่อทราบว่า ของจริงใช้ได้หรือไม่ได้ ไม่ต้องการข้อมูล
- ใช้ทดสอบผลผลิต โดยผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ทดสอบวัสดุ และ โครโน
- ใช้ทดสอบในกรณีที่ต้องการ การสั่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. Vibration)
- เครื่องทดสอบมีขนาดใหญ่ และ ราคาสูง

#### การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

- ใช้ทดสอบในกรณีที่ต้องการข้อมูลมาพิจารณาด้วย
- การทดสอบเพื่อต้องการทราบสภาพ ทำนายอนาคต
- ใช้ทดสอบในกรณีที่ต้องการตัวเลขมาคำนวณ มาทำกราฟ
- เครื่องทดสอบมีขนาดเล็ก ราคาถูก
- ในการทดสอบ เมื่อเบรคความไม่รุนแรง ไม่เสียหาย
- มีอันตรายหลังจากปลดสวิตช์เพราะแรงดัน อาจเกิดขึ้น (Build Up) ได้สูงมาก
- ในการทดสอบ ใช้เวลาดำเนินการจนเสร็จ นาน

#### **2.3.4. ตัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน (Splice)**

ตัวต่อของระบบสายไฟฟ้าแรงสูง ใต้ดินเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้เคเบิล การออกแบบจะต้องมีการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น โดยจะคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่ออุปกรณ์ที่จะนำมาเป็นหัวต่อของสายไฟฟ้าแรงสูง ใต้ดินควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ

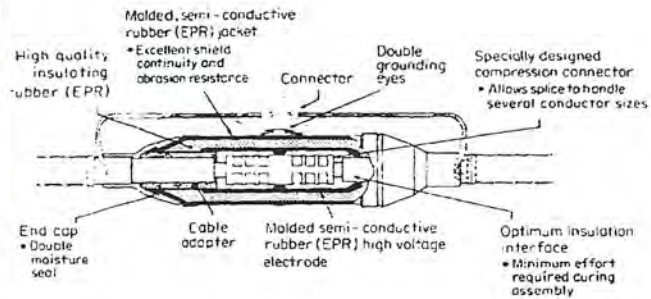
- มีไดอิเล็กทริก สเตร็งท์ สูง
- มีไดอิเล็กทริก พาวเวอร์ แฟกเตอร์ ต่ำ
- ง่ายต่อการจัดหา การผลิต และการต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน

อุปกรณ์เหล่านี้ไม่เพียงแต่จะทนต่อการทดสอบเพียงเวลาสั้นๆ เท่านั้น จะต้องสามารถทนและใช้งานได้ตลอดไป ในทางอุดมคติแล้ว หัวต่อของสายเคเบิลแรงสูงนี้ควรมีคุณสมบัติทางกล การยึดหยุ่น ใกล้เคียงกับเคเบิล ซึ่งจุดประสงค์ของอุปกรณ์เหล่านี้มีไว้เพื่อ

- ต่อหัวตัวนำของเคเบิลเข้าด้วยกัน
- ทำหน้าที่แทนฉนวนของสาย
- ควบคุมความเครียดของแรงดัน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
- ป้องกันกลไกของระบบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.12 การต่อสายไฟฟ้าได้คิน (Splice) (ก) วิธีต่อ และ(ข) ส่วนประกอบ

### 2.3.5. หัวสายไฟฟ้าได้คิน (Terminator)

ในระบบสายได้คินส่วนสำคัญอันหนึ่งของระบบก็คือหัวสายไฟฟ้าได้คิน หรือ พอทเฮด (Pot Head) ส่วนมากจะติดตั้งอยู่บนเสาที่เรียกว่าโรเตอร์โพล หรืออยู่ในแผงควบคุมในสถานีย่อย หรืออยู่บนเสาหม้อแปลง ที่สวิตช์แรงสูง (High Volt Switch) และติดตั้งอยู่อีกหลายที่ที่ตามบริเวณที่เราต้องใช้สายเคเบิลไปสิ้นสุดลง เพื่อจะต่อเป็นสายอากาศไปหรือจุดประสงค์อื่น และปลายสายได้คินจะสิ้นสุดลงตรงนี้ ทำให้ชิลด์ของสายได้คินมาสิ้นสุดด้วย เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดในแนวรัศมี (Radial Stress) และ ความเครียดในแนวแกนตั้ง (Longitude Stress) ถ้าชิลด์ของสายได้คินไม่ขาด ความเครียดทั้งสองอย่างเหล่านี้ก็จะถูกควบคุมให้คงที่สม่ำเสมอ และมีค่าตามที่กำหนดให้ เมื่อชิลด์ของสายได้คินขาดลง ผลจากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดทั้งสอง ทำให้ฉนวนของเคเบิลตรงจุดที่ชิลด์ขาดนี้เสียหาย ดังนั้นเพื่อป้องกันการเสียหายอันนี้เราจึงจำเป็นต้องมีการทำการป้องกัน ซึ่งเรียกว่าการทำหัวสาย

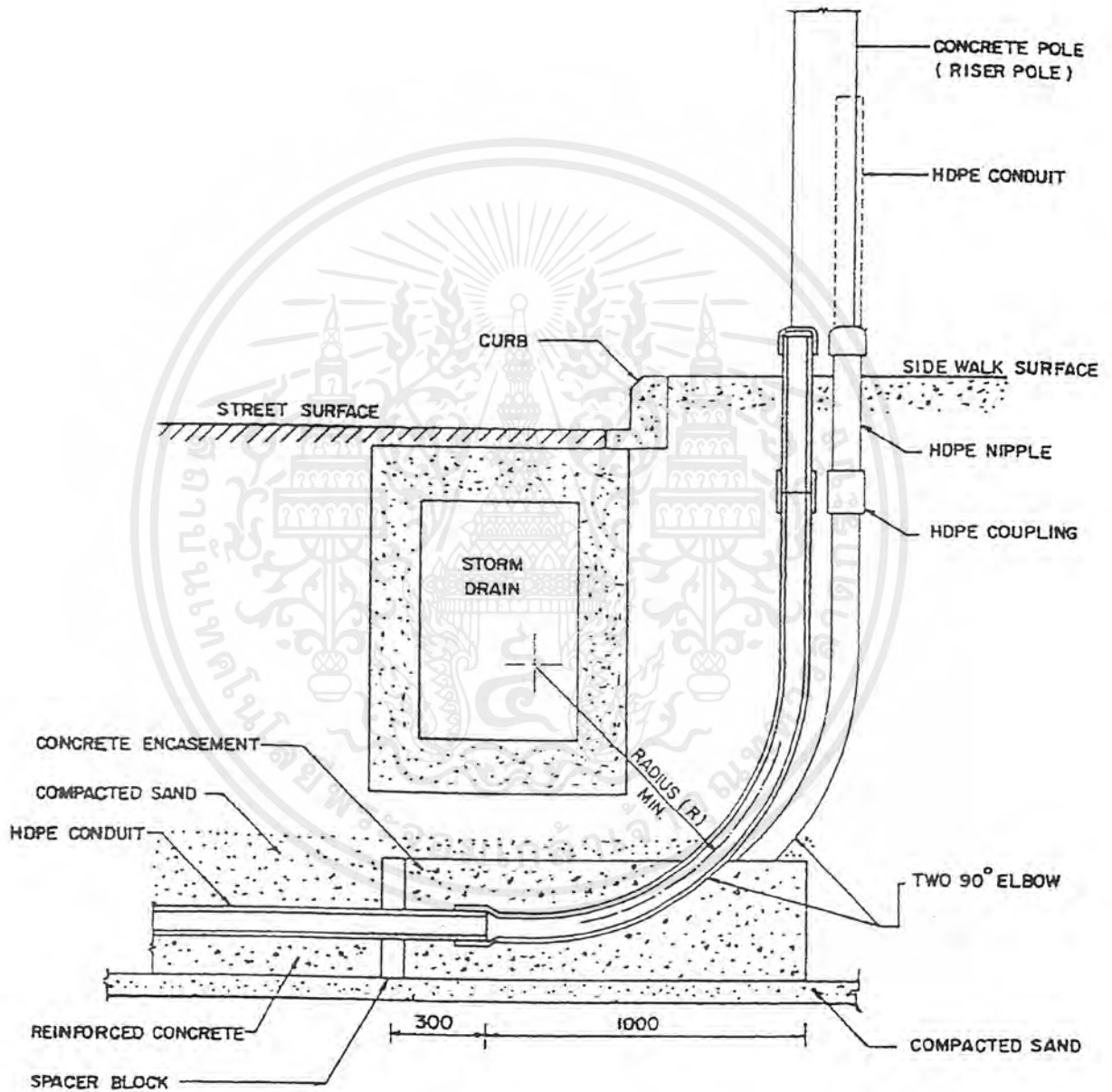


รูปที่ 2.13 หัวสายไฟฟ้าได้คิน (Terminator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6. ไรเซอร์โพล (Riser Pole)

ทางขึ้นของสายไฟฟ้าใต้ดินไปสู่สายอากาศ อาจเป็นชนิดพอท เฮด หรือเป็นหัวสายไฟฟ้าใต้ดินชนิดอื่น ซึ่งปัจจุบันทางการไฟฟ้าเลิกการใช้พอท เฮดแล้ว



รูปที่ 2.14 ไรเซอร์โพล (Riser Pole)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4. การออกแบบระบบสายไฟฟ้าใต้ดิน

การก่อสร้างระบบสายไฟฟ้าใต้ดินในปัจจุบันมีหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะมีค่าใช้จ่ายมากน้อยแตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นต้องพิจารณาออกแบบที่ใช้ในการก่อสร้างให้เหมาะสม และคุ้มค้ำกับค่าใช้จ่ายที่ได้ลงทุนไป ในปัจจุบันเราแบ่งแบบการก่อสร้างออกเป็น 3 ประเภท คือ

### 2.4.1. ประเภทหล่อปูนหุ้มท่อ (Concrete Encased Duct Bank)

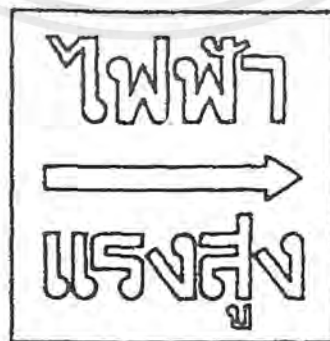
เป็นแบบการก่อสร้างเดิมของ กฟน. ที่ยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน ใช้กับงานก่อสร้างในระบบจำหน่าย และระบบส่ง ลักษณะการก่อสร้างเป็นแบบใช้ท่อแอสเบสตอส ซีเมนต์ แล้วหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นการป้องกันทางกลให้กับสายเคเบิลได้อย่างดี การก่อสร้าง ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินนี้จะต้องมีบ่อพักสาย เป็นระยะๆ สำหรับใช้ในการลากสาย ต่อสายต่อแยกสาย หรือในกรณีที่แนวเคเบิลหักมุม ซึ่งควรมี เครื่องหมายแสดงเส้นทางเคเบิล (Cable Route Marker) แสดงตามแนวท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินด้วยด้วย ดังแสดงตามรูปที่ 2.15

การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อดีดังนี้

- ความปลอดภัยเคเบิล สูงมาก
- จัดวางเคเบิลเป็นจำนวนมากๆ ได้ง่ายกว่า
- การบำรุงรักษาทำได้สะดวก

การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อเสียดังนี้

- ค่าใช้จ่ายสูงมาก
- ความสามารถในการระบายความร้อนต่ำ ทำให้น้ำกระแสได้ต่ำ
- ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างนานมาก
- การตัด โค้งเมื่อพบอุปสรรคทำได้ลำบากมาก (ต้องใช้ระยะทางยาว)



รูปที่ 2.15 เครื่องหมายแสดงเส้นทางเคเบิล (Cable Route Marker)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2. ประเภทกิ่งฝังดินโดยตรง (Semi-Direct Burial)

เป็นแบบการก่อสร้างแบบใหม่ ซึ่งใช้กับงานก่อสร้างระบบจำหน่ายและระบบส่ง โดยนำท่อนิวคลีอัม ซึ่งสามารถค้ำคองได้มาใช้คือ ท่อคอนกรีต ลักษณะการก่อสร้างจะใช้ ตัวบล็อกคอนกรีต (Concrete Spacer Block) บังคับท่อดังกล่าวเป็นระยะๆ เพื่อช่วยรักษาระยะห่างระหว่างท่อกับกัน การก่อสร้างชนิดนี้จะไม่มีการหุ้มท่อร้อยสายด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก ปิดด้านบนเป็นส่วนป้องกัน การก่อสร้างแบบนี้จำเป็นต้องมีบ่อพักสาย เช่นเดียวกับการก่อสร้างประเภทแรก และต้องมี เครื่องหมายแสดงเส้นทางเคเบิล แสดงตามแนวท่อร้อยสายด้วย

#### การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อดีดังนี้

- ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าแบบแรก
- ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าแบบแรก
- ความสามารถในการระบายความร้อนดีกว่าแบบแรก
- การตัดโค้งเมื่อพบอุปสรรค ทำได้ง่ายกว่าแบบแรก

#### การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อเสียดังนี้

- ความปลอดภัยของเคเบิลต่ำกว่าแบบแรก

### 2.4.3. ประเภทฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

เป็นแบบการวางสายเคเบิลให้มีความลึกตามมาตรฐาน โดยไม่ใช้ท่อร้อยสายและไม่มีการหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก มีแต่การวางแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก และแถบเตือนอันตราย (Warning Sign Strip) ใต้ดินเหนือแนวสายเคเบิล และบนพื้นดินจะมี เครื่องหมายแสดงเส้นทางเคเบิล แสดงให้ทราบแนวสายเคเบิลใต้ดินเพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษาภายหลัง นอกจากนี้ยังเป็นจุดสังเกตเพื่อไม่ให้หน่วยงานอื่นมาขุดเจาะบริเวณแนวสายเคเบิลอีกด้วย

#### การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อดีดังนี้

- ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- ความสามารถในการระบายความร้อนดีที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ) ฉะนั้นจะนำกระแสได้ดีที่สุด
- การตัดโค้งเมื่อพบอุปสรรคทำได้ง่ายที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)

#### การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อเสียดังนี้

- ความปลอดภัยของเคเบิลต่ำที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- การบำรุงรักษาทำได้ยากที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้แบบการก่อสร้างสายใต้ดินแบบฝังดินโดยตรง

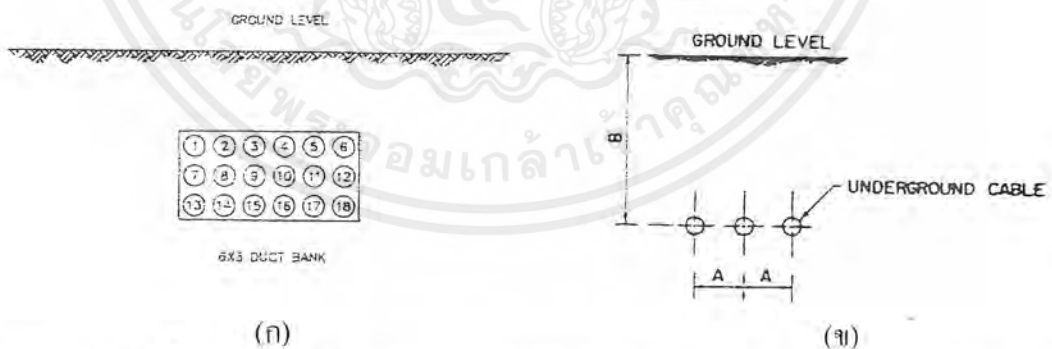
- ก. สภาพภูมิศาสตร์ในสถานที่ที่ก่อสร้าง เนื่องจากการก่อสร้างสายใต้ดินแบบฝังดิน โดยตรงนั้น จำเป็นต้องวางสายเคเบิลเป็นแนวยาวตลอด จึงจำเป็นต้องดำเนินการให้เสร็จอย่างรวดเร็ว โดยเลือกสถานที่ที่มีสภาพเนื้อดินแข็งพอควร เพื่อให้สามารถขุดเทร็นช์ เป็นแนวยาวได้โดยไม่ต้องปัก ชีท ไพล์ (Sheet Pile) อีกทั้งแนวของสายเคเบิลจะต้องมีมุมเบี่ยงเบนน้อย และมีจุดต่อแยกสายน้อยด้วย ทั้งนี้เพื่อลดจำนวนบ่อพักสาย นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องจักรกลที่ใช้ขุดดิน โดยการใช้รถขุด (Trencher) ซึ่งมีความสามารถในการเปิดหน้าดินได้ลึก และใช้พื้นที่ในการเปิดหน้าดินแคบ โดยขณะที่ทำการเปิดหน้าดินจะทำการวางสายเคเบิลและกลบเทร็นช์ ควบคู่กันไป จึงสามารถก่อสร้างสายใต้ดินอย่างรวดเร็ว
- ข. เนื่องจากสภาพใต้ดินของ กทม. โดยทั่วไปจะเปียกชื้นและบางแห่งอาจมีน้ำท่วมขัง นอกจากจะเป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้างแล้วยังอาจเกิดอันตรายจากกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินได้ โดยเฉพาะระบบจำหน่ายแรงต่ำของ กฟน. ซึ่งไม่มีเครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน
- ค. จำนวนวงจรเหมาะกับการก่อสร้างที่มีจำนวนวงจรมาน้อยเช่น 1 หรือ 2 วงจร ทั้งนี้เนื่องจากการก่อสร้างสายใต้ดินแบบฝังดิน โดยตรงไม่มีอุปกรณ์สำหรับจับยึดเลย และนอกจากนี้ส่วนใหญ่ เส้นทางเดินสายของการวางสายเคเบิลจะแคบ หากก่อสร้างหลายวงจรแล้ว เมื่อสายเคเบิลเกิดลัดวงจรทำให้สายเคเบิลใกล้เคียงเสียหายได้ นอกจากนี้เพื่อให้ระบบมีความน่าเชื่อถือที่คืออาจวางท่อสำรอง (Spare Duct) ไว้ข้างเคียง หากเกิดสายเคเบิลชำรุดจะสามารถลากสายเคเบิลทดแทนได้อย่างรวดเร็ว
- ง. สถานที่ในการก่อสร้าง เนื่องจากข้อเสียของการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบฝังดิน โดยตรงคือ ไม่มีการป้องกันอันตรายต่อสายเคเบิลอย่างเพียงพอ จึงควรเลิกใช้การก่อสร้างแบบนี้ในบริเวณชานเมืองหรือในบริเวณของผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งสามารถลดอันตรายที่อาจถูกขุดเจาะ โคนสายเคเบิล นอกจากนี้ควรมีเครื่องหมายแสดงเส้นทางเคเบิล เพื่อให้สามารถทราบแนวของการวางสายเคเบิลอีกด้วย
- จ. ระยะทางในการวางสายเคเบิล เนื่องจากการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบฝังดิน โดยตรงจำเป็นต้องมีจุดต่อแยกสายให้น้อยที่สุด เพื่อให้สามารถดำเนินการให้เสร็จอย่างรวดเร็ว จึงต้องวางสายเคเบิลให้เป็นแนวยาวต่อเนื่องกัน โดยตลอด และหาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการวางท่อสำรอง ไว้ข้างเคียงเพื่อให้ระบบมีความน่าเชื่อถือของระบบที่ติดตั้ง กล่าวในข้อ 2 แล้วนั้น ก็จะต้องพิจารณาถึงความยาวของท่อร้อยสายด้วย จะมีเพียงท่อพลาสติกเท่านั้นที่สามารถผลิตต่อเนื่องให้มีความยาวมากๆ ได้ จากการสอบถามผู้ผลิต บริษัท วิคส์ แอนด์ ซูดลัน ได้ข้อมูลดังนี้

- ท่อที่มีวนได้จะต้องเป็นท่อชนิด PNO (คลาส I ของ กฟน.) และ PN 10 (ใช้เป็นท่อประปา) และมีขนาดของท่อไม่เกิน 110 mm เท่านั้น
- โดยปกติจะม้วนได้ความยาวของท่อไม่เกิน 100 เมตร (สามารถขนส่งได้) หากต้องการความยาวท่อมักกว่าปกติจะต้องม้วนบน รัม (Drum) (ทำด้วยเหล็ก) ซึ่งจะมีวนได้ความยาวท่อถึง 200 เมตร แต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มในส่วนของ Drum และค่าขนส่ง

โดยสรุปแล้วเราสามารถเลือกใช้การก่อสร้างสายใต้ดินแบบฝังดินโดยตรงให้เหมาะสมกับปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งอาจจะมีโอกาสเลือกใช้ได้น้อยในสภาพภูมิศาสตร์ ของ กทม. แต่เรายังสามารถปรับปรุงแก้ไขส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการก่อสร้างสายใต้ดินแบบฝังดินโดยตรงนี้ได้ เช่น การติดตั้ง ตัวแสดงฟอลท์ (Fault Indicator) โดยอาจติดตั้งในระยะทางที่ใกล้ๆ กัน เพื่อให้สามารถหาจุดที่เกิดฟอลท์ได้ง่าย และในกรณีของสายเคเบิลอาจเพิ่มชั้นของส่วนที่เป็น โลหะหรือ ฟอยล์ (Foil) หุ้มรอบชีลด์ ของสายเคเบิลเพื่อป้องกันน้ำหรือความชื้นที่อาจเข้าไปในสายเคเบิล ในกรณีที่เปลือกนอกของสายเคเบิลได้รับความเสียหาย



รูปที่ 2.16 การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แบบหล่อปูนหุ้มท่อ (Concrete Encased Duct Bank) และ (ข) แบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

## 2.5. การออกแบบต่อลงดินของสายชีท (Sheath Bonding)

การนำส่วนที่เป็นชีท (Sheath) ของสายเคเบิล ลงกราวด์ (Ground) ที่บ่อพักสายไฟฟ้า ใต้ดิน (Manhole or Handhole) มีอยู่ 3 วิธี ได้แก่ ชิงเกิล พอยท์ บอนด์ (Single point Bond) , ครอส บอนด์ (Cross Bond) และ โบท เอ็นด์ (Both End) มีจุดประสงค์เพื่อ

- จำกัดแรงดันในชีทให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และปลอดภัยต่อการทำงาน
- ลดความสูญเสียในชีทเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) และ กระแส ครบวงจร (Circulating Current)
- เพื่อให้สายชีทสามารถรับหรือทนกระแสฟอลท์ (Fault), แรงดันทรานเซียน (Transient Voltage) และ สวิตชิง เซิร์จ (Switching surge) ได้

### 2.5.1. ชิงเกิล พอยท์ บอนด์ (Single Point Bond)

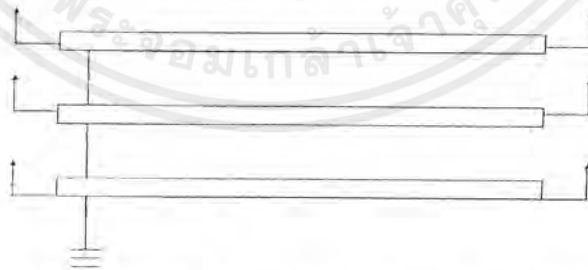
เป็นการนำปลายเคเบิลข้างหนึ่งต่อลงดิน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้ลอย

ข้อดี

- สะดวก
- ไม่มีกระแสครบวงจร (Circulating Current) มีเพียงกระแสไหลวน (Eddy Current) เท่านั้น

ข้อเสีย

- ทำได้เพียงระยะสั้น เพราะจะทำให้มีแรงดันที่ปลายสายมาก
- ปลายสายไม่ต่อชีทลงดิน



รูปที่ 2.17 ชิงเกิล พอยท์ บอนด์ (Single Point Bond)

2.5.2. ครอส บอนด์ (Cross bond)

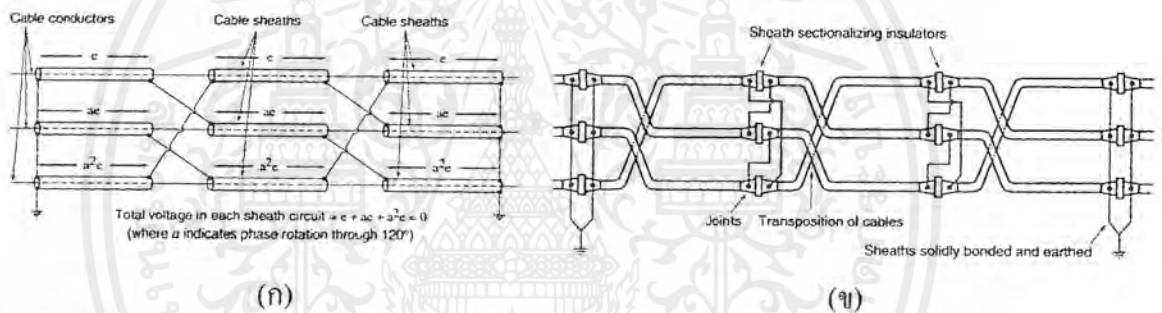
เป็นการแบ่งเคเบิลออกเป็น 3 ส่วน เท่าๆ กัน ปลายเคเบิลทั้ง 2 ข้างต่อลงดิน โดยที่ตรงกลาง 2 ช่วงให้ต่อสายชีทสลับเฟสตามลำดับ และไม่ต้องลงดิน

ข้อดี

- กระแสในชีท (Sheath) เท่ากับศูนย์
- ใช้กับสายส่งยาวได้

ข้อเสีย

- ต้องให้ 3 ช่วงใกล้เคียงกัน มิเช่นนั้นจะเกิดกระแสในชีท
- ใช้แรงงานมาก
- เกิดการสับสนในการเรียงเฟสของชีท ถ้าเรียงผิดพลาดจะทำให้กระแสในชีทสูง



รูปที่ 2.18 ครอส บอนด์ (Cross bond) (ก) แบบไม่ทรานสโพสิชัน ( not Transposition) และ (ข) แบบทรานสโพสิชัน (Transposition)

2.5.3. โบท เอนด์ (Both End)

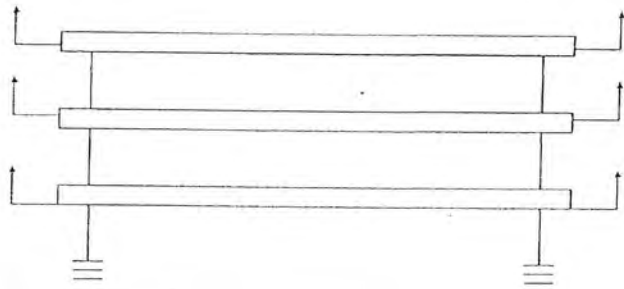
เป็นการนำชีททั้ง 3 เฟสต่อรวมกันแล้วลงดินทั้ง 2 ด้าน

ข้อดี

- ไม่มีกระแสไหลวน (Eddy Current )

ข้อเสีย

- แม้ว่าจะมีแรงดันในชีทเป็นศูนย์ แต่ มีกระแสครบวงจร (Circulating Current) ในชีทสูงมาก ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงวิธีนี้



รูปที่ 2.19 โบท เอนด์ (Both End)

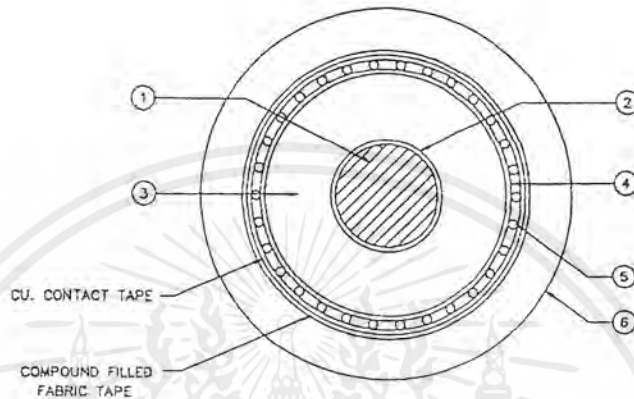


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎีพื้นฐาน

#### 3.1. โครงสร้างสาย



รูปที่ 3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ [ 1 คือ ตัวนำ (Conductor), 2 คือ คอนดักเตอร์ สกรีน (Conductor Screen), 3 คือ ฉนวน (Insulation), 4 คือ อินซูเลชัน สกรีน (Insulation Screen), 5 คือ คอปเปอร์ ไวร์ สกรีน (Cu. Wire Screen) และ 6 คือ แจ็คเก็ต (Jacket) ]

ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัวที่สำคัญได้แก่

- ก) จำนวนของสายเคเบิล และชนิดของการติดตั้ง
- ข) โครงสร้างของสายเคเบิล
- ค) ตัวกลางที่อยู่ล้อมรอบเคเบิล ณ บริเวณที่ติดตั้ง
- ง) ที่ตั้งของสายเคเบิล
- จ) การบอนด์ของสายเคเบิล

#### 3.2. ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น

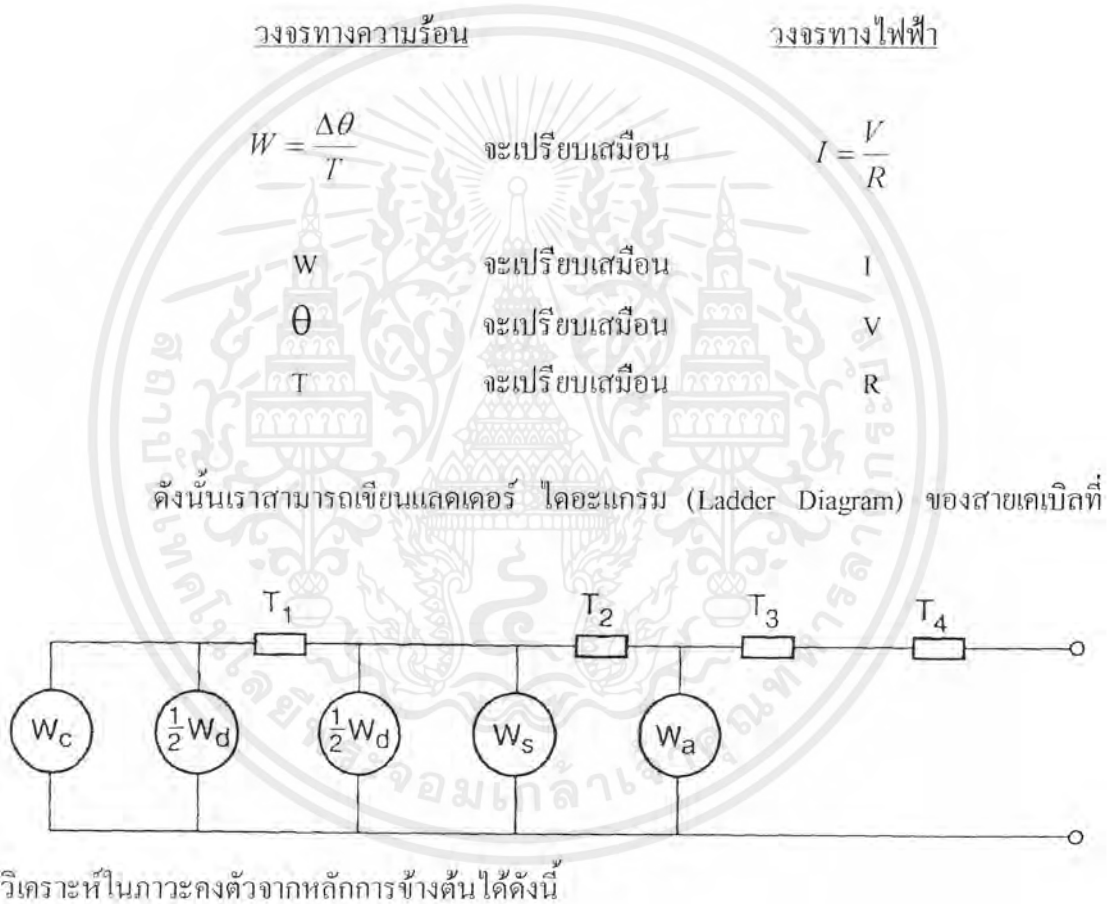
ในการวิเคราะห์ปัญหาของสายเคเบิล โดยใช้หลักการของสมการการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Equation) จาก [3] นั้นจะใช้ได้สำหรับสายเคเบิลที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีการติดตั้งแบบง่าย ๆ เท่านั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ขั้นสูงเราจะนำความคล้ายคลึงกันระหว่างวงจรทางไฟฟ้า (Electrical Circuit) กับวงจรทางความร้อน (Thermal Circuit) มาช่วยในการแก้ปัญหา โดยจะแทนสายเคเบิลด้วยกลุ่มพารามิเตอร์ (Lumped Parameter) วิธีนี้จะเริ่มต้น โดยแบ่งสายเคเบิลเป็น 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนคือความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) และ ความจุทางความร้อน (Thermal Capacitance) แต่ในการวิเคราะห์ที่ภาวะคงตัว (Steady-State) จะมีเพียงแค่ความต้านทานทางความร้อนเท่านั้น

### 3.3. การจำลองโครงสร้างสายจากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

จากความคล้ายคลึงกันระหว่างวงจรทางไฟฟ้ากับวงจรทางความร้อน เราจะได้ว่า



รูปที่ 3.2 แลดเดอร์ ไดอะแกรม (Ladder Diagram) สำหรับการคำนวณในภาวะคงที่

จะมีความสูญเสียเกิดขึ้นที่หลายตำแหน่งในระบบสายเคเบิล การไหลของความร้อนใน วงจรทางความร้อนดังที่แสดงในรูปจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ ดังนั้นความสูญเสีย (Joule Loss,  $W_p$ ) ในสายเคเบิล จะเขียนได้ดังนี้

$$W_l = W_c + W_s + W_a = W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (1)$$

โดยที่  $W_c$ ,  $W_s$  และ  $W_a$  เป็นความสูญเสียที่ตัวนำ, ซีท และอาร์เมอร์ ตามลำดับ ปริมาณ  $\lambda_1$  คือ แฟคเตอร์ความสูญเสียของซีท (Sheath Loss Factor) ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนของความสูญเสียทั้งหมดใน ซีทที่เป็นโลหะ (Metallic Sheath) ต่อความสูญเสียทั้งหมดของตัวนำ ทำนองเดียวกัน  $\lambda_2$  คือ แฟคเตอร์ความสูญเสียของอาร์เมอร์ (Armor Loss Factor) ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนของความสูญเสียทั้งหมดในอาร์เมอร์ที่เป็นโลหะ (Metallic Armor) ต่อความสูญเสียทั้งหมดของตัวนำ เพื่อความสะดวกจะแสดงการไหลของความร้อนทั้งหมดที่มีเหตุมาจากความสูญเสียพลังงานในสายเคเบิล อยู่ในพจน์ของความสูญเสียต่อเมตรของตัวนำ

การอ้างอิงนี้จากรูปที่ 3.2 และจากความคล้ายคลึง ของวงจรทางไฟฟ้าและความร้อน เราสามารถเขียนสมการสำหรับ  $\Delta\theta$  ซึ่งก็คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวนำเหนืออุณหภูมิแวดล้อมได้ ดังนี้

$$\Delta\theta = \left( W_c + \frac{1}{2} W_a \right) T_1 + [W_c(1 + \lambda_1) + W_a] n T_2 + [W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_a] n (T_3 + T_4) \quad (2)$$

ซึ่ง  $W_c$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  ได้กล่าวมาแล้วและ  $n$  คือจำนวนของตัวนำที่จ่ายโหลดในสายเคเบิล (ตัวนำมีขนาดเท่ากัน และจ่ายโหลดเท่ากัน)  $W_a$  แทนความสูญเสียของฉนวน (Dielectric Loss) อุณหภูมิแวดล้อมเป็นอุณหภูมิของตัวกลางที่อยู่รอบๆสายเคเบิลในสภาวะปกติ จากการรวมแหล่งกำเนิดความร้อนภายในที่ไม่ได้เพิ่มอุณหภูมิของสายเคเบิลข้างเคียงในทันที เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น  $T_1, T_2, T_3$  และ  $T_4$  เป็น ความต้านทานทางความร้อน ซึ่ง

- $T_1$  คือความต้านทานทางความร้อน ต่อหน่วยความยาวระหว่างตัวนำ และซีท
- $T_2$  คือความต้านทานทางความร้อน ต่อหน่วยความยาวของส่วนที่อยู่ระหว่างซีทและอาร์เมอร์
- $T_3$  คือความต้านทานทางความร้อน ต่อหน่วยความยาวของส่วนที่ห่อหุ้มภายนอกสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $T_4$  คือความต้านทานทางความร้อน ต่อหน่วยความยาวระหว่างผิวของสายเคเบิลกับตัวกลางที่อยู่ล้อมรอบ

พิกัดกระแสที่อนุญาตให้ใช้ได้จากสมการที่ (2) ซึ่ง  $W_c = I^2 R$

เราจะได้

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - Wd[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (3)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน

#### ระบบวงจรเดี่ยว (Separate Circuit)

##### 4.1. บทนำ

ในส่วนของการคำนวณนี้ โดยส่วนมากจะอ้างอิงมาจาก [2] ซึ่งถือว่าเป็นมาตรฐานอันหนึ่งที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย แม้แต่ทางการไฟฟ้านครหลวงเองก็ใช้มาตรฐานนี้ด้วย แต่ก็มีส่วนที่อ้างอิงมาจาก [3] (ซึ่งอ้างอิงมาจาก [2] และ บทความ [1] โดยได้ปรับปรุงให้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น)

สูตรที่จะใช้นั้นมีความสำคัญมากในการออกแบบซึ่งเราจะเป็นผู้เลือกพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ โดยจะแบ่งได้ 3 กลุ่มดังนี้

- ก. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของสายเคเบิล เช่น สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistivity) ของฉนวน
- ข. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสถานะแวดล้อม ซึ่งการเลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับสถานที่ที่ใช้งานว่าอยู่ที่ใดและประเทศใด
- ค. พารามิเตอร์ที่มาจากข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตกับผู้ใช้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ

##### 4.2. สัญลักษณ์ต่างๆ (Symbols)

สัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลตาม[2] มีดังนี้

$C$	=	ค่าความจุต่อแกนของตัวนำในสายเคเบิล (F / m)
$D_a'$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอาร์เมอร์ (mm)
$D_d$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (mm)
$D_c$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเคเบิล หรือเส้นผ่าศูนย์กลางของกลุ่มของ แกน (mm)
$D_1$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของฉนวน (mm)
$D_o$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของท่อ (mm)
$D_s$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของชีท (Sheath) (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G	=	ค่าแฟคเตอร์ทางเรขาคณิต (Geometric Factor) สำหรับสายเคเบิลแบบเบลท์ (Belted Cable)
I	=	ค่ากระแสในตัวนำ (rms value) (A)
K	=	ค่า แฟคเตอร์ของการสกรีน (Screening Factor) สำหรับสายเคเบิลแบบสกรีน (Screened Cable)
L	=	ระยะจากผิวดินถึงกึ่งกลางของสายเคเบิล (mm)
$L_G$	=	ระยะความลึกจากผิวดินถึงกึ่งกลางดักเบงค์ (Duct Bank) (mm)
N	=	จำนวนสายเคเบิลที่รับภาระทางไฟฟ้าในดักเบงค์
P	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้คำนวณในหัวข้อ 4.6.1.1
Q	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้คำนวณในหัวข้อ 4.6.1.1
R	=	ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำ ณ อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )
$R_S$	=	ความต้านทานของฉนวน หรือสกรีน ต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล ณ อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )
$R'$	=	ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )
$R_0$	=	ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ ( $\Omega / m$ )
S	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ( $mm^2$ )
$T_1$	=	ความต้านทานทางความร้อนระหว่างตัวนำกับ ฉนวน (K.m / w)
$T_2$	=	ความต้านทานความร้อนระหว่างฉนวน และอาร์เมอร์ (K.m / w)
$T_3$	=	ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก (K.m / w)
$T_4$	=	ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกสายเคเบิล (K.m / w)
$T_4'$	=	ความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อ (K.m / w)
$T_4''$	=	ความต้านทานทางความร้อนของท่อ (K.m / w)
$T_4'''$	=	ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกท่อ (K.m / w)
$U_0$	=	ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำกับสกรีน หรือฉนวน
U	=	ค่าคงที่ที่ใช้ในหัวข้อ 4.9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V$	=	ค่าคงที่ที่ใช้ในหัวข้อ 4.9.1
$W_d$	=	ค่าความสูญเสียในฉนวน (Dielectric loss) ต่อหน่วยความยาว สำหรับฉนวนที่ล้อมรอบตัวนำ (W / m)
$X$	=	ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ต่อหน่วยความยาวของ ซีท หรือ สกรีน ต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล ( $\Omega / m$ )
$X_m$	=	ค่ารีแอกแตนซ์ร่วม (Mutual Reactance) ต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลระหว่างซีทของสายเส้นนอก และตัวนำของสายอีก 2 เส้น ( $\Omega / m$ )
$Y$	=	ค่าคงที่ที่ใช้ในหัวข้อ 4.9.1
$c$	=	ระยะระหว่างแกนของตัวนำและแกนของสายเคเบิล สำหรับสายเคเบิลชนิด 3 แกน (mm)
$d$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของซีท (mm)
$d_c$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)
$f$	=	ความถี่ (Hz)
$g_s$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในหัวข้อ 4.6.1.2
$k_p$	=	แฟกเตอร์ที่ใช้คำนวณค่า $X_p$ (proximity effect)
$k_s$	=	แฟกเตอร์ที่ใช้คำนวณค่า $X_s$ (skin effect)
$m$	=	$\frac{\omega}{R_s} \cdot 10^{-7}$
$n$	=	จำนวนตัวนำในเคเบิล
$r_s$	=	รัศมีสมมูลของดักเบงค์ (mm)
$s$	=	ระยะระหว่างแกนของตัวนำ (mm)
$t_1$	=	ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและซีท (mm)
$t_3$	=	ความหนาของส่วนที่ห่อหุ้ม (mm)
$t_s$	=	ความหนาของซีท (mm)
$u$	=	$\frac{2L}{D_e}$ ใช้คำนวณในหัวข้อ 4.9.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$u$	=	$\frac{L_G}{r_b}$ ใช้คำนวณในหัวข้อ 4.9.3
$x_p$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณ พร็อกซิมีตี เอฟเฟค (Proximity Effect, $y_p$ )
$x_s$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณ สกิน เอฟเฟค (Skin Effect, $y_s$ )
$x, y$	=	ขนาดของดักเบงค์ ( $y > x$ ) (mm)
$y_p$	=	ค่า พร็อกซิมีตี เอฟเฟค แฟคเตอร์
$y_s$	=	ค่า สกิน เอฟเฟคแฟคเตอร์
$\alpha_{20}$	=	สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิต่อ K ที่ 20 °C
$\beta_1$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในหัวข้อ 4.6.1.2
$\Delta_1$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในหัวข้อ 4.6.1.2
$\Delta_2$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในหัวข้อ 4.6.1.2
$\tan \delta$	=	แฟคเตอร์ความสูญเสียของฉนวน
$\epsilon$	=	รีเลทีฟ เพอร์มิททิวิตี (Relative Permittivity) ของฉนวน
$\theta$	=	ค่าอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน (°C)
$\theta_m$	=	อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวกลางที่อยู่ระหว่างสายเคเบิลและท่อ (°C)
$\theta_s$	=	อุณหภูมิของซีท (°C)
$\Delta\theta$	=	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวนำเหนืออุณหภูมิแวดล้อม (K)
$\lambda_0$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในหัวข้อ 4.6.1.2
$\lambda_1, \lambda_2$	=	อัตราส่วนในการสูญเสียในซีท โลหะ และ อาร์เมอร์ ตามลำดับ กับค่าสูญเสียรวมของตัวนำ
$\lambda_1'$	=	ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสตรง (Circulating Currents)
$\lambda_1''$	=	ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน (Eddy Currents)
$\lambda_{1m}'$	=	แฟคเตอร์ความสูญเสีย ของสายเคเบิลอันกลาง
$\lambda_{11}'$	=	แฟคเตอร์ความสูญเสียของสายเคเบิลอันนอกเส้นที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\lambda_{12}'$  = แฟลคเตอร์ความสูญเสีย ของสายเคเบิลอันนอกเส้นที่ 2
- $\rho_{20}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Resistivity) ของตัวนำ ที่ 20 °C ( $\Omega / m$ )
- $\rho_c$  = ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดินที่อยู่รอบๆ ดักแบงก์ ( $K.m / W$ )
- $\rho_c$  = ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของคอนกรีต ( $K.m / W$ )
- $\rho_s$  = ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานของ ชีท ที่ 20 °C ( $\Omega . m$ )
- $\rho_T$  = ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของวัสดุ ( $K.m / W$ )
- $\omega$  =  $2\pi f$  (1/s)

#### 4.3. การคำนวณ

พิกัดกระแสที่ทนได้ของสายเคเบิล สามารถคำนวณหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{1/2}$$

ซึ่ง :

- $I$  = กระแสที่ไหลในตัวนำ 1 เส้น (A)
- $\Delta\theta$  = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวนำเหนืออุณหภูมิแวดล้อม (K)
- $R$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำ ณ อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )
- $W_d$  = ค่าความสูญเสียในฉนวนต่อหน่วยความยาว สำหรับฉนวนที่ล้อมรอบตัวนำ ( $W / m$ )
- $T_1$  = ความต้านทานทางความร้อนต่อหน่วยความยาวระหว่างตัวนำและชีท ( $K.m / W$ )
- $T_2$  = ความต้านทานทางความร้อนต่อหน่วยความยาวระหว่างชีทและอาร์เมอร์ ( $K.m / W$ )
- $T_3$  = ความต้านทานทางความร้อนต่อหน่วยความยาวของส่วนที่ห่อหุ้มภายนอกของสายเคเบิล ( $K.m / W$ )
- $T_4$  = ความต้านทานทางความร้อนต่อหน่วยความยาวของภายนอกสายเคเบิล ( $K.m / W$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $n$  = จำนวนแกนของตัวนำที่รับภาระทางไฟฟ้า (load) ที่อยู่ในสายเคเบิล
- $\lambda_1$  = อัตราส่วนของความสูญเสียในซีท ที่เป็นโลหะกับ ความสูญเสียทั้งหมดในทุกตัวนำของสายเคเบิลนั้น
- $\lambda_2$  = อัตราส่วนของความสูญเสียในอาร์เมอร์ กับ ความสูญเสียทั้งหมดในทุกตัวนำของสายเคเบิลนั้น

จากสูตรหลักที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดกระแสที่ทนได้ของสายเคเบิลนั้นเราสามารถแบ่งการคำนวณเพื่อหาปริมาณที่แตกต่างกันได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

ส่วนที่ 1 ประกอบด้วยสูตรที่คำนวณหาความสูญเสียต่างๆ คือปริมาณ  $R$ ,  $W_d$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$

ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยสูตรที่คำนวณหาความต้านทานทางความร้อนต่างๆ  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$

และ  $T_4$

### ส่วนที่ 1 การคำนวณหาความสูญเสียต่างๆ

#### 4.4.ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำ (A.C. Resistance of Conductor, R)

$$R = R'(1 + y_s + y_p)$$

ซึ่ง :

$R$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )

$R'$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )

$y_s$  = ค่า สกิน เอฟเฟคแฟคเตอร์

$y_p$  = ค่า พร็อกซิมิตี เอฟเฟคแฟคเตอร์

##### 4.4.1. ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำ (D.C. Resistance of Conductor, R')

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

ซึ่ง :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_0$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  ( $\Omega/\text{m}$ )  
โดยที่

$$R_0 = \frac{1.02 \times 10^6 \rho_{20}}{S}$$

ซึ่ง :

$\rho_{20}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ( $\Omega/\text{m}$ ) ที่  $20^\circ\text{C}$  {ดูได้จากตารางที่ ก.1}

$S$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ( $\text{mm}^2$ )

$\alpha_{20}$  = สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิต่อ K ที่  $20^\circ\text{C}$  {ดูได้จากตารางที่ ก.1}

$\theta$  = ค่าอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $^\circ\text{C}$ )

#### 4.4.2. ค่า สกิน เอฟเฟก แฟกเตอร์ ( $y_s$ )

คือค่าที่เกิดจากการที่ตัวมีพื้นที่หน้าตัดมีขนาดใหญ่ บริเวณกึ่งกลางของตัวนำมีค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กมากกว่า ทำให้ความหนาแน่นกระแสบริเวณกลางพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าบริเวณริม ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณผิวของตัวนำ เป็นผลทำให้ความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยขนาดของสกิน เอฟเฟก แฟกเตอร์ จะขึ้นอยู่กับ ความถี่, ขนาดของตัวนำ และขนาดของกระแส

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}$$

ซึ่ง :

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_s$$

$f$  = ความถี่ (Hz)

ค่าของ  $k_s$  ดูได้จากตารางที่ ก.2

#### 4.4.3. ค่า พร็อกซิมิตี เอฟเฟกแฟกเตอร์ ( $y_p$ )

คือ ค่าที่มีผลกับความต้านทานของสายซึ่งสนามไฟฟ้าของตัวนำ 2 ตัว ที่อยู่ใกล้กัน ถ้าสายทั้ง 2 มีทิศเดียวกันหรือสวนทางกัน ครั้งหนึ่งของตัวนำที่เข้ามาใกล้กันจะถูกสนามไฟฟ้าของอีกเส้นตัดผ่าน ทำให้การกระจายไม่สม่ำเสมอ

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right]$$

ซึ่ง :

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $d_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)  
 $s$  = ระยะระหว่างแกนของตัวนำ (mm)  
 ค่าของ  $k_p$  ดูได้จากตารางที่ ก.2

#### 4.5. ค่าความสูญเสียในฉนวน (Dielectric loss, $W_d$ )

ค่าความสูญเสียในฉนวนนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ และจะมีผลเมื่อระดับแรงดันที่ใช้งานนั้น ( $U_0$ ) มีค่าสูงพอ ซึ่งดูได้จาก ตารางที่ ก.3 และไม่จำเป็นต้องคิดสำหรับสายเคเบิลชนิดหลายแกนแบบไม่มีสกรีน (Unscreened Multicore) หรือสายเคเบิลที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$$

ซึ่ง :

$\omega$

$$= 2\pi f$$

$C$

= ค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว (F / m)

โดยที่

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left( \frac{D_i}{d_c} \right)} \times 10^{-9}$$

ซึ่ง :

$\epsilon$

= ค่ารีเลทีฟเพอร์มิททิวิตีของฉนวน {ดูได้จากตารางที่ ก.3}

$D_i$

= เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฉนวน (ไม่รวมชั้นสกรีน) (mm)

$d_c$

= เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ (รวมชั้นสกรีน) (mm)

$U_0$

= ระดับแรงดันที่ใช้งาน (V)

ค่าของ  $\tan \delta$  ดูได้จากตารางที่ ก.3

#### 4.6.ค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียของซีทและสกรีน ( $\lambda_1$ )

ค่าความสูญเสียในซีท หรือสกรีน ( $\lambda_1$ ) ประกอบด้วยค่าความสูญเสียที่เกิดจาก กระแส  
 ครอบวงจร ( $\lambda_1'$ ) และกระแสไหลวน ( $\lambda_1''$ )  
 ดังนั้นจะได้ว่า :

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

ค่าของ  $\lambda_1'$  และ  $\lambda_1''$  ขึ้นอยู่กับจำนวนแกนของสายเคเบิล (1 แกน , 3 แกน) ชนิดของ  
 การบอนด์ (Bonding) ได้แก่ ซิงเกิล พอยท์ (Single Point) , โบท เอนด์ (Both Ends), ครอส บอนด์  
 (Cross-Bonded) และชนิดของการติดตั้ง ได้แก่ แบบทรีฟอยล์ (Trefoil Formation), แบบแฟลต  
 (Flat Formation) ซึ่งเราสามารถแบ่งเป็นกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

##### 4.6.1. สายเคเบิลชนิด 1 แกน

##### 4.6.1.1. การบอนด์แบบโบท เอนด์

ก. ติดตั้งแบบทรีฟอยล์

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

ซึ่ง :

$R_s$  = ความต้านทานของซีท หรือสกรีนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล ณ อุณหภูมิสูง  
 สุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )

$$R_s = \frac{\rho_{20} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot t_s} [1 + \alpha_{20} (\theta_s - 20)]$$

โดยที่

$\rho_{20}$  = ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานของซีท ที่  $20^\circ\text{C}$  {ดูได้จาก ตารางที่ ก.1}

$\alpha_{20}$  = สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ต่อ K ที่  $20^\circ\text{C}$  {ดูได้จาก ตารางที่ ก.1}

$\theta_s$  = อุณหภูมิของ ซีท ( $^\circ\text{C}$ )

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ ซีท (mm)

$t_s$  = ความหนาของ ซีท (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X = ค่า รีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของ ซีท หรือ สกรีน ต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล ( $\Omega / \text{m}$ )

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$$

โดยที่

$$\omega = 2\pi f$$

S = ระยะระหว่างแกนของตัวนำ (mm)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ ซีท (mm)

$$\lambda_1'' = 0$$

ข. คิดคั้งแบบฟลัด (ไม่ทรานสโพสิชัน)

■ ค่า แฟคเตอร์ความสูญเสีย ของสาย เคเบิล เส้นนอกเส้นที่ 1 ( $\lambda_{11}'$ )

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \cdot \left[ \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

■ ค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียของสาย เคเบิล เส้นนอกเส้นที่ 2 ( $\lambda_{12}'$ )

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \cdot \left[ \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

■ ค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียของสายเคเบิลเส้นกลาง ( $\lambda_{1m}'$ )

$$\lambda_{1m}' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

โดยที่

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง :

$X$  = ค่ารีแอกแตนซ์ของซีท หรือสกรีนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล ( $\Omega / \text{m}$ )

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln \frac{2s}{d}$$

$X_m$  = ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลระหว่างซีทของสายเส้นนอก และตัวนำของสายอีก 2 เส้น ( $\Omega / \text{m}$ )

$$X_m = 2\omega 10^{-7} \ln 2$$

$\lambda_1''$  = 0

#### 4.6.1.2. การบอนด์ แบบ ซิงเกิล พอยท์ หรือ ครอส บอนด์

##### 4.6.1.2.1. ค่าค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ( $\lambda_1''$ )

$$\lambda'' = \frac{R_s}{R} \left[ g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

ซึ่ง :

$$g_s = 1 + \left( \frac{t_s}{D_s} \right) 1.74 (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}}$$

$\rho_s$  = ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานของซีท ที่  $20^\circ\text{C}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) {ดูได้จากตารางที่ ก.1}

$D_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของซีท (mm)

$t_s$  = ความหนาของซีท (mm)

$\omega$  =  $2\pi f$

สูตรสำหรับหาค่า  $\lambda_0$ ,  $\Delta_1$  และ  $\Delta_2$  :

$$\text{(ซึ่ง)} \quad m = \frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7}$$

ถ้า  $m \leq 0.1$   $\Delta_1$  และ  $\Delta_2$  สามารถตัดทิ้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ติดตั้งแบบทรีฟอยล์

$$\lambda_0 = 3 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1.14m^{2.45} + 0.33) \left( \frac{d}{2s} \right)^{(0.92m+1.66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

ข. แบบเฟลต

■ สายเคเบิลเส้นกลาง

$$\lambda_0 = 6 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0.86m^{3.08} \left( \frac{d}{2s} \right)^{(1.4m+0.7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

■ สายเคเบิลเส้นนอกที่มีเฟสนำหน้า (leading phase) :

$$\lambda_0 = 1.5 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 4.7m^{0.7} \left( \frac{d}{2s} \right)^{(0.16m+2)}$$

$$\Delta_2 = 21m^{3.3} \left( \frac{d}{2s} \right)^{(1.47m+5.06)}$$

■ สายเคเบิลเส้นนอกที่มีเฟสตามหลัง (lagging phase) :

$$\lambda_0 = 1.5 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = -\frac{(0.74m+2)m^{0.5}}{2+(m-0.3)^2} \left( \frac{d}{2s} \right)^{(m+1)}$$

$$\Delta_2 = 0.92m^{3.7} \left( \frac{d}{2s} \right)^{(m+2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.2.2. ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสตรง ( $\lambda_1'$ )

ถ้าติดตั้งแบบขึงเกิด พอยท์ หรือครอส บอนด์ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆกัน

$$\lambda_1' = 0$$

แต่ถ้า ครอส บอนด์ โดยแบ่งเป็นส่วนๆไม่เท่ากันจะได้

$$\lambda_1' = 0.03 \text{ สำหรับสายเคเบิลที่ติดตั้งแบบฝังดิน โดยตรง}$$

หรือ  $\lambda_1' = 0.05$  สำหรับสายเคเบิลที่ติดตั้งในดัก

#### 4.6.2. สายเคเบิลชนิด 3 แกนแบบไม่มี อาร์เมอร์ ที่มีชีทร่วม (Common Sheath)

ค่าของ  $\lambda_1'$  สามารถตัดทิ้งได้ ( $\lambda_1' = 0$ )

- ถ้าค่าความต้านทานของชีท ( $R_s$ ) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $100 \mu\Omega / m$

$$\lambda_1'' = \frac{3R_s}{R} \left[ \left( \frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left( \frac{R_s \times 10^7}{\omega} \right)^2} + \left( \frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left( \frac{R_s \times 10^7}{\omega} \right)^2} \right]$$

- ถ้าค่าความต้านทานของชีท ( $R_s$ ) มีค่ามากกว่า  $100 \mu\Omega / m$

$$\lambda_1'' = \frac{3.2\omega^2}{RR_s} \cdot \left( \frac{2c}{d} \right)^2 \times 10^{-14}$$

ซึ่ง :

c = ระยะระหว่างแกนของตัวนำและแกนของสายเคเบิล สำหรับสายเคเบิลชนิด 3 แกน (mm)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ ชีท หรือ สกรีน (mm)

#### 4.7.ค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียของอาร์เมอร์, ส่วนที่เสริมความแข็งแรง (Reinforcement) และ ไปป์เหล็ก (Steel Pipes) ( $\lambda_2$ )

สำหรับการคำนวณในส่วนนี้จะไม่กล่าวถึงเนื่องจากโมเดล ของสายที่เราใช้นั้นจะไม่มีส่วนของอาร์เมอร์ โดยเราจะถือว่า  $\lambda_2 = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ส่วนที่ 2 การคำนวณความต้านทานทางความร้อนต่างๆ

### 4.8. ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิล ( $T_1, T_2, T_3$ )

#### 4.8.1. ความต้านทานทางความร้อนระหว่างตัวนำกับซีท ( $T_1$ )

##### 4.8.1.1. สายเคเบิลชนิด 1 แกน

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

ซึ่ง :

$\rho_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของฉนวน (K.m / W)  
 {ดูได้จากตารางที่ ก.4}

$d_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

$t_1$  = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและซีท (mm)

##### 4.8.1.2. สายเคเบิลชนิด 3 แกน

ก. สายเคเบิลแบบเบดท์ คังรูปที่ 4.1

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} G$$

ซึ่ง :

$\rho_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของฉนวน (K.m / W)  
 {ดูได้จากตารางที่ ก.4}

$G$  = ค่าแฟคเตอร์ทางเรขาคณิต {ดูจากรูปที่ ก.1}

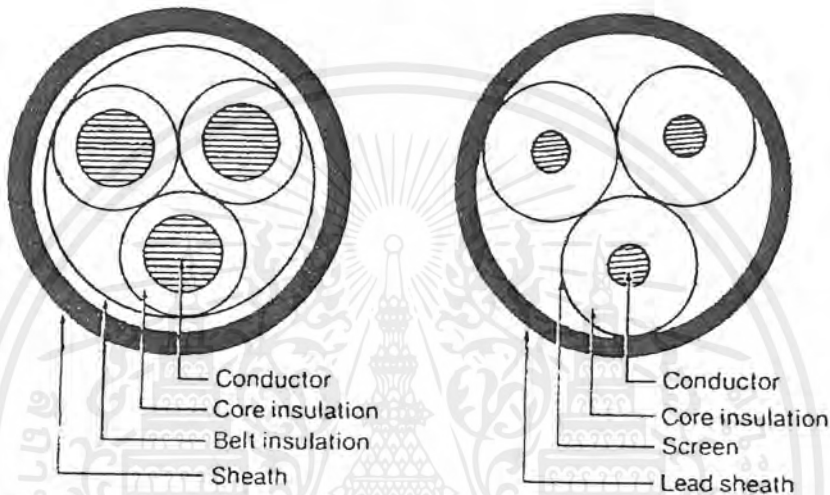
ข. สายเคเบิลแบบสกรีน คังรูปที่ 4.1

$$T_1 = K \frac{\rho_T}{2\pi} G$$

ซึ่ง :

$\rho_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของฉนวน (K.m / W)  
 {ดูได้จากตารางที่ ก.4}

K = ค่าแฟคเตอร์ของการสกรีน สำหรับความต้านทานทางความร้อนของสายเคเบิลแบบสกรีน {ดูจากรูปที่ ก.2}



รูปที่ 4.1 โมเดลของสายเคเบิลแบบเบลท์ (Belt) (ซ้าย) และแบบสกรีน (Screen) (ขวา)

4.8.2. ความต้านทานทางความร้อนระหว่าง ชีท และ อาร์เมอร์ ( $T_2$ )

ในส่วนนี้เราจะไม่กล่าวถึง เนื่องจากสายส่วนใหญ่ที่ใช้งานจริงจะไม่มีอาร์เมอร์ โดยเราจะถือว่า  $T_2 = 0$

4.8.3. ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก ( $T_3$ )

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left[ 1 + \frac{2t_s}{D'_a} \right]$$

ซึ่ง :

$\rho_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของส่วนที่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก (K.m / W) {ดูได้จากตารางที่ ก.4}

$t_3$  = ความหนาของส่วนที่ห่อหุ้ม (mm)

$D'_a$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอาร์เมอร์ (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9. ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกสายเคเบิล ( $T_4$ )

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$$

ซึ่ง :

$T_4'$  = ความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อ

$T_4''$  = ความต้านทานทางความร้อนของท่อ

$T_4'''$  = ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกท่อ

##### 4.9.1. ความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อ ( $T_4'$ )

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_c}$$

ซึ่ง :

$U$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง {ดูได้จากตารางที่ ก.5}

$V$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง {ดูได้จากตารางที่ ก.5}

$Y$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง {ดูได้จากตารางที่ ก.5}

$D_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (mm)

ถ้าสำหรับสาย 3 แกน :  $D_c = 2.16 \times$  เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแต่ละแกน (mm)

$\theta_m$  = อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวกลางที่อยู่ระหว่างสายเคเบิลและท่อ ( $^{\circ}\text{C}$ )

##### 4.9.2. ความต้านทานทางความร้อนของท่อ ( $T_4''$ )

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left[ \frac{D_o}{D_d} \right]$$

ซึ่ง :

$D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ (mm)

$D_d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (mm)

$\rho_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของวัสดุที่นำมาทำท่อ (K.m / W)  
{ดูได้จากตารางที่ ก.4}

### 4.9.3. ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกท่อ ( $T_4'''$ )

ซึ่ง : 
$$T_4''' = T_4 + \text{correction}$$

$T_4$  = ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกสายเคเบิลในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งในท่อ (K.m / W)

$$\text{Correction} = \frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$

โดยที่ :

$N$  = จำนวนของสายเคเบิลที่รับภาระทางไฟฟ้าที่อยู่ในดักเบงค์

$\rho_c$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของคอนกรีต (K.m / W)  
ดูได้จากตารางที่ ก.4)

$\rho_e$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดินที่อยู่รอบๆ ดักเบงค์  
(K.m / W) ดูได้จากตารางที่ ก.6)

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

ซึ่ง :

$L_G$  = ความลึกจากผิวดินถึงกึ่งกลางดักเบงค์ (mm)

$r_b$  = รัศมีสมมูลของดักเบงค์ คอนกรีต (mm)

หาได้จาก :

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{y} \cdot \left( \frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left( 1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2}$$

ค่า  $x$  และ  $y$  คือ ขนาดของดักเบงค์ ด้านสั้น และ ด้านยาว ตามลำดับ (mm)

ค่าของ  $T_4$  ขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้งซึ่งสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

ก. สายเคเบิล 1 เส้น

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_r \ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง :

$\rho_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดิน (K.m / W)

$$u = \frac{2L}{D_c}$$

โดยที่ :

L = ระยะจากผิวดินถึงกึ่งกลางของสายเคเบิล (mm)

$D_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (mm)

ข. สายเคเบิล 3 เส้น

▪ ติดตั้งแบบแฟลต

$$T_4 = \rho_T (0.4751 \ln(2u) - 0.346)$$

▪ ติดตั้งแบบทรีฟอยล์

$$T_4 = \frac{1.5}{\Pi} \rho_T (\ln(2u) - 0.630)$$

ถ้าสำหรับกรณีติดตั้งแบบทรีฟอยล์ค่าของ  $T_3$  ต้องคูณ 1.6 ด้วย

ดูตัวอย่างการคำนวณได้ในภาคผนวก ข.

## บทที่ 5

### การคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน

#### ระบบหลายวงจร (Multi-Circuits)

##### 5.1. บทนำ

จากบทที่แล้ว จะเป็นการคำนวณหาค่ากระแสในสายเคเบิลสำหรับ 1 วงจร โดยยึดตามเอกสารอ้างอิง [2] แต่ในการติดตั้งจริงนั้น ระบบหรือภายในดักเบงคั้นนั้น จะประกอบด้วยหลายวงจร ซึ่งแต่ละวงจรมัน อาจมีความแตกต่างกันบ้างทั้งในเรื่องของขนาดสายเคเบิล, ชนิดของสายเคเบิล, ชนิดของการบอนด์ เป็นต้น

##### 5.2. สัญลักษณ์ต่างๆ (Symbols)

สัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลตาม [4] มีดังนี้

$F_{int}$	=	อัตราส่วนของ $dx_y'$ ต่อ $dx_y$
$G_b$	=	แฟคเตอร์ทางเรขาคณิตของดักเบงคั้น
$I_1$	=	ค่ากระแสในสายเคเบิลของการติดตั้งครั้งที่ 1 (A)
$I_2$	=	ค่ากระแสในสายเคเบิลของการติดตั้งครั้งที่ 2 (A)
$I_m$	=	ค่ากระแสเฉลี่ย (A)
$K$	=	จำนวนวงจรในระบบ
$N$	=	จำนวนครั้งของการคำนวณซ้ำ
$R$	=	ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำ ณ อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $\Omega / m$ )
$T_1$	=	ความต้านทานทางความร้อนระหว่างตัวนำกับ ซีท ( $K.m / w$ )
$T_2$	=	ความต้านทานความร้อนระหว่างซีท และอาร์เมอร์ ( $K.m / w$ )
$T_3$	=	ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก ( $K.m / w$ )
$T_4$	=	ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่ภายนอกสายเคเบิล ( $K.m / w$ )
$T_{int}$	=	ความต้านทานทางความร้อนระหว่างวงจร ( $K.m / w$ )
$W$	=	ความสูญเสียทั้งหมดของสายเคเบิล ( $W / m$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W_c$	=	ความสูญเสียในตัวนำ (W / m)
$X$	=	พิกัดในแนวแกน x ของตำแหน่งที่ติดตั้งวงจรถ (mm)
$Y$	=	พิกัดในแนวแกน y ของตำแหน่งที่ติดตั้งวงจรถ (mm)
$d_c$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)
$dx_y$	=	ระยะทางระหว่าง 2 วงจรถ (mm)
$dxy'$	=	ระยะทางระหว่างวงจรถที่ 1 กับจินตภาพ (Image) ของอีกรวงจรถ (mm)
$n'$	=	จำนวนตัวนำในคอก (mm)
$t$	=	ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำ (mm)
$t_1$	=	ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและซีท (mm)
$\theta$	=	ค่าอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_a$	=	ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบคอกเบงค์ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\Delta\theta_d$	=	ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความสูญเสียของฉนวน ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\Delta\theta_{int}$	=	ค่าอุณหภูมิแทรกสอด (Interference Temperature) รวม ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\Delta\theta_{inti}$	=	ค่าอุณหภูมิแทรกสอดของวงจรถอื่น ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\lambda_1, \lambda_2$	=	อัตราส่วนในการสูญเสียในซีทโลหะ และ อาร์เมอร์ ตามลำดับ กับค่าสูญเสียรวมของตัวนำ
$\rho_c$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดินที่อยู่รอบๆคอกเบงค์ (K.m / W)
$\rho_c$	=	ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน ของคอนกรีต (K.m / W)

### 5.3. การคำนวณ

การคำนวณในส่วนนี้ เราสามารถทำได้ โดยใช้หลักตามเอกสารอ้างอิง [5] ซึ่งสามารถสรุปได้ 9 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูลของสายเคเบิล K วงจรถ

ได้แก่ขนาดเคเบิล, ชนิดของสายเคเบิล, ชนิดของการบอนด์, ค่าแฟกเตอร์แวดล้อมต่างๆ, ตำแหน่งในการติดตั้ง (พิกัด x,y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าแฟกเตอร์ทางเรขาคณิตของดักเบงค์ ( $G_b$ )

$$\text{หา } \frac{L_b}{h} \quad \text{และ} \quad \frac{h}{w}$$

แล้วนำไปเทียบหา  $G_{b(\text{Table})}$  จากตารางที่ 1 ใน [5]

$$\text{และ} \quad G_b = \frac{G_{b(\text{Table})}}{\ln_{10}}$$

โดยที่  $h$  = ความสูงของดักเบงค์

$w$  = ความกว้างของดักเบงค์

$$L_b = L + \left(\frac{h}{2}\right)$$

$L$  = ระยะจากผิวคินถึงหัวดักเบงค์

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างวงจรของสายเคเบิล ( $T_{int_{k,j}}$ )

จาก

$$dxy_{k,j} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2}$$

$$dxy'_{k,j} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (-y_j - y_k)^2}$$

$$F_{int_{k,j}} = \frac{dxy'_{k,j}}{dxy_{k,j}}$$

$$T_{int_{k,j}} = 0.012 \times nj \times [\rho_c \times \log(F_{int_{k,j}}) + (\rho_e - \rho_c) \times G_b]$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่ากระแสในสายเคเบิล ( $I_k$ ) และค่าความสูญเสียของโหลด ( $W_k$ )

การคำนวณค่ากระแสในสายเคเบิลสำหรับระบบหลายวงจรนี้ จะพิจารณาอุณหภูมิแทรกสอด (Interference Temperature,  $\Delta\theta_{int}$ ) ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดความร้อนอื่น (วงจรอื่นๆ) ด้วย ดังนั้นจะได้สูตรที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$I1_k = \left[ \frac{\theta - \theta_a - \Delta\theta_d - \Delta\theta_{int_k}}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ในการคิดครั้งแรก ( $k=1$ )

จะกำหนดให้  $\Delta\theta_{int} = 1$

$$Wc_k = I1_k^2 R$$

เราจะถือว่าความสูญเสียส่วนใหญ่มาจากตัวนำ

ดังนั้น  $W_k = Wc_k$

ขั้นตอนที่ 5 หา  $\Delta\theta_{int}$  จาก  $W$  ที่ได้ในขั้นตอนที่ 4

$$\Delta\theta_{int_{k,j}} = T_{int_{k,j}} \times W_k$$

และ

$$\Delta\theta_{int_k} = \sum \Delta\theta_{int_{k,j}}$$

ถ้า

$$\Delta\theta_{int} > \theta_c - \theta_a - \Delta\theta_d$$

แล้ว

$$\Delta\theta_{int} > \theta_c - \theta_a - \Delta\theta_d$$

แต่ถ้า

$$\Delta\theta_{int} \leq \theta_c - \theta_a - \Delta\theta_d$$

แล้ว

$$\Delta\theta_{int}$$

มีค่าเท่าเดิม

ขั้นตอนที่ 6 หา  $I^2R$  จาก  $\Delta T_{int}$  ที่ได้ในขั้นตอนที่ 5

ใช้สูตรเหมือนขั้นตอนที่ 4 (สมการที่ 5)

$$I2_k = \left[ \frac{\theta - \theta_a - \Delta\theta_d - \Delta\theta_{int_k}}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ขั้นตอนที่ 7 หาค่ากระแสเฉลี่ย ( $Im_k$ ) และ  $W_k$  ค่าใหม่

$$Im_k = \frac{I1_k + I2_k}{2}$$

$$W_k = Im_k^2 R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 8 หา  $\Delta\theta_{int_k}$  ค่าใหม่โดยใช้  $w_k$  ที่ได้จากขั้นตอนที่ 7  
ใช้สูตรเหมือนขั้นตอนที่ 5 (สมการที่ 7 และ 8)

$$\Delta\theta_{int_{k,j}} = T_{int_{k,j}} \times W_k$$

$$\Delta\theta_{int_k} = \sum \Delta\theta_{int_{k,j}}$$

ขั้นตอนที่ 9 ทำขั้นตอนที่ 4 ถึง 8 ซ้ำ  $N$  ครั้งโดยที่

$$N = 2 + 2K$$

สามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้ใน [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การทำงานของโปรแกรมและวิธีการใช้โปรแกรม

#### 6.1.การทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 6.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

#### 6.2.วิธีการใช้โปรแกรม

1. เปิด โปรแกรม Ampcall
2. ไปที่ File>New หรือคลิกที่ปุ่ม 
3. ป้อนข้อมูลการติดตั้งสาย โดยไปที่ Data>Structure หรือคลิกที่ปุ่ม 
  - 3.1. สามารถเขียนคำบรรยายได้ในช่องคำบรรยาย (Description) 2 บรรทัด
  - 3.2. เลือกชนิดของการติดตั้ง (Type of Installation) ได้แก่ ในดักเบงค์ (Duct Bank) และฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

#### 3.3. ป้อนแพคเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งนั้นๆ

##### กรณีติดตั้งแบบในดักเบงค์ ดังรูปที่ 6.2

- ระยะจากผิวดินถึงส่วนบนของดักเบงค์ (mm)
- จำนวนแถวและหลักของดักเบงค์
- ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดักเบงค์
- ระยะห่างระหว่างท่อ
- ความหนาของขอบดักเบงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Structure**

Description

การจำลองการติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดิน

ระบบสาย 2x2 สายเคเบิลขนาด 400 sq.mm.

Type of Installation

In Ductbank

Direct Burial

In Ductbank

Distance between soil surface and the top of ductbank (mm) 1000

Coloum 2 Row 2

Thermal Resistivity of Ductbank (K\*cm/W) 85

Dimension of Duct

Between Ducts 255

Shortest Thickness of Ductbank 155

OK

รูปที่ 6.2 ป้อนข้อมูลกรณีติดตั้งแบบในคังเบงค์  
กรณีติดตั้งแบบฝังดินโดยตรง รูปที่ 6.3

- ระยะจากผิวดินถึงกึ่งกลางของระบบ (mm)
- จำนวนแถวและหลักของระบบ
- ระยะห่างระหว่างท่อ

**Structure**

Description

การจำลองการติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดิน

ระบบสาย 2x2 สายเคเบิลขนาด 400 sq.mm.

Type of Installation

In Ductbank

Direct Burial

Direct Burial

Distance between soil surface and the center of system (mm) 1000

Coloum 2 Row 2

Dimension of Duct

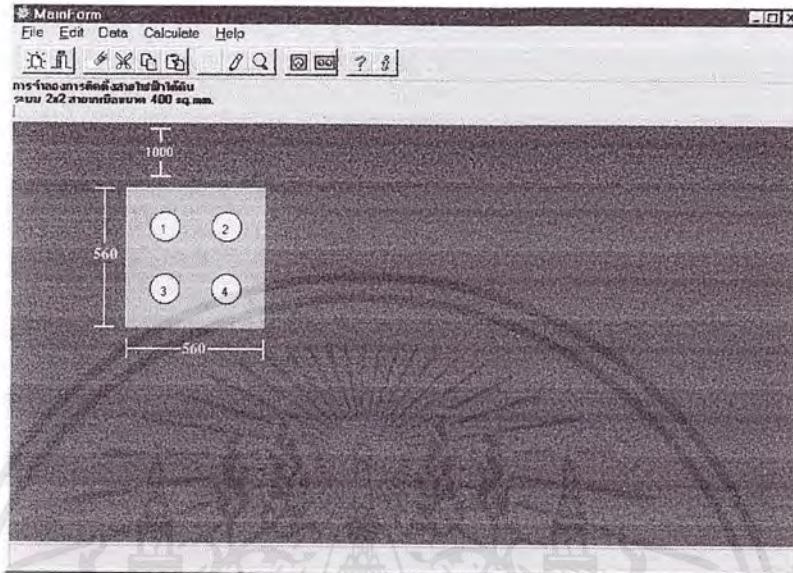
Between Ducts 255

OK

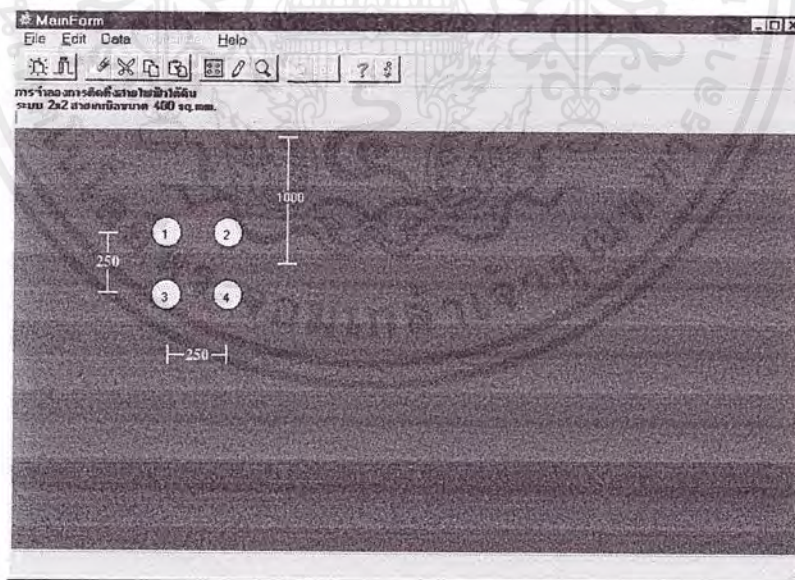
รูปที่ 6.3 ป้อนข้อมูลกรณีติดตั้งแบบฝังดิน โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4. คลิกที่ปุ่ม



รูปที่ 6.4 การติดตั้งแบบในดักเบงค์



รูปที่ 6.5 การติดตั้งแบบฝังดินโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ป้อนรายละเอียดการติดตั้งสาย โดยไปที่ Data>Detail หรือคลิกที่ปุ่ม

4.1. เลือกตำแหน่งของท่อที่จะป้อนข้อมูล โดยตำแหน่งจะเรียงจากซ้ายไปขวา และบนลงล่างตามลำดับ

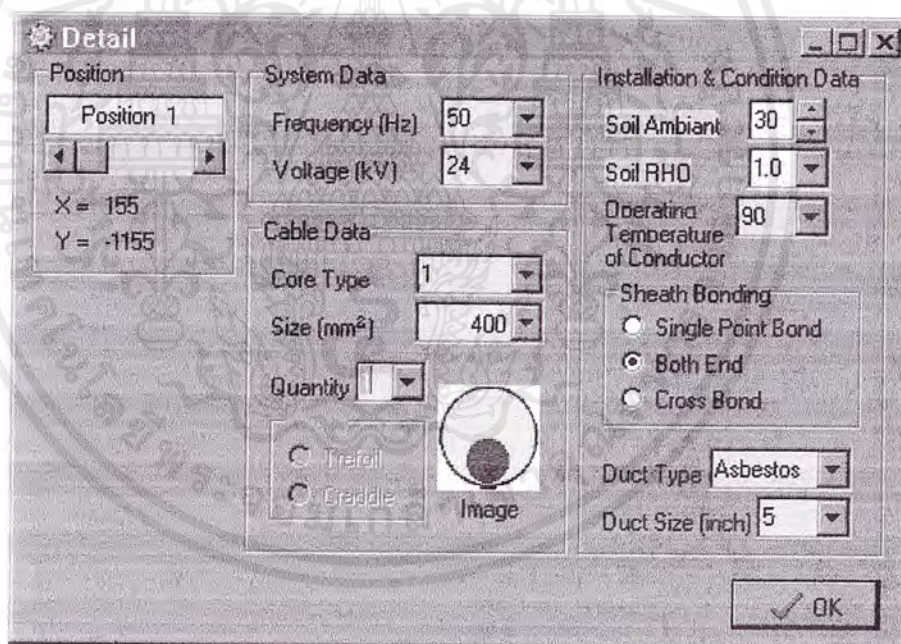
4.2. กรอกข้อมูลของระบบ ได้แก่ ความถี่ (Hz) และ แรงดัน (V)

4.3. กรอกข้อมูลของสายเคเบิล

- จำนวนแกนของสายเคเบิล
- เลือกขนาดของตัวนำ

กรณีเลือก 1 แกน ต้องเลือกจำนวนสายในท่อ (1 หรือ 3 เส้น)

กรณีเลือก 1 แกน 1 เส้น



รูปที่ 6.6 ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 1 แกน 1 เส้น

กรณีเลือก 1 แกน 3 เส้น จะมีให้เลือกชนิดของการติดตั้ง {ทรีฟอยล์ (Trefoil) หรือครัดเดิล (Cradle)}

### กรณีเลือกทรีฟอยล์

รูปที่ 6.7 ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 1 แกน 3 เส้น แบบทรีฟอยล์

### กรณีเลือกครัดเดิล

รูปที่ 6.8 ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 1 แกน 3 เส้น แบบครัดเดิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเลือก 3 แกน บังคับให้เลือกจำนวนสายในท่อได้เพียงเส้นเดียว

รูปที่ 6.9 ป้อนข้อมูลกรณีเลือกสายเคเบิลแบบ 3 แกน


#### 4.4. กรอกข้อมูลของการติดตั้งและสถานะต่างๆ

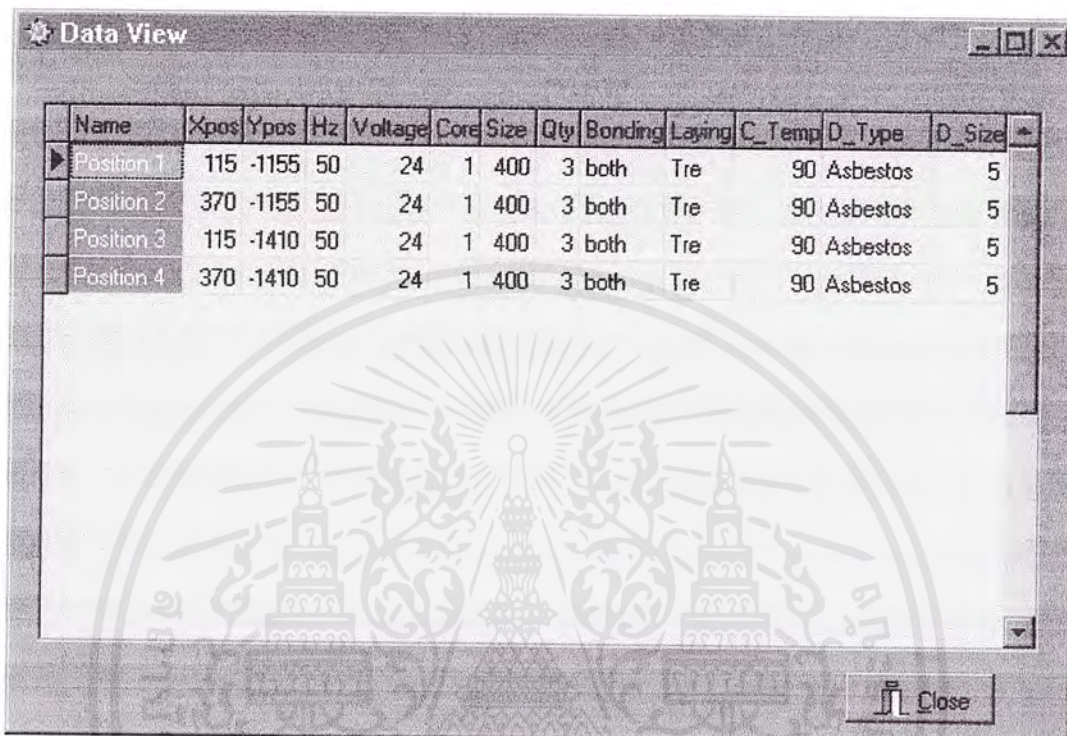
- อุณหภูมิของดิน ( $^{\circ}\text{C}$ )
- สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดิน
- อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานของตัวนำ ( $^{\circ}\text{C}$ )
- ชนิดของการบอนด์ (Bonding) ได้แก่ ชิงเกิล พอยท์ บอนด์, โบท เอ็นด์ และครอส บอนด์
- ชนิดของท่อ ได้แก่ แอสเบสตอส และไฟเบอร์
- ขนาดของท่อ (นิ้ว)

#### 4.5. ป้อนข้อมูลจนครบทุกตำแหน่งแล้วคลิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


5. สามารถตรวจสอบข้อมูลที่ป้อนได้ โดยไปที่ Data>View หรือคลิกที่ปุ่ม 



Name	Xpos	Ypos	Hz	Voltage	Core	Size	Qty	Bonding	Laying	C_Temp	D_Type	D_Size
Position 1	115	-1155	50	24	1	400	3	both	Tre	90	Asbestos	5
Position 2	370	-1155	50	24	1	400	3	both	Tre	90	Asbestos	5
Position 3	115	-1410	50	24	1	400	3	both	Tre	90	Asbestos	5
Position 4	370	-1410	50	24	1	400	3	both	Tre	90	Asbestos	5



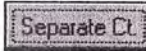
รูปที่ 6.10 รายละเอียดของข้อมูลทั้งหมดที่ป้อน

6. คำนวณค่ากระแสที่ยอมรับได้ของสายเคเบิล

6.1. คำนวณ โดยแยกคิดแต่ละท่อ โดยไปที่ Calculate>Separate หรือคลิกที่ปุ่ม  แล้วเลื่อน (Scrollbar) ค่ากระแสที่ยอมรับได้และตัวแปรต่างๆ ที่มีผล

Lamda1p	Lamda1pp	T1	T3	T4p	T4pp	T4ppp	Amp	watt
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.5179	528.46	51.81
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.5179	528.46	51.81
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.6131	521.36	50.43
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.6131	521.36	50.43

รูปที่ 6.11 ผลการคำนวณของกรณีแยกคิดแต่ละท่อ (Separate Circuit)

6.2. จำนวน โดยคิดผลกระทบของแต่ละท่อ โดยไปที่ Calculate>Multi Circuits หรือคลิกที่ปุ่ม  หรือสามารถเปลี่ยนสลับไปมาด้วยปุ่ม  และ 

Lamda1p	Lamda1pp	T1	T3	T4p	T4pp	T4ppp	Amp	watt
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.5179	528.46	51.81
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.5179	528.46	51.81
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.6131	521.36	50.43
0.0577	0	.2586	.0904	.5881	.0333	2.6131	521.36	50.43

รูปที่ 6.12 ผลการคำนวณของกรณีคิดผลกระทบของทั้งระบบ (Multi-Circuits)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ผลการคำนวณและวิเคราะห์

#### 7.1.ผลการคำนวณ

##### 7.1.1.การคำนวณโดยคิตวงจรเดียว (Separate Circuit)

เงื่อนไขในการทดสอบ

ก. ระบบ 24 kV, 50 Hz

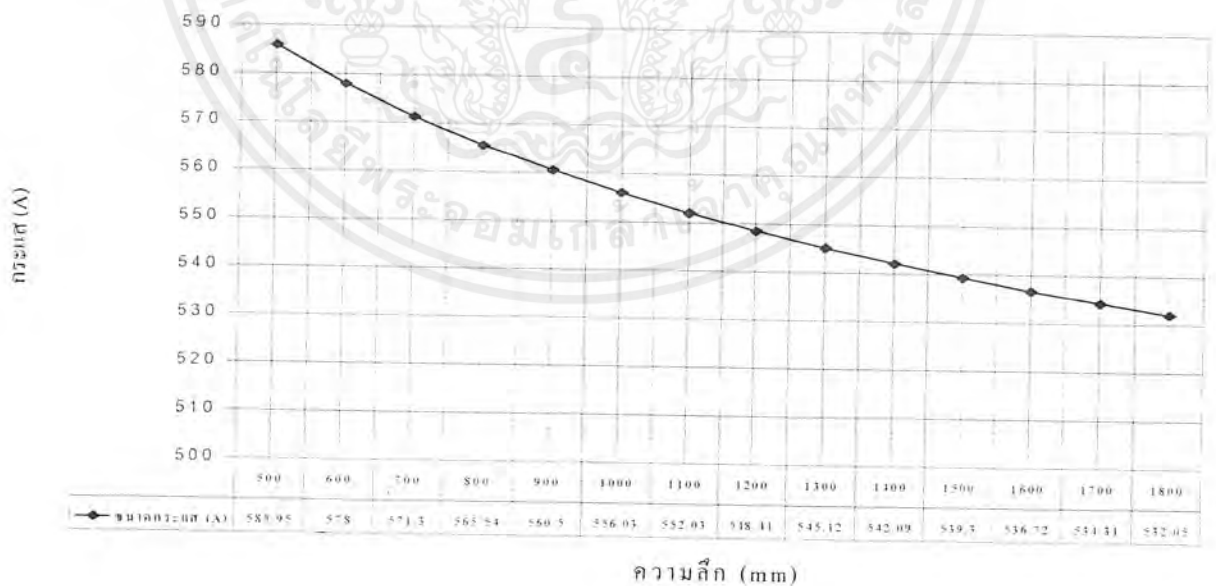
ข. คินมีอุณหภูมิ 30 °C, สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน 1.0 (K.m/W)

ค. ติดตั้งในดักเบงค์ ขนาด 1x1, ความหนาของขอบดักเบงค์ 155 mm, สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน 0.85 (K.m/W), ความลึก 1000 mm

ง. ท่อ FRE 5 "

จ. สายเคเบิล 1 แกน 3 เส้น, ขนาด 400 mm<sup>2</sup>, ติดตั้งแบบทรีฟอยล์, มีการบอนด์แบบโบท เอนด์, อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ 90°C

##### 7.1.1.1.ผลกระทบของความลึก



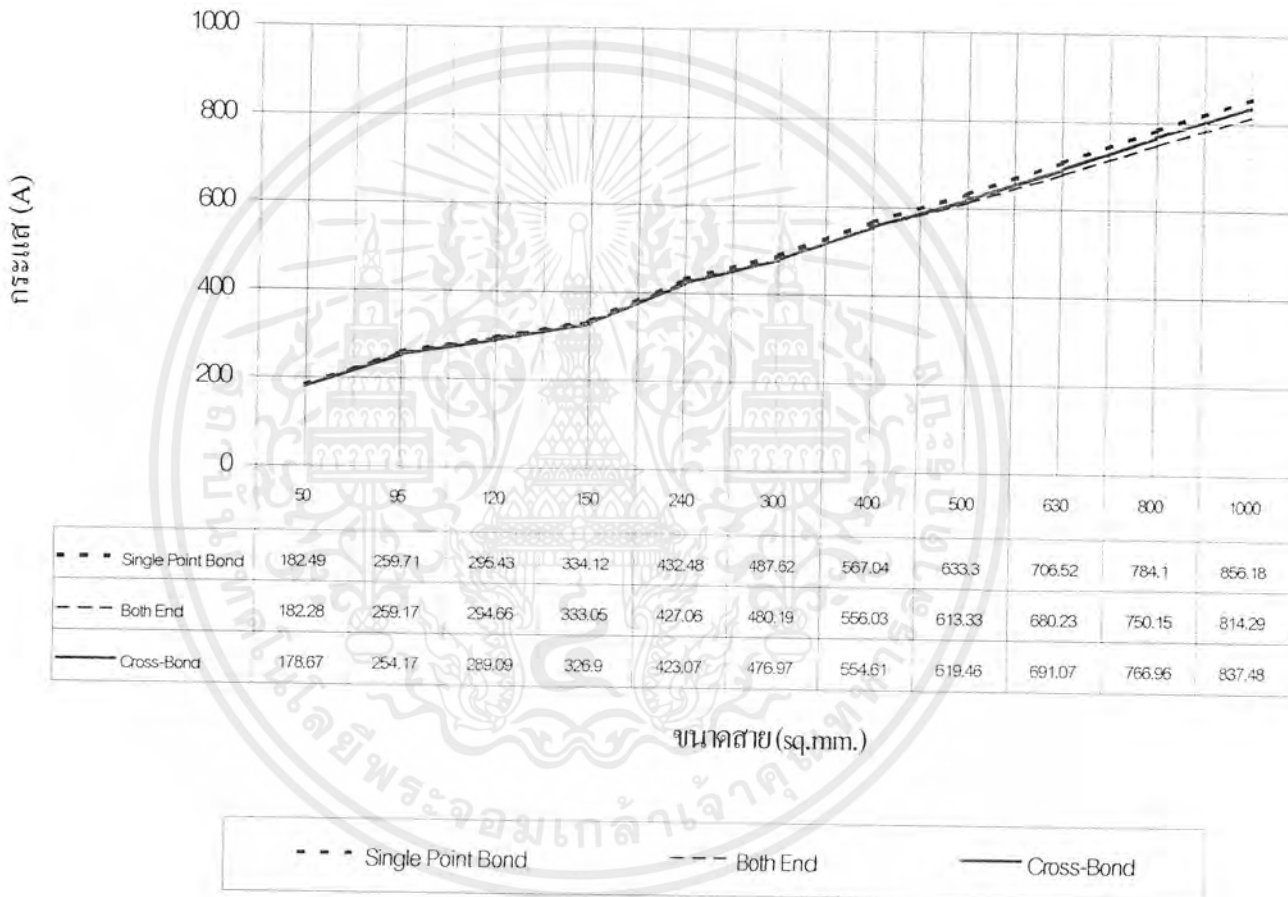
รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.1.2. ผลกระทบของการบอนด์แบบต่างๆ

เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่ให้ความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm และ มีการบอนด์ลักษณะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.2



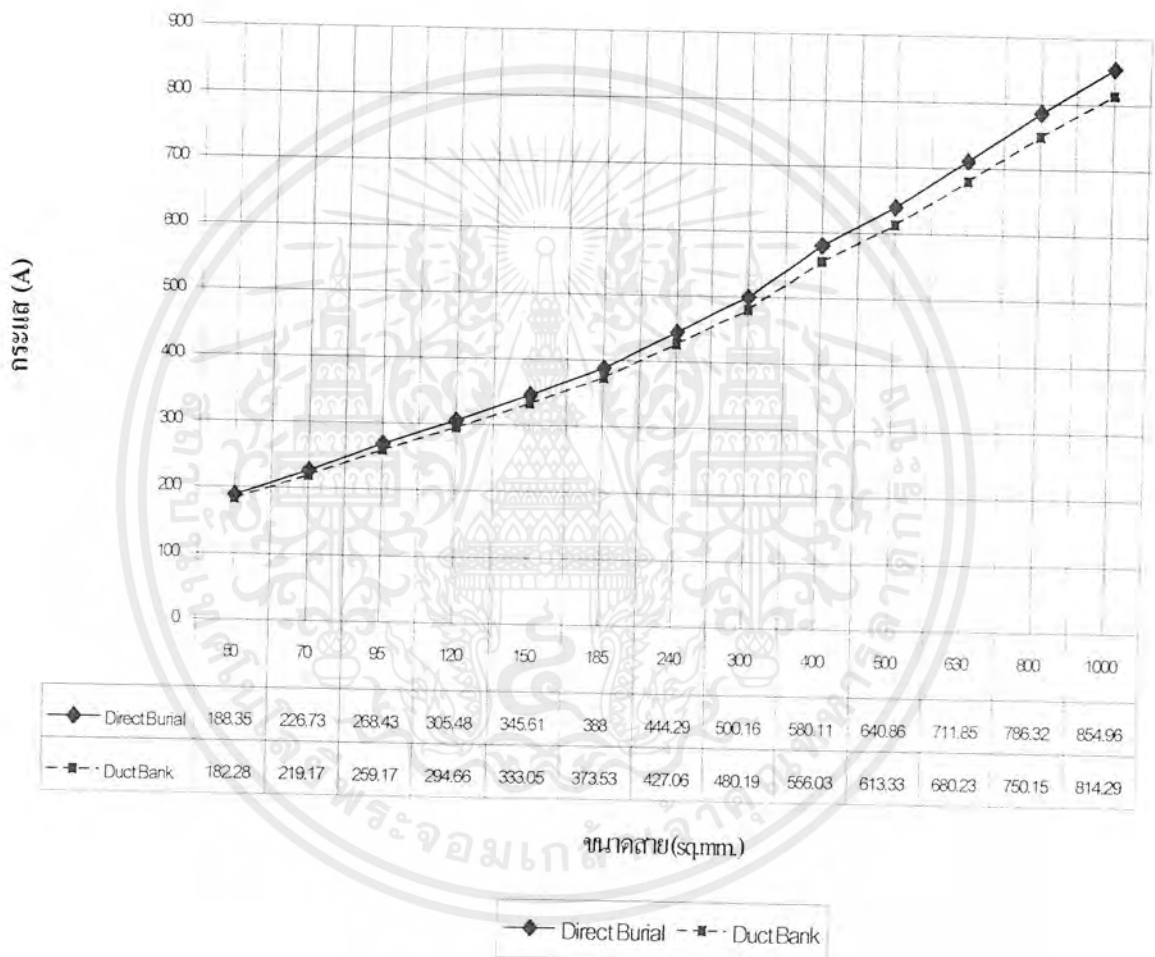
รูปที่ 7.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการบอนด์แบบต่างๆและขนาดกระแสด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.1.1.3. ผลกระทบของการติดตั้งแบบต่างๆ

เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่ให้ความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm และมีลักษณะการติดตั้งเป็นแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.3



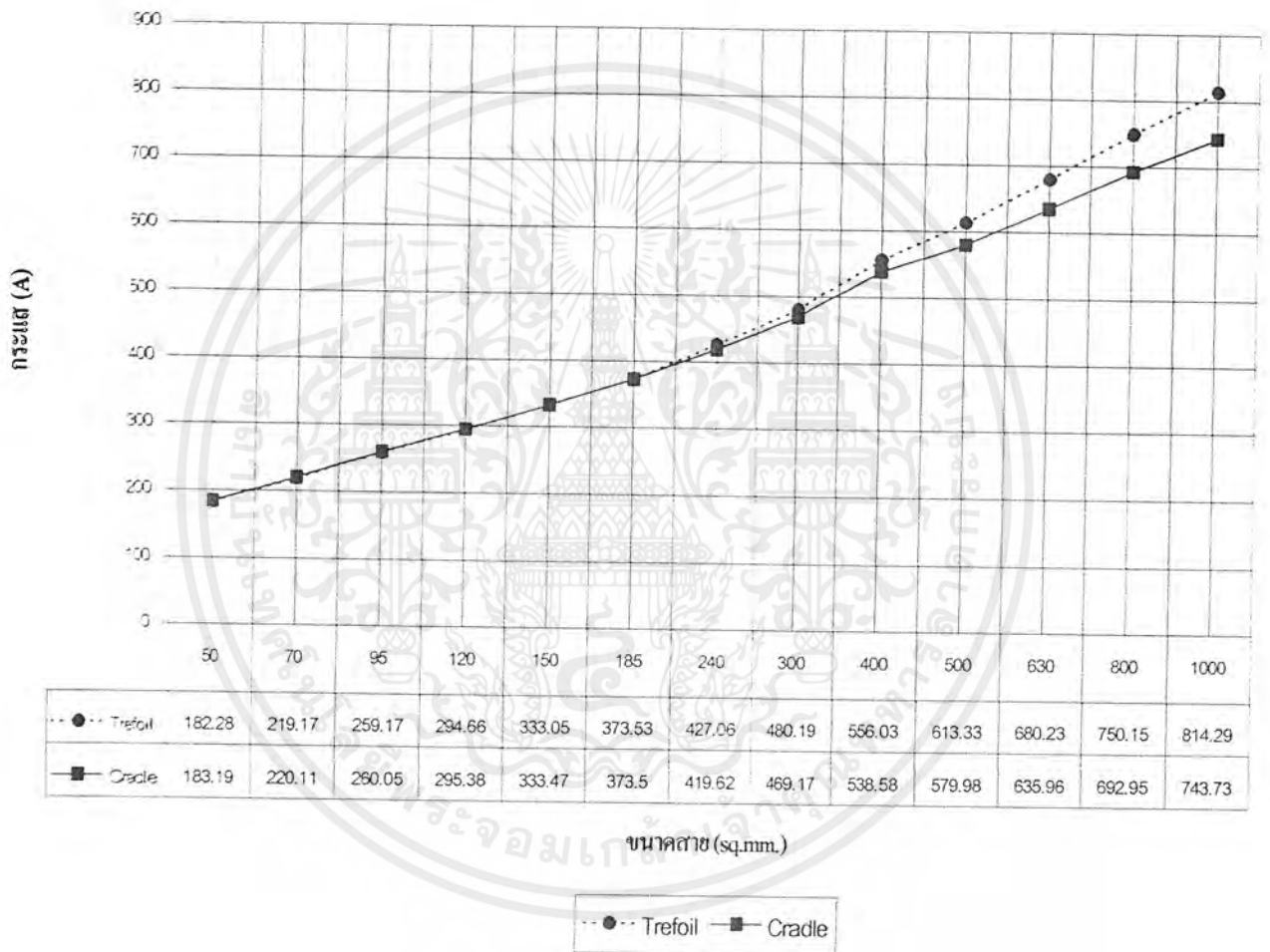
รูปที่ 7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการติดตั้งแบบต่างๆ และขนาดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 7.1.1.4. ผลกระทบของการวางสายเคเบิลแบบต่างๆ

เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่ให้ความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm และ ลักษณะการวางสายเคเบิลแบบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการวางสายเคเบิลแบบต่างๆและขนาดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

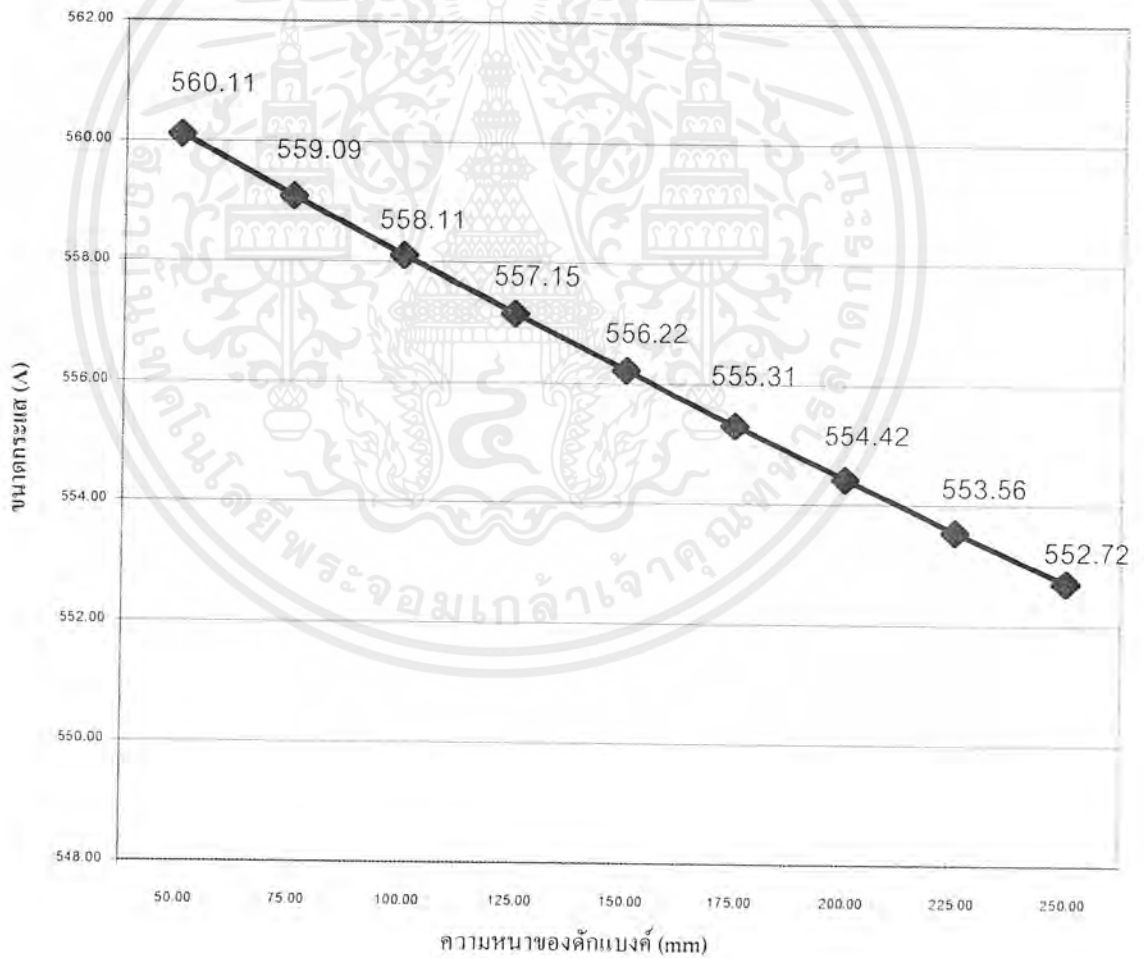
### 7.1.1.5. ผลกระทบของความหนาของขอบดักเบงค์

เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่ให้ความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm และ เพิ่มความหนาของดักเบงค์ตามตารางที่ 7.1

ความหนา (mm)	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	175.00	200.00	225.00	250.00
ขนาดกระแส (A)	560.11	559.09	558.11	557.15	556.22	555.31	554.42	553.56	552.72
%กระแสที่เปลี่ยนไป	-	0.182%	0.175%	0.172%	0.167%	0.164%	0.160%	0.155%	0.152%

ตารางที่ 7.1 ผลกระทบของความหนาของขอบดักเบงค์



รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของขอบดักเบงค์และขนาดกระแส

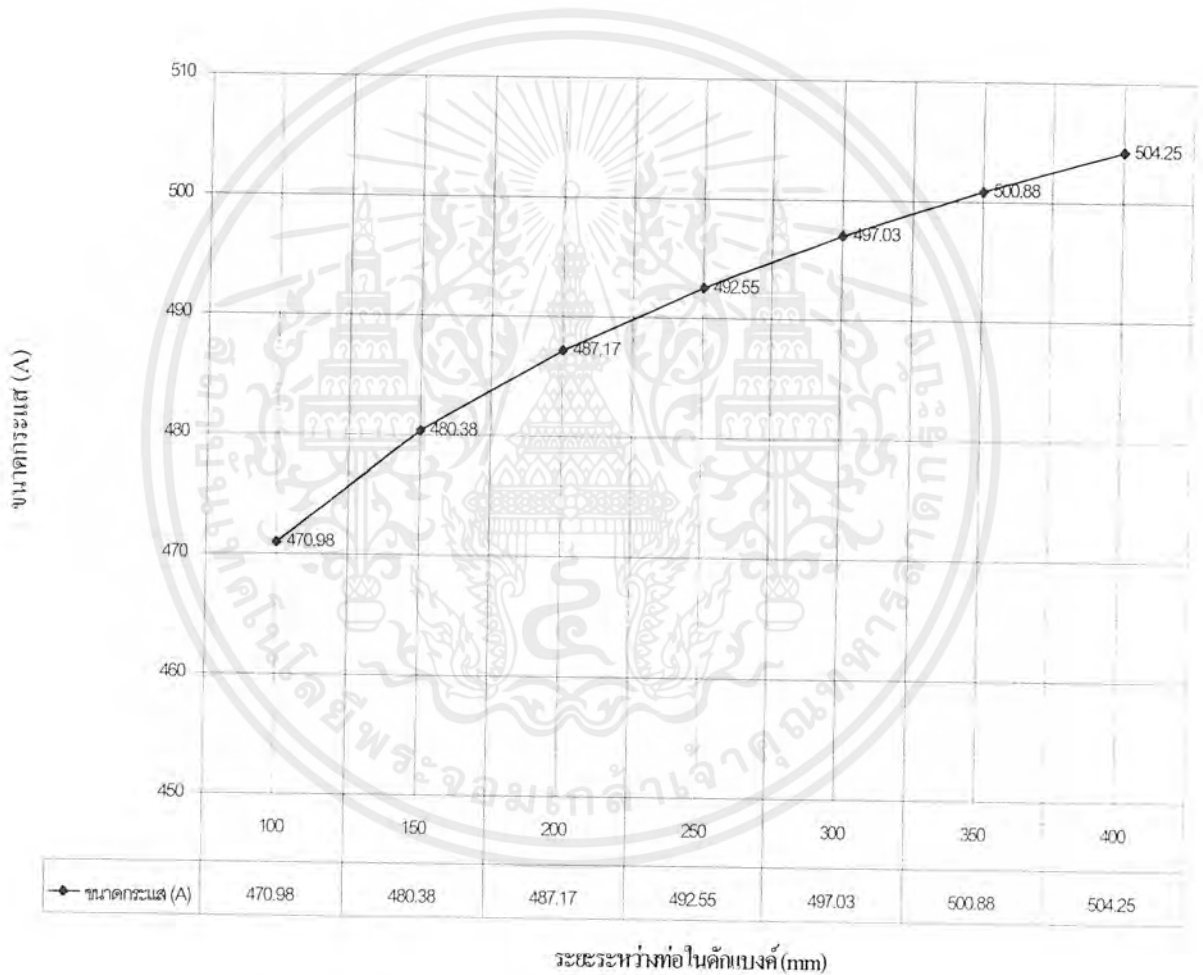
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.1.2. การคำนวณโดยคircuitทั้งระบบ (Multi-Circuits)

### 7.1.2.1. ผลกระทบของระยะระหว่างท่อในดักเบงค์

เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่ให้ความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm ใช้ดักเบงค์ 2x1 และมีระยะห่างระหว่างท่อ ตามรูปที่ 7.7



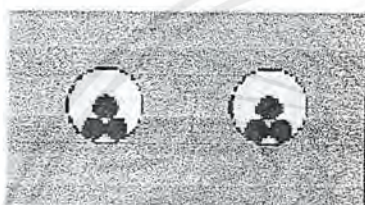
รูปที่ 7.6 กราฟความสัมพันธ์ระยะห่างท่อในดักเบงค์ กับขนาดของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

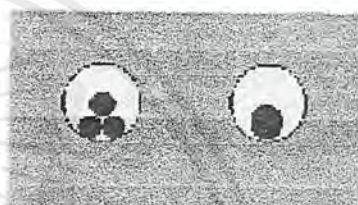
### 7.1.2.2. ผลกระทบของวงจรวงข้างเคียงเมื่อใช้สายเคเบิล 3 สายและ 1 สาย

เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่มีความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm ใช้ดักเบงค์ 2x1 โดยทดลองให้ดักทางซ้ายเป็น 1 แคน 3 เส้น และให้ดักทางขวาเป็น 1 แคน 3 เส้น, 1 แคน 1 เส้น ตามลำดับ โดยดูผลเฉพาะที่ตำแหน่งที่ 1 โดยไม่สนใจผลของตำแหน่งที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.7 (ก) ติดตั้งแบบสายเคเบิล 1 แคน 3 เส้นทั้ง 2 ดัก (ข) ติดตั้งแบบสายเคเบิล 1 แคน 3 เส้นในดักที่ 1 และแบบ 1 แคน 1 เส้น ในดักที่ 2

	รูป 7.7 (ก)	รูป 7.7 (ข)	% ที่เพิ่มขึ้น
ขนาดกระแสน้ำของตำแหน่งที่ 1	493.04	542.45	10.03

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบผลกระทบของวงจรวงข้างเคียงเมื่อใช้สายเคเบิล 3 สายและ 1 สาย

### 7.1.2.3. ผลกระทบของสายเคเบิลที่ติดตั้งในตำแหน่งริมและตำแหน่งกลางของดักเบงค์

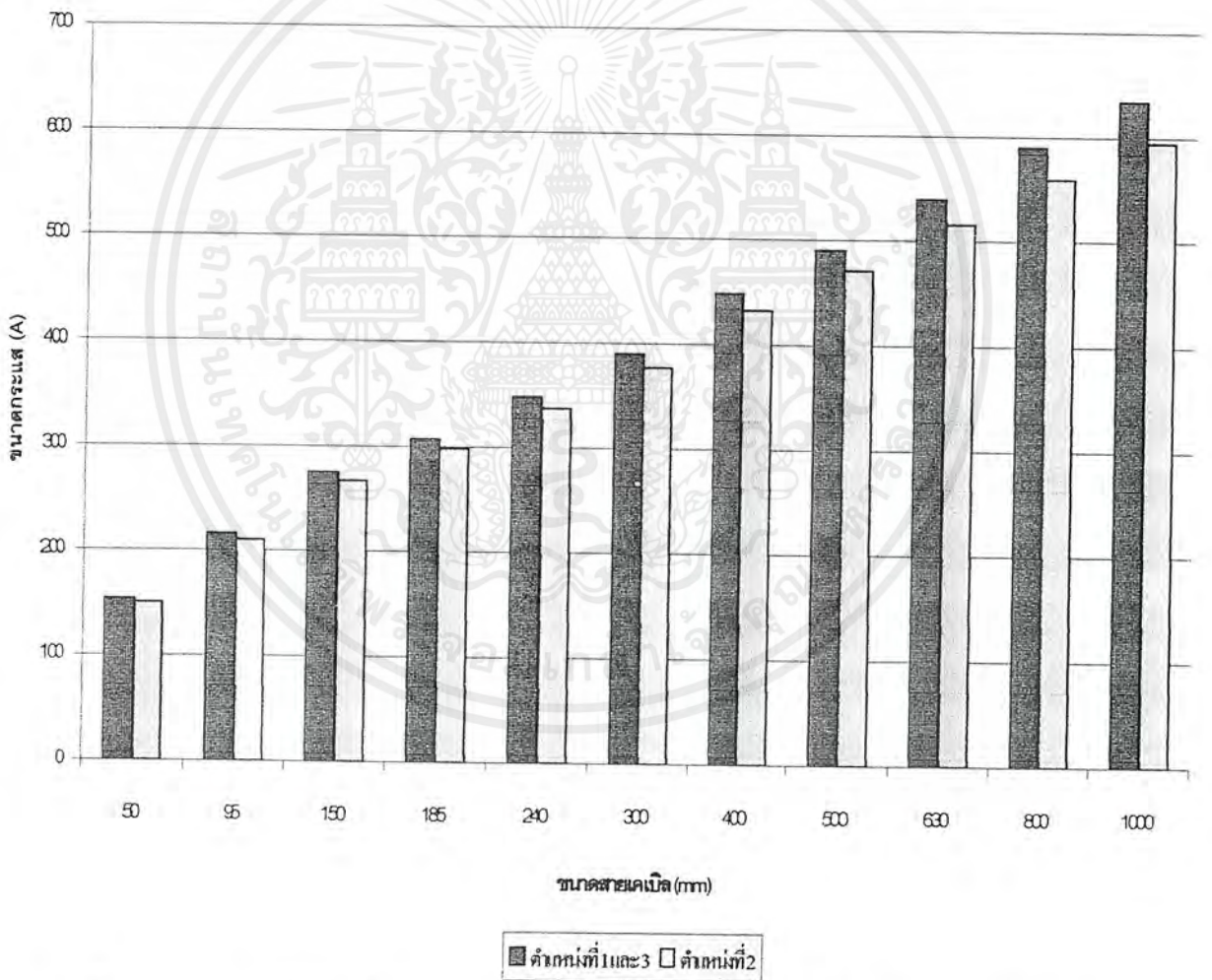
เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่ให้ความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm ใช้ดักเบงค์ 3x1 แล้วเปลี่ยนแปลงขนาดของค้วนำในทุกตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000
Pos 1&3	153.4	183.4	215.8	244.3	275	307.1	348.7	390	448.1	490.7	540.1	590.3	634.6
Pos 2	149.7	178.9	210.2	237.8	267.4	298.3	337.9	377.2	432	471.1	515.8	559.4	595.1
% ที่ลดลง	2.41%	2.50%	2.59%	2.67%	2.77%	2.88%	3.08%	3.27%	3.60%	3.99%	4.50%	5.24%	6.24%

ตารางที่ 7.3 เปรียบเทียบขนาดของกระแสของสายเคเบิลที่ติดตั้งในตำแหน่งริมและตำแหน่งกลางของดักเบงค์



รูปที่ 7.8 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสของสายเคเบิลที่ติดตั้งในตำแหน่งริมและตำแหน่งกลางของดักเบงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.2.4. เปรียบเทียบผลการคำนวณกับมาตรฐานของกฟน. (ติดตั้งแบบในคักเบงค์)  
เงื่อนไขในการทดสอบ

เหมือนกับหัวข้อ 7.1.1 แต่ให้ความลึกอยู่ที่ระดับ 1000 mm ใช้คักเบงค์ 4x6 ท่อ A/C ขนาดต่างๆตามมาตรฐานกฟน. เพื่อเปรียบเทียบขนาดกระแสภายใต้เฟลคเตอร์ที่ เหมือนกันให้มากที่สุด ตามตารางที่ 7.4 โดยเลือกแสดงให้ดูเฉพาะผลของสายเคเบิลขนาด 400 mm<sup>2</sup>

ขนาดสายเคเบิล	70	120	240	400	800
ขนาดท่อ (นิ้ว)	4	4	4.5	5.5	5.5

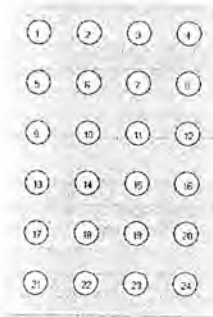
ตารางที่ 7.4 การเลือกท่อขนาดต่างๆตามขนาดของสายเคเบิล เมื่อมีสายเคเบิลในท่อ 3 เส้น

Position	MEA.	Separate	Multi	
			A	%
1	252	413.34	256.28	1.70%
2	252	413.34	252.49	0.19%
3	252	413.34	252.49	0.19%
4	252	413.34	256.28	1.70%
5	252	409.92	245.48	-2.59%
6	252	409.92	241.05	-4.35%
7	252	409.92	241.05	-4.35%
8	252	409.92	245.48	-2.59%
9	252	407.13	239.24	-5.06%
10	252	407.13	234.16	-7.08%
11	252	407.13	234.16	-7.08%
12	252	407.13	239.24	-5.06%

Position	MEA.	Separate	Multi	
			A	%
13	252	404.78	235.98	-6.36%
14	252	404.78	231.03	-8.32%
15	252	404.78	231.03	-8.32%
16	252	404.78	235.98	-6.36%
17	252	402.76	235.67	-6.48%
18	252	402.76	231.27	-8.23%
19	252	402.76	231.27	-8.23%
20	252	402.76	235.67	-6.48%
21	252	400.99	238.16	-5.49%
22	252	400.99	234.79	-6.83%
23	252	400.99	234.79	-6.83%
24	252	400.99	238.16	-5.49%

ตารางที่ 7.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับมาตรฐานของกฟน.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.9 ตำแหน่งของเคเบิลในดักเบงค์ 4x6

## 7.2. การวิเคราะห์

### 7.2.1. การวิเคราะห์ผลการคำนวณโดยคircuit เดี่ยว (Separate Circuit)

#### 7.2.1.1. ผลกระทบของความลึกต่อขนาดกระแส

จากรูปที่ 7.1 จะเห็นว่าเมื่อความลึกมากขึ้นจะทำให้ขนาดกระแสที่ยอมรับได้ในสายเคเบิลลดลง เนื่องจากเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานทางความร้อนของส่วนที่อยู่นอกท่อ ( $T_a$ ) เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งดูได้จากสมการในบทที่ 4

#### 7.2.1.2. ผลกระทบของการบอนด์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 7.2 จะเห็นว่าการบอนด์แบบต่างๆ จะไม่ค่อยมีผลต่อขนาดกระแสที่ยอมรับได้ในสายเคเบิลมากนัก ในสายเคเบิลที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น ผลกระทบในส่วนนี้จะเห็นชัดขึ้น

#### 7.2.1.3. ผลกระทบของการติดตั้งแบบต่างๆ

จากรูปที่ 7.3 จะเห็นว่า การติดตั้งแบบฝังดิน โดยตรงจะรับขนาดของกระแสได้มากกว่าแบบติดตั้งในดักเบงค์ เพราะจะระบายความร้อนได้ดีกว่า

#### 7.2.1.4. ผลกระทบของการวางสายเคเบิลแบบต่างๆ

จากรูปที่ 7.4 จะเห็นว่าเมื่อขนาดของสายเคเบิลมากขึ้น การวางสายแบบทริฟอยล์ จะรับกระแสได้มากกว่าแบบครีเดิล

#### 7.2.1.5. ผลกระทบของความหนาของขอบดักเบงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.5 และตารางที่ 7.1 จะเห็นว่าเมื่อความหนาของขอบค้ำเบงค์เพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดกระแสลดลง เนื่องจากระบายความร้อนได้น้อยลง แต่จะไม่ค่อยมีผลกระทบมากนัก ดังจะสังเกตได้จาก %การเปลี่ยนแปลงของกระแส ซึ่งเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (ไม่ถึง 0.2%)

## 7.2.2. การวิเคราะห์ผลการคำนวณโดยคircuitวงจรทั้งระบบ (Multi-Circuits)

### 7.2.2.1. ผลกระทบของระยะระหว่างท่อในคircuitเบงค์

จากรูปที่ 7.6 จะเห็นว่าเมื่อระยะระหว่างท่อเพิ่มมากขึ้น จะทำให้รับกระแสได้มากขึ้นด้วย เนื่องจากจะมีผลกระทบจากวงจรอื่นน้อยลง

### 7.2.2.2. ผลกระทบของวงจรข้างเคียงเมื่อใช้สายเคเบิล 3 สายและ 1 สาย

จากรูปที่ 7.7 และ ตารางที่ 7.2 จะเห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบขนาดกระแสของตำแหน่งที่ 1 ระหว่างรูป (ก) และ รูป (ข) จะพบว่า รูป (ข) มีขนาดกระแสมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก ตำแหน่งที่ 2 ในรูป (ข) มีปริมาณความร้อนที่ออกมาน้อยกว่า ตำแหน่งที่ 2 ในรูป (ก)

### 7.2.2.3. ผลกระทบของสายเคเบิลที่ติดตั้งในตำแหน่งริมและตำแหน่งกลางของคircuitเบงค์

จากรูปที่ 7.8 และ ตารางที่ 7.3 จะเห็นว่า เคเบิลที่อยู่ตรงกลางจะมีขนาดกระแสน้อยกว่าอีกสองตำแหน่งที่อยู่ริม ก็เพราะว่าเคเบิลที่อยู่ตรงกลางจะถูกรบกวนจากความร้อนที่ออกจากเคเบิลในตำแหน่งริม โดยมีระยะห่างที่น้อยกว่า จึงสามารถสรุปเป็นแนวโน้มที่ว่า เคเบิลที่อยู่ตรงกลางจะมีอุณหภูมิแทรกสอดจากวงจรอื่นมากที่สุด

### 7.2.2.4. เปรียบเทียบผลการคำนวณกับมาตรฐานของกฟน. (ติดตั้งแบบในคircuitเบงค์)

จากตารางที่ 7.2 จะเห็นว่าค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมแบบหลายวงจร (Multi-Circuits) จะมีค่าน้อยกว่าแบบวงจรเดี่ยว (Separate) เนื่องจากจะนำผลกระทบของวงจรข้างเคียงมาคำนวณด้วย และค่าที่คิดแบบหลายวงจรจะใกล้เคียงกับมาตรฐานของกฟน.

## บทที่ 8

### บทสรุป

#### 8.1.สรุปผล

โครงการนี้เป็นการศึกษาการคำนวณหาค่ากระแสที่ยอมรับได้ของสายเคเบิลใต้ดิน โดยหลักการคำนวณจากมาตรฐาน IEC เป็นหลัก รวมทั้งนำงานวิจัยและหนังสือต่างมาประกอบการพิจารณา แล้วนำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการประมวลผลจากพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่เราป้อนเข้าไป ซึ่งเกี่ยวข้องกับการติดตั้ง เช่น ชนิดและขนาดของสายเคเบิล, ชนิดของการติดตั้ง, สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของวัสดุต่างๆ ของระบบ เป็นต้น โดยในส่วนของคำนวณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ พิจารณาเฉพาะแต่ละวงจร และพิจารณาทั้งระบบ เพื่อความเหมาะสมและความสะดวกในการใช้งาน

ข้อดีของตัวโปรแกรมนี้คือสามารถใช้ได้กับการติดตั้งหลายรูปแบบเช่น แบบฝังดินโดยตรง, แบบวางในดักเบงค์, การบอนด์แบบต่างๆ เป็นต้น อีกทั้งในการติดตั้งหลายวงจรยังสามารถคำนวณหาขนาดกระแสที่ถูกผลกระทบจากวงจรใกล้เคียงกันได้อีกด้วย ซึ่งถ้าเราทำการคำนวณเองจะใช้เวลานานมาก และอาจสับสนในการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ได้ ในส่วนการแสดงผลสามารถแสดงขนาดกระแส และ พารามิเตอร์ต่างที่เกิดจากการคำนวณได้อีกด้วย เพื่อนำไปช่วยในการวิเคราะห์ห่ออีกต่อหนึ่งได้

จากการที่เราเขียน โปรแกรมและวิเคราะห์ผลมาได้ทำให้เราทราบว่าปัจจัยมากมายที่มีผลกระทบต่อขนาดกระแสที่ยอมรับได้ของสายเคเบิลใต้ดิน ยกตัวอย่างเช่น

- ความลึกเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ ขนาดกระแสลดลง
- ความหนาของขอบดักเบงค์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ ขนาดกระแสลดลง
- ระยะห่างระหว่างท่อร้อยสายเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ ขนาดกระแสเพิ่มขึ้น
- ตำแหน่งในการวางท่อต่างกันในระบบที่มีหลายวงจรจะมีผลทำให้ ขนาดกระแสไม่เท่ากัน โดยที่ตำแหน่งตรงกลางจะได้รับผลจากความร้อนมากที่สุด อาจส่งผลให้กระแสตำแหน่งนี้ลดลงมากกว่าตำแหน่งอื่นได้(ไม่เสมอไป อาจมีจากปัจจัยอื่นมากระทบได้เช่น ความลึก)

แต่ในการปฏิบัติงานจริงยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอีกหลายอย่างที่อาจมีผลกระทบต่อขนาดกระแส เช่น การงอสาย, ความลึกที่ไม่เท่ากัน, ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ดิน เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถนำมาคำนวณ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาจึงยังไม่สามารถนำ

ใช้งานจริงได้อย่างสมบูรณ์แบบ แต่ก็สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบได้ในหลายๆกรณี อีกทั้งยังสามารถนำไปตรวจสอบระบบที่ติดตั้งไปแล้วได้ด้วย

## 8.2. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

- 1) สำหรับการใช้งาน โปรแกรม ผู้ใช้ต้องมีความรู้ด้านการออกแบบสายใต้ดินอยู่บ้าง เพราะแฟคเตอร์ต่างๆที่ต้องป้อนเข้าไปนั้น ส่วนใหญ่เป็นศัพท์เทคนิค
- 2) ฐานข้อมูลที่ใช้ใน โปรแกรมจะอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC และมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งอาจไม่ตรงกับข้อมูลจริงในการติดตั้ง ทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณอาจคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงควรพัฒนาโปรแกรมให้มีฐานข้อมูลที่มากขึ้น เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณ
- 3) โปรแกรมนี้ยังมีข้อจำกัดคือจะพิจารณาเฉพาะกรณีกระแสต่อเนื่อง (Continuous Current) ในสถานะคงตัวมีโหลดแฟคเตอร์ 100% ไม่สามารถคิดในกรณีสถานะทรานเซียนท์หรือสถานะฉุกเฉิน (Emergency Current) ได้ ซึ่งหากต้องการคำนวณในส่วนนี้ก็ต้องศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม ซึ่งเป็นคณิตศาสตร์ขั้นสูง เพื่อนำมาพัฒนาโปรแกรมให้มีประสิทธิภาพและประโยชน์ใช้สอยเพิ่มขึ้น
- 4) โครงสร้างของสายที่ใช้ในการคำนวณเป็นสายเคเบิลที่มีฉนวนเป็น XLPE ซึ่งมีทั้ง 1 แกน และ 3 แกน และเนื่องจากสายเคเบิลที่ใช้งานส่วนใหญ่ไม่มีอาร์เมอร์ (ซึ่งนิยมใช้ในงานเดินสายเคเบิลใต้น้ำ) โปรแกรมจึงตัดการคำนวณในส่วนนี้ทิ้ง แต่หากเราต้องการให้โปรแกรมสามารถคำนวณในการเดินสายเคเบิลใต้น้ำด้วย จะต้องเพิ่มเติมการคำนวณในส่วนนี้เข้าไปด้วย
- 5) จากข้อมูลสายเคเบิลที่มีการเปิดเผยจากบริษัทผู้ผลิตไม่เพียงพอ จึงทำให้โปรแกรมสามารถคำนวณได้เพียง สายเคเบิลแรงสูง 12 kV, 24 kV และ 36 kV ไม่รวมไปถึง สายแรงสูงพิเศษอื่นๆได้
- 6) สำหรับกรณีที่ระบบมีจำนวนท่ามาก จะทำให้การคำนวณขนาดกระแสที่ถูกผลกระทบจากวงจรอื่นใช้เวลานาน เพราะต้องมีการคำนวณซ้ำหลายรอบเพื่อให้ขนาดกระแสที่ได้เสถียร
- 7) ในส่วนแสดงผลของการคำนวณเป็นรูปตารางอาจสร้างความสับสนให้แก่ผู้ที่ไม่ค่อยคุ้นเคยกับงานออกแบบสายใต้ดินได้ สำหรับการปรับปรุงในส่วนนี้ให้เข้าใจง่ายขึ้น ควรจะใช้ความรู้ด้านการเขียน โปรแกรมขั้นสูงมาเขียนคอมไพเลอร์พิเศษขึ้น เพื่อให้แสดงผลควบคู่ไปกับรูปภาพที่แสดงลักษณะการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) ในการออกแบบงานจริงการศึกษาเพียงแค่การคำนวณหาขนาดกระแสที่ยอมรับได้ในสายเคเบิลนั้นอาจไม่เพียงพอเนื่องจากปัจจัยทางด้านราคาก็เป็นส่วนสำคัญที่เราต้องนำมาพิจารณาเพื่อออกแบบงานให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อความต้องการและงบประมาณที่มี
- 9) โปรแกรมสามารถคำนวณสำหรับการติดตั้งหลายวงจร ได้มากที่สุด 9x9 วงจร ซึ่งในการใช้งานจริงมักจะมีจำนวนวงจรมีน้อยกว่านี้ แต่หากต้องการจะคำนวณก็สามารถทำได้โดยการแก้โปรแกรมซึ่งทำได้ไม่ยาก
- 10) แพลตฟอร์มต่างๆที่โปรแกรมกำหนดไว้จะเป็นค่าที่ใช้งานโดยทั่วไป ซึ่งจะกำหนดไว้เป็นช่วงหรือค่าที่ใช้งานบ่อย ดังต่อไปนี้
- ระยะระหว่างท่อ 100 – 400 mm
  - ความหนาของขอบดักเบงค์ 50 – 250 mm
  - ความลึกของระบบ 400 – 2000 mm
  - ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดักเบงค์ 0.5 – 1.2 K.m / W
  - ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดิน 0.8 – 1.2 K.m / W
  - อุณหภูมิของดิน 0 – 60 °C
  - อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ 70 – 90 °C
  - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 400, 500, 630, 800 และ 1000 mm<sup>2</sup>
  - ความถี่ของระบบที่ใช้ 50 Hz และ 60 Hz
  - บังคับให้ติดตั้งในท่อโดยจำนวนหลักไม่เกิน 3 เท่าของจำนวนแถว และจำนวนแถวไม่เกิน 3 เท่าของจำนวนหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก.**

**ตารางและกราฟที่ใช้ในการคำนวณ**

วัสดุ	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Resistivity, $\rho$ )  ohm . m ที่ 20 °C	สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ (Temperature coefficient, $\alpha_{20}$ )  ต่อ K ที่ 20 °C
<b>ก. ตัวนำ (Conductors)</b>		
ทองแดง (Copper)	$1.7241 \times 10^{-8}$	$3.93 \times 10^{-3}$
อลูมิเนียม (Aluminium)	$2.8264 \times 10^{-8}$	$4.03 \times 10^{-3}$
<b>ข. ซีท และอาร์เมอร์ (Sheaths and armour)</b>		
ตะกั่ว หรืออัลลอย (Lead or lead alloy)	$21.4 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-3}$
เหล็ก (Steel)	$13.8 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-3}$
บรอนซ์ (Bronze)	$3.5 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-3}$
สแตนเลส (Stainless steel)	$70 \times 10^{-8}$	มีค่าน้อยมาก (Negligible)
อลูมิเนียม (Aluminium)	$2.84 \times 10^{-8}$	$4.03 \times 10^{-3}$

หมายเหตุ - ค่าของตัวนำทองแดงได้มาจาก IEC 28

ค่าของตัวนำอลูมิเนียม ได้มาจาก IEC 889

ตารางที่ ก.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้  
(Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used)

ชนิดของตัวนำ	อากาศแห้ง และ อิมตัว หรือไม่	$K_s$	$K_p$
ราวค์, สเตรนค์ (Round, Stranded)	ใช่	1	0.8
ราวค์, สเตรนค์ (Round, Stranded)	ไม่ใช่	1	1
ราวค์, คอมแพ็ค (Round, Compact)	ใช่	1	0.8
ราวค์, คอมแพ็ค (Round, Compact)	ไม่ใช่	1	1
ราวค์, เซ็กเมนทัล (Round, Segmental)	-	0.435	0.37
ฮอลโลว์, เฮลิคอล สเตรนค์ (Hollow, Helical Stranded)	ใช่	-	0.8
เซคเตอร์-เซพ (Sector-shaped)	ใช่	1	0.8
เซคเตอร์-เซพ (Sector-shaped)	ไม่ใช่	1	1

ตารางที่ ก.2 สกิน และพริอกซิมีตี เอฟเฟค (Skin and Proximity effects)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของสายเคเบิล	$\epsilon$	$\tan\delta$
<i>เคเบิลฉนวนกระดาษ (Cable insulated with impregnated paper)</i>		
แบบโซลิด (Solid type, fully- impregnated, pre- impregnated or mass-impregnated non- draining)	4	0.01
แบบมีน้ำมัน (Oil- filled, self-contained) พิกัด $U_0 = 36$ kV	3.6	0.0035
แบบมีน้ำมัน (Oil- filled, self-contained) พิกัด $U_0 = 87$ kV	3.6	0.0033
แบบมีน้ำมัน (Oil- filled, self-contained) พิกัด $U_0 = 160$ kV	3.5	0.0030
แบบมีน้ำมัน (Oil- filled, self-contained) พิกัด $U_0 = 220$ kV	3.5	0.0028
แบบอัดน้ำมัน, ไปป์ไทป์ (Oil- filled, pipe-type)	3.7	0.0045
แบบอัดก๊าซภายนอก (External gas- pressure)	3.6	0.0040
แบบอัดก๊าซภายใน (Internal gas- pressure)	3.4	0.0045
<i>สายเคเบิลที่มีฉนวนชนิดอื่นๆ (Cable with other kind of insulation)</i>		
ยางบิวทิล (Butyl rubber)	4	0.050
EPR ในสายเคเบิลที่พิกัดไม่เกิน 18/30 (36) kV	3	0.020
EPR ในสายเคเบิลที่พิกัดสูงกว่า 18/30 (36) kV	3	0.005
PVC	8	0.1
PE ( HD และ LD )	2.3	0.001
XLPE ในสายเคเบิลที่พิกัดไม่เกิน 18/30 (36) kV แบบอันฟิลด์ (unfilled)	2.5	0.004
XLPE ในสายเคเบิลที่พิกัดสูงกว่า 18/30 (36) kV แบบอันฟิลด์ (unfilled)	2.5	0.001
XLPE ในสายเคเบิลที่พิกัดสูงกว่า 18/30 (36) kV แบบฟิลด์ (filled )	3.0	0.005

ตารางที่ ก.3 ค่าของเพอร์มิททิวิตีที่เกี่ยวข้องและค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียของฉนวนในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงดันสูง-แรงดันปานกลาง ที่ค่าพิกัดสูง (Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high voltage and medium-voltage cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ – ค่าความสูญเสียของฉนวนจะนำมาคิดเมื่อค่า  $U_0$  มากกว่าหรือเท่ากับค่าต่อไปนี้

ชนิดของสายเคเบิล	$U_0$ kV
เคเบิลฉนวนกระดาษ (Cable insulated with impregnated paper)	
แบบโซลิด (Solid type)	38
ฉนวนน้ำมันและฉนวนก๊าซ	63.5
ฉนวนชนิดอื่นๆ	
บิวทิล รับเบอร์ (Butyl rubber)	18
EPR	63.5
PVC	6
PE (HD และ LD)	127
XLPE แบบอันฟิลด์(unfilled)	127
XLPE แบบฟิลด์(filled)	63.5

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ค่าของเพอร์มิทวิตีที่เกี่ยวข้องและค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียของฉนวนในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงดันสูง-แรงดันปานกลาง ที่ความถี่พิกัดสูง (Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high voltage and medium-voltage cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistivity, $\rho_T$ ) K. m/W
<i>ชนิดของฉนวน (Insulation materials)</i>	
ฉนวนกระดาษในสายเคเบิลแบบโซลิด (Paper insulation in solid type cables)	6.0
ฉนวนกระดาษในสายเคเบิลแบบน้ำมัน (Paper insulation in oil-filled cables)	5.0
ฉนวนกระดาษในสายเคเบิลอัดแรงดันก๊าซภายนอก (Paper insulation in cables wit external gas pressure)	5.5
ฉนวนกระดาษในสายเคเบิลอัดแรงดันก๊าซภายใน (Paper insulation in cables wit internal gas pressure)	
ก. ก่อนอิมตัด	5.5
ข. อิมตัด	6.0
PE	3.5
XLPE	3.5
PVC – ในสายเคเบิลที่พิกัดไม่เกิน 3 kV	5.0
PVC – ในสายเคเบิลที่พิกัดสูงกว่า 3 kV	6.0
EPR – ในสายเคเบิลที่พิกัดไม่เกิน 3 kV	3.5
EPR – ในสายเคเบิลที่พิกัดสูงกว่า 3 kV	5.0
ยางบิวทิล (Butyl rubber)	5.0
ยาง (rubber)	5.0
<i>ชนิดของส่วนที่ห่อหุ้มเพื่อป้องกัน (Protective coverings)</i>	
สารที่เป็นเส้นใย (Compounded jute and fibrous material)	6.0
มียางปกป้อง 2 ด้าน (Rubber sandwich protection)	6.0
โพลีคลอโรพรีน (Polychloroprene)	5.5
PVC – ในสายเคเบิลที่พิกัดไม่เกิน 35 kV	5.0

ตารางที่ ก.4 สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

(Thermal resistivities of materials)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistivity, $\rho_T$ ) K. m/W
PVC – ในสายเคเบิลที่พิกัดสูงกว่า 35 kV	6.0
PVC / บิทูเมน (bitumen) ของคอนลือกัดซีท	
แบบอลูมิเนียม	6.0
PE	3.5
<i>ชนิดของท่อที่ติดตั้ง (Material for ducts installations)</i>	
คอนกรีต (Concrete)	1.0
ไฟเบอร์ (Fiber)	4.8
เอสเบสตอส (Asbestos)	2.0
เอิร์ทเทนแวร์ (Earthenware)	1.2
PVC	6.0
PE	3.5

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ  
(Thermal resistivities of materials)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะการติดตั้ง	U	V	Y
ในท่อโลหะ (metallic conduit)	5.2	1.4	0.011
ในท่อไฟเบอร์ในอากาศ (fiber duct in air)	5.2	0.83	0.006
ในท่อไฟเบอร์ในคอนกรีต (fiber duct in concrete)	5.2	0.91	0.010
ในเอสเบสทอสซีเมนต์ (asbestos cement)			
ก. เดินท่อในอากาศ	5.2	1.2	0.006
ข. เดินท่อในคอนกรีต (concrete)	5.2	1.1	0.011
สายเคเบิลชนิดอัดก๊าซในไปป์ (Gas pressure cable in pipe)	0.95	0.46	0.0021
สายเคเบิลไปป์ไทป์ ชนิดอัดน้ำมัน (Oil pressure pipe-type cable)	0.26	0.0	0.0026
ท่อพลาสติก (Plastic ducts)	ไม่พิจารณา	ไม่พิจารณา	ไม่พิจารณา
ท่อเอิร์ทเทนแวร์ (Earthenware ducts)	1.87	0.28	0.0036

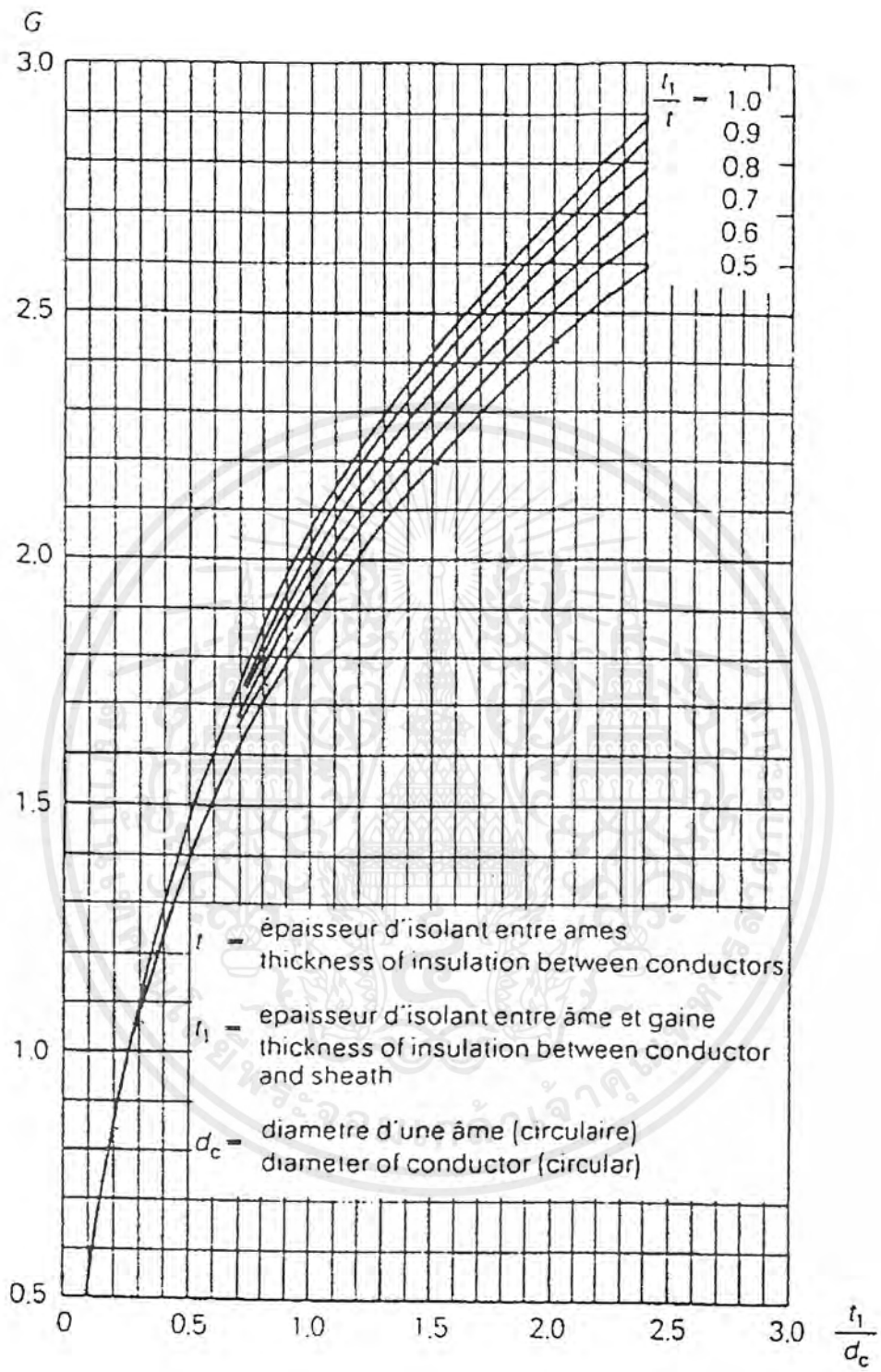
ตารางที่ ก.5 ค่าคงที่ U, V, Y (Values of Constants U, V, Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดิน (Thermal resistivity, $\rho_c$ ) K. m/W
ออสเตรเลีย	1.2
ออสเตรีย	0.7 - 1.2
แคนาดา	0.6 - 1.2
ฟินแลนด์	1.0
ฝรั่งเศส	0.85 - 1.2
เยอรมัน	1.0
อิตาลี	1.0
ญี่ปุ่น	0.4 - 1.2
เนเธอร์แลนด์	0.5 - 0.8
นอร์เวย์	1.0
โปแลนด์	0.8
สวีเดน	1.0
สวิตเซอร์แลนด์	1.0 - 1.3
อังกฤษ	1.2
อเมริกา	0.9

ตารางที่ ก.6 สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อนของดินในประเทศต่างๆ  
(Thermal resistivities of materials)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

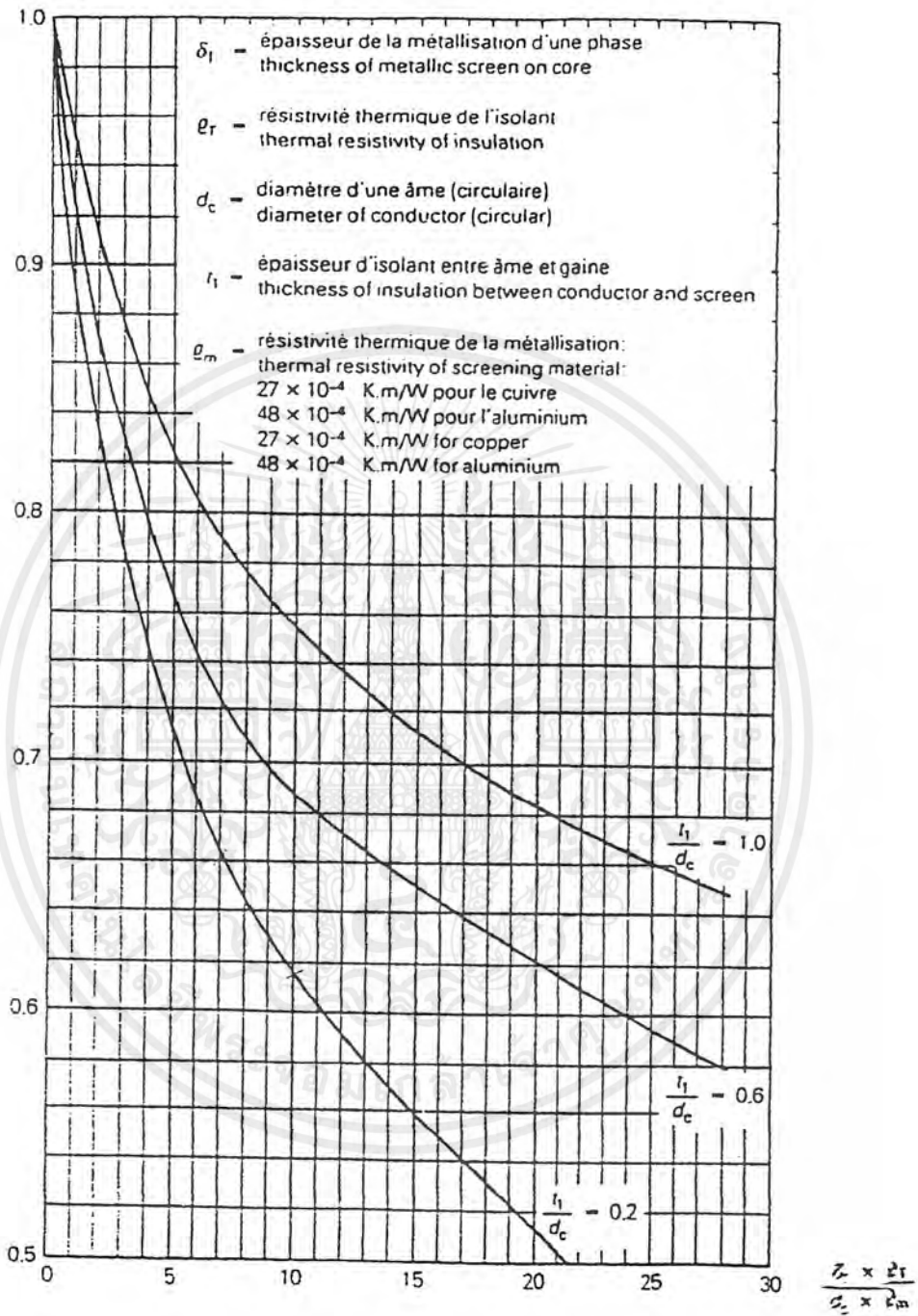


596/๙2

รูปที่ ก.1 แฟคเตอร์ทางเรขาคณิต (Geometric Factor, G) สำหรับสายเคเบิลแบบเบลท์ (Belted Cable) ชนิด 3 แกนที่มีตัวนำเป็นแบบกลม (Circular Conductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Facteur d'écran  $K$   
Screening factor



597/82

รูปที่ ก.2 ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) สำหรับสายเคเบิลแบบสกรีน (Screened Cable) ชนิด 3 แกนที่มีตัวนำเป็นแบบกลม (Circular Conductor) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลที่ไม่มีสกรีน (Unscreened Cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 1 คำนวณหาค่ากระแสที่ยอมรับได้ของสายเคเบิลใต้ดินที่อยู่ในเงื่อนไขสภาวะต่อไปนี้

- ก. ระบบ 24 kV 50 Hz
- ข. ดินอุณหภูมิตั้งที่  $30^{\circ}\text{C}$  สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน  $1.2 \text{ (K.m/W)}$
- ค. ติดตั้งในดักเบงค์ ขนาด  $4 \times 6$  ความหนาของขอบดักเบงค์  $155 \text{ mm}$  สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน  $1.0 \text{ (K.m/W)}$  ลึก  $500 \text{ mm}$
- ง. ท่อ FRE 5 "
- จ. สาย 1 แกน 3 เส้น  $400 \text{ mm}^2$  ติดตั้งแบบทรีฟอยล์ มีการบอนด์แบบ โบท เอนด์ มีอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำคือ  $90^{\circ}\text{C}$

Sol. จากสูตรหลัก

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^2$$

#### I. ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ (AC Resistance of Conductor)

หา  $R$

จาก

$$R = R'(1 + y_s + y_p)$$

แต่

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

ซึ่ง

$$R_0 = \frac{1.02 \times 10^6 \rho_{20}}{S}$$

โดยที่

$$\rho_{20} = 1.72 \times 10^{-8}$$

$$\alpha_{20} = 3.93 \times 10^{-3}$$

$$\theta = 90^{\circ}\text{C}$$

$$S = 400 \text{ mm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า

$$R_0 = \frac{1.02 \times 10^6 (1.72 \times 10^{-8})}{400} = 4.386 \times 10^{-5}$$

จะได้

$$R' = (4.386 \times 10^{-5}) [1 + (3.93 \times 10^{-3})(90 - 20)]$$

เพราะฉะนั้น

$$R' = 5.593 \times 10^{-5}$$

และ

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}$$

ซึ่ง

$$x_s^2 = \frac{8\Pi f}{R'} \times 10^{-7} k_s$$

โดยที่

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$k_s = 1$$

$$R = 5.593 \times 10^{-5}$$

แทนค่า

$$x_s^4 = \left[ \frac{8\Pi f}{5.593 \times 10^{-5}} \times 10^{-7} \times 1 \right]^2 = 5.048$$

จะได้

$$y_s = \frac{5.048}{192 + 0.8(5.048)}$$

เพราะฉะนั้น

$$y_s = 0.026$$

และ

$$y_p = \frac{x_p''}{192 + 0.8x_p''} \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p''}{192 + 0.8x_p''} + 0.27} \right]$$

ซึ่ง

$$x_p^2 = \frac{8\Pi f}{R'} \times 10^{-7} k_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$k_p = 0.8$$

$$R' = 5.593 \times 10^{-5}$$

$$d_c = 22.6$$

$S = \text{external diameter of cable} = D_c$

$$\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} = \frac{3.231}{192 + 0.8(3.231)} = 0.0166$$

$$\left(\frac{dc}{s}\right)^2 = \left(\frac{22.6}{43.56}\right)^2 = 0.269$$

แทนค่า

$$y_p = (0.0166 \cdot 0.269) \left[ (0.312 \cdot 0.269) + \frac{1.18}{0.0166 + 0.27} \right]$$

$$y_p = 0.0188$$

แทนค่า  $R', y_s, y_p$  เพื่อหาค่า  $R$

จะได้

$$R = (5.593 \times 10^{-5}) \cdot (1 + 0.026 + 0.0188)$$

เพราะฉะนั้น

$$R = 5.844 \times 10^{-5}$$

## II. ค่าความสูญเสียของฉนวน (Dielectric loss)

หา  $W_d$

เนื่องจาก  $U_0$  ของระบบ น้อยกว่า  $U_0$  ของตาราง

$$24 \text{ kV} < 63.5 \text{ kV}$$

$$W_d = 0$$

\*จากหมายเหตุใต้ตารางที่ ก.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### III. หาแฟกเตอร์ความสูญเสีย (Loss factor) $\lambda_1, \lambda_2$

หา  $\lambda_1$

จาก 
$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

จาก 
$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{R_s}{x}\right)^2\right)}$$

แต่

$$R_s = \frac{\rho_{20} \cdot 10^6}{\Pi \cdot d \cdot t_s} [1 + \alpha_{20}(\theta_s - 20)]$$

โดยที่

$$\rho_{20} = 1.7241 \times 10^{-8}$$

$$\alpha_{20} = 3.93 \times 10^{-3}$$

$$d = D_s - t_s = 37.7$$

$$t_s = 1.14$$

$$\theta_s = 70^\circ\text{C}$$

แทนค่าหา  $R_s$

$$R_s = \frac{(1.7241 \times 10^{-8}) \times 10^6}{\Pi(37.7)(1.14)} [1 + (3.93 \times 10^{-3})(70 - 20)]$$

เพราะฉะนั้น

$$R_s = 1.53 \times 10^{-4}$$

และ

$$R = 5.844 \times 10^{-5}$$

จาก

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$$

โดยที่

$$\omega = 2\Pi f$$

$$f = 50\text{ Hz}$$

$$S = Dc = 43.56$$

$$d = D_s - t_s = 38.84 - 1.14 = 37.7$$

แทนค่าหา X

จะได้

$$X = 2(2\Pi \times 50) \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2(43.56)}{(37.7)}\right)$$

เพราะฉะนั้น

$$X = 5.263 \times 10^{-5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า  $R_s, R_x$

จะได้

$$\lambda_1' = \frac{1.53 \times 10^{-4}}{5.844 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1 + \left( \frac{1.53 \times 10^{-4}}{5.263 \times 10^{-5}} \right)^2}$$

เพราะฉะนั้น

$$\lambda_1' = 0.277$$

และ

$$\lambda_1'' = 0 \text{ (เนื่องจากเป็น โบท เอนด์)}$$

ดังนั้น

$$\lambda_1 = 0.277 + 0$$

เนื่องจากเคเบิลที่ใช้ ไม่มีอาร์เมอร์

#### IV. ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) $T_1, T_2, T_3, T_4$

หา  $T_1$

จาก

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

โดยที่

$$\rho_T = 3.5$$

$$t_1 = t_i + 1.5$$

$$t_i = 5.5$$

$$t_1 = 5.5 + 1.5 = 7$$

$$d_c = 22.56$$

แทนค่า  $\rho_T, t_1, d_c$

จะได้

$$T_1 = \frac{3.5}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2(7)}{22.56} \right]$$

เพราะฉะนั้น

$$T_1 = 0.269$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา  $T_2$

$$T_2 = 0$$

หา  $T_3$

จาก

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left[ 1 + \frac{2t_s}{D'_a} \right]$$

โดยที่

$$\rho_T = 5.0$$

$$t_3 = t_j + 2.36$$

$$D'_a = D_s = 38.84$$

แทนค่า  $\rho_T, t_3, D'_a$

จะได้

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} (5.0) \ln \left[ 1 + \frac{2(2.36)}{(38.84)} \right]$$

เพราะฉะนั้น

$$T_3 = 0.091$$

หา  $T_4$

จาก

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e}$$

โดยที่

$$U = 5.2$$

$$V = 0.91$$

$$Y = 0.01$$

$$\theta_m = 60^\circ\text{C}$$

$$D_e = 43.56$$

แทนค่า  $U, V, Y, \theta_m, D_e$

จะได้

$$T'_4 = \frac{5.2}{1 + 0.1(0.91 + (0.01 \times 60)) \times 43.56}$$

เพราะฉะนั้น

$$T'_4 = 0.686$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก 
$$T_4'' = \frac{1}{2\Pi} \rho_T \ln \left[ \frac{D_o}{D_d} \right]$$

แทนค่า  $\rho_T, D_o, D_d$

จะได้ 
$$T_4'' = \frac{1}{2\Pi} (4.8) \ln \left[ \frac{131.878}{127} \right]$$

เพราะฉะนั้น 
$$T_4'' = 0.0288$$

หา  $T_4'''$  (สัมผัสนก, ทริฟอยล์)

จาก 
$$T_4''' = \frac{1.5}{\Pi} \rho_T [\ln(2u) - 0.630] + correction$$

ซึ่ง 
$$u = \frac{2L}{D_c}$$

โดยที่ 
$$L = 655$$
  
$$D_c = 43.56$$

จะได้ 
$$u = \frac{2 \times 655}{43.56}$$

เพราะฉะนั้น 
$$u = 30.073$$

$$\rho_T = 1 \text{ (คอนกรีต)}$$

และ

$$Correction = \frac{N}{2\Pi} (\rho_e - \rho_c) \ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$

โดยที่ 
$$N = 3$$

$$\rho_e = 1.2$$

$$\rho_c = 1.0$$

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

โดยที่ 
$$L_G = 1250$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา  $r_b$  ได้จาก

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{y} \cdot \left( \frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left( 1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2}$$

จะได้

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{1050}{1500} \cdot \left( \frac{4}{\pi} - \frac{1050}{1500} \right) \ln \left( 1 + \frac{1500^2}{1050^2} \right) + \ln \frac{1050}{2}$$

$$\ln r_b = 6.505$$

เพราะฉะนั้น

$$r_b = 668.476$$

จะได้

$$u = \frac{1250}{668.476}$$

เพราะฉะนั้น

$$u = 1.87$$

แทนค่า  $N, \rho_e, \rho_c, u$

จะได้

$$\text{Correction} = \frac{3}{2\pi} (1.2 - 1.0) \ln (1.87 + \sqrt{1.87^2 - 1})$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{Correction} = 0.118$$

แทนค่า  $\rho_T, u, \text{Correction}$

จะได้

$$T_4^m = \frac{1.5}{\pi} (1) [\ln(2 \times 30.073) - 0.630] + 0.118$$

เพราะฉะนั้น

$$T_4^m = 1.773$$

จะได้

$$T_4 = 0.686 + 0.0288 + 1.773$$

เพราะฉะนั้น

$$T_4 = 2.4878$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## V. ขนาดกระแสที่ยอมรับได้ในสายเคเบิล (Ampacity)

จาก

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^2$$

แทนค่า

$$R = 5.844 \times 10^{-5}$$

$$\Delta\theta = 60$$

$$W_d = 0$$

$$n = 1$$

$$\lambda_1 = 0.277$$

$$\lambda_2 = 0$$

$$T_1 = 0.269$$

$$T_2 = 0$$

$$T_3 = 0.091$$

$$T_4 = 2.4878$$

$$R = 5.84410^{-5}$$

จะได้

$$I = \left[ \frac{60}{5.844 \times 10^{-5} [0.269 + (1 + 0.277)(0.091 + 2.4878)]} \right]^2$$

เพราะฉะนั้น

$$I = 536.87 \text{ Ampere}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2 คำนวณหาค่า Ampacity ของสายเคเบิลใต้ดินที่อยู่ในสภาวะเหมือนกับตัวอย่างการคำนวณที่ 1 แต่เป็นการติดตั้งแบบแฟลต (Flat Formation) ไม่ทรานสโพสิชัน (not Transposition)

Sol. จากสูตรหลัก

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]$$

I. ความต้านทานของตัวนำ

$$R = 5.844 \times 10^{-5}$$

II. ความสูญเสียของฉนวน

$$W_d = 0$$

III. หา Loss factor  $\lambda_1, \lambda_2$

หา  $\lambda_1$

จาก

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

เนื่องจากเป็นแฟลต, โบท เอนด์ ทำให้  $\lambda_1$  แต่ละเส้นไม่เท่ากัน

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R} \cdot \left[ \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

$$\lambda'_{12} = \frac{R_s}{R} \cdot \left[ \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

โดยที่

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$$

$$X = 5.263 \times 10^{-5}$$

จาก

$$X_m = 2\omega 10^{-7} \ln 2$$

แทนค่า

$$X_m = 4\pi(50) \times 10^{-7} \ln 2$$

เพราะฉะนั้น

$$X_m = 4.355 \times 10^{-5}$$

จะได้

$$P = (5.263 \times 10^{-5}) + (4.355 \times 10^{-5})$$

$$P = 9.618 \times 10^{-5}$$

และ

$$Q = (5.263 \times 10^{-5}) - (4.355 \times 10^{-5})$$

$$Q = 3.811 \times 10^{-5}$$

$R_s$  เท่าเดิมคือ

$$R_s = 1.53 \times 10^{-4}$$

$R$  เท่าเดิมคือ

$$R = 5.844 \times 10^{-5}$$

แทนค่า

$$\lambda'_{11} = \frac{1.53 \times 10^{-4}}{5.844 \times 10^{-5}} \times \left[ \frac{\frac{3}{4} (9.618 \times 10^{-5})^2}{(1.483 \times 10^{-4})^2 + (9.618 \times 10^{-5})^2} + \frac{\frac{1}{4} (3.811 \times 10^{-5})^2}{(1.483 \times 10^{-4})^2 + (9.618 \times 10^{-5})^2} + \frac{2(1.483 \times 10^{-4})(9.618 \times 10^{-5})(3.811 \times 10^{-5})(4.355 \times 10^{-5})}{\sqrt{3} [(1.483 \times 10^{-4})^2 + (9.618 \times 10^{-5})^2] [(1.483 \times 10^{-4})^2 + (3.811 \times 10^{-5})^2]} \right]$$

$$\lambda'_{11} = 0.5943980906$$

$$\lambda'_{12} = \frac{1.53 \times 10^{-4}}{5.844 \times 10^{-5}} \times \left[ \frac{\frac{3}{4} (9.618 \times 10^{-5})^2}{(1.483 \times 10^{-4})^2 + (9.618 \times 10^{-5})^2} + \frac{\frac{1}{4} (3.811 \times 10^{-5})^2}{(1.483 \times 10^{-4})^2 + (9.618 \times 10^{-5})^2} - \frac{2(1.483 \times 10^{-4})(9.618 \times 10^{-5})(3.811 \times 10^{-5})(4.355 \times 10^{-5})}{\sqrt{3} [(1.483 \times 10^{-4})^2 + (9.618 \times 10^{-5})^2] [(1.483 \times 10^{-4})^2 + (3.811 \times 10^{-5})^2]} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda'_{12} = 0.5943980854$$

$$\lambda'_{1m} = \frac{1.53 \times 10^{-4}}{5.844 \times 10^{-5}} \times \frac{(3.811 \times 10^{-5})^2}{(1.483 \times 10^{-4})^2 + (3.811 \times 10^{-5})^2}$$

$$\lambda'_{1m} = 0.153$$

เราเลือกคิที่  $\lambda'_{11}$  เพราะว่าทำให้ได้ค่ากระแสที่น้อยที่สุด

เพราะฉะนั้น

$$\lambda'_1 = 0.5944$$

และ  $\lambda''_1 = 0$  (เนื่องจากเป็น โบท เอนด์)

ดังนั้น  $\lambda_1 = 0.5944 + 0$

$$\lambda_1 = 0.5944$$

เนื่องจากเลเบลที่ใช้ ไม่มีอาเมอร์

$$\lambda_2 = 0$$

IV. สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางความร้อน  $T_1, T_2, T_3, T_4$

$$T_1 = 0.269$$

$$T_2 = 0$$

$$T_3 = 0.091$$

หา  $T_4$

$$\text{จาก } T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

$$T'_4 \text{ เท่าเดิมคือ } T'_4 = 0.686$$

$$T''_4 \text{ เท่าเดิมคือ } T''_4 = 0.0288$$

$$T'''_4 = \rho_r [0.475 \ln(2u) - 0.346] + \text{correction}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$u \geq 5$$

$$\rho_T = 1 \text{ (คอนกรีต)}$$

u เท่าเดิมคือ

$$u = 30.073$$

Correction เท่าเดิมคือ

$$\text{Correction} = 0.118$$

แทนค่า

$$T_4'' = (1)[0.475 \ln(2 \times 30.073) - 0.346] + 0.118$$

จะได้

$$T_4'' = 1.718$$

แทนค่า

$$T_4 = 0.686 + 0.0288 + 1.718$$

เพราะฉะนั้น

$$T_4 = 2.4328$$

#### V. ขนาดกระแสที่ยอมรับได้ในสายเคเบิล

จาก

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า

$$\Delta\theta = 60$$

$$W_d = 0$$

$$n = 1$$

$$\lambda_1 = 0.5944$$

$$\lambda_2 = 0$$

$$T_1 = 0.269$$

$$T_2 = 0$$

$$T_3 = 0.091$$

$$T_4 = 2.4328$$

$$R = 5.844 \times 10^{-5}$$

จะได้

$$I = \left[ \frac{60}{5.844 \times 10^{-5} [0.269 + (1 + 0.59)(0.091 + 2.4878)]} \right]^{\frac{1}{2}}$$

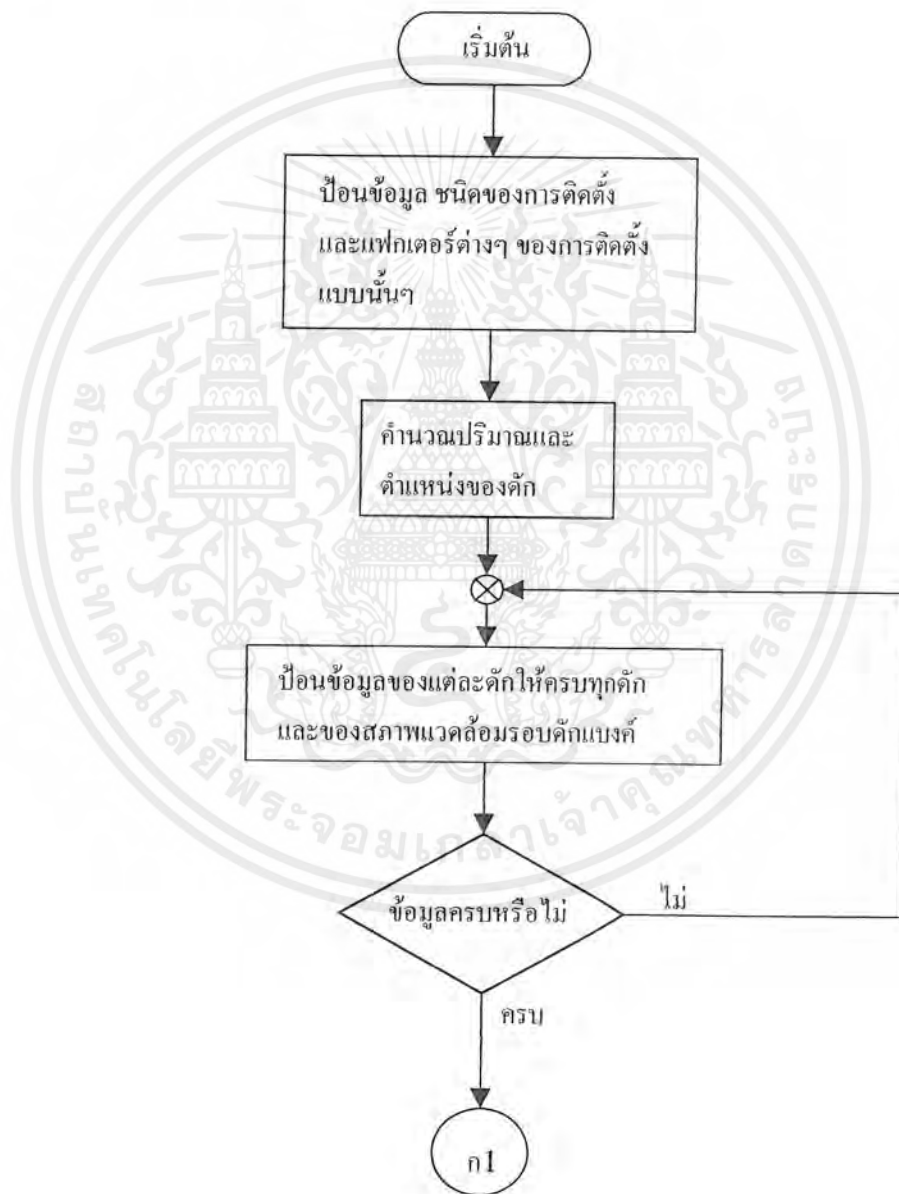
เพราะฉะนั้น

$$I = 489.04 \text{ Ampere}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

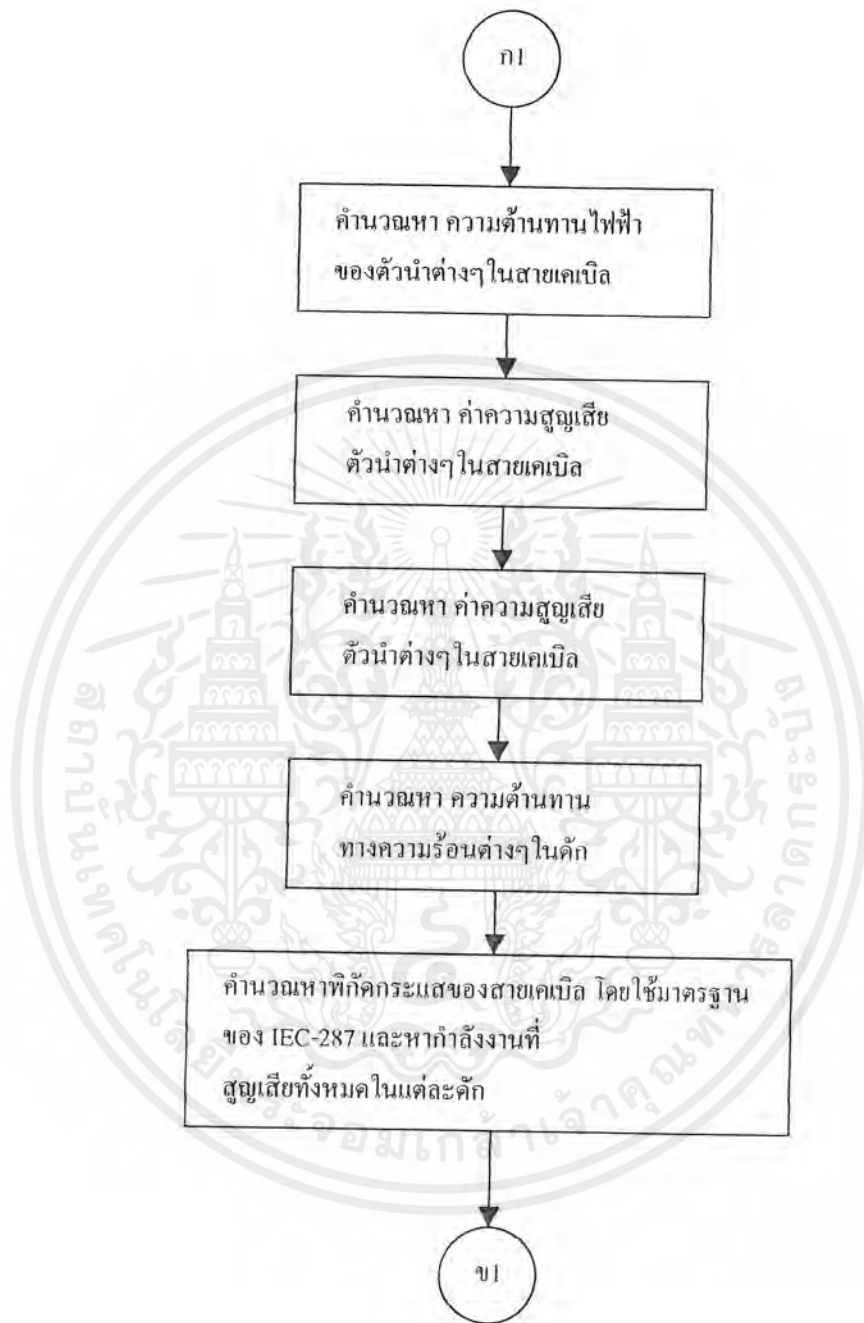
ภาคผนวก ค.  
โพลีชาร์ทของการคำนวณ

ค. 1 โพลีชาร์ทของการคำนวณแบบระบบวงจรเดี่ยว (Separate Circuit)



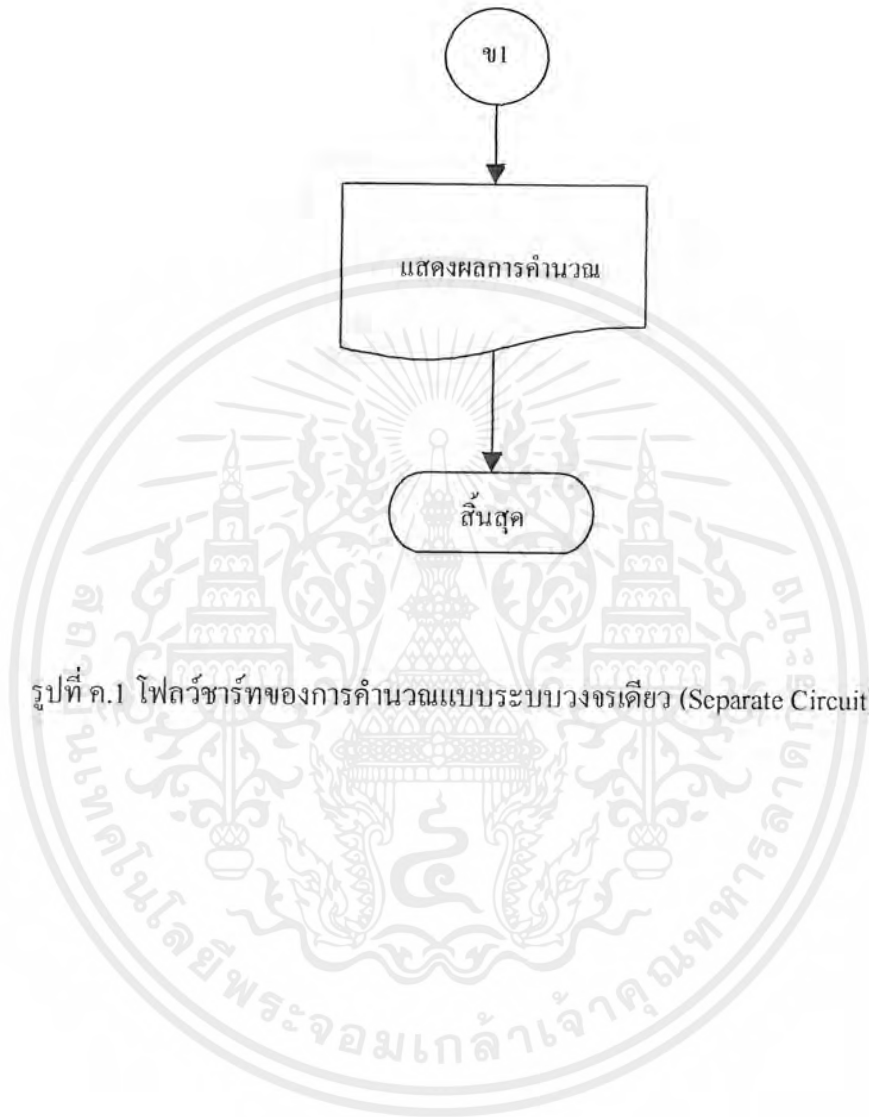
รูปที่ ค.1 โพลีชาร์ทของการคำนวณแบบระบบวงจรเดี่ยว (Separate Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



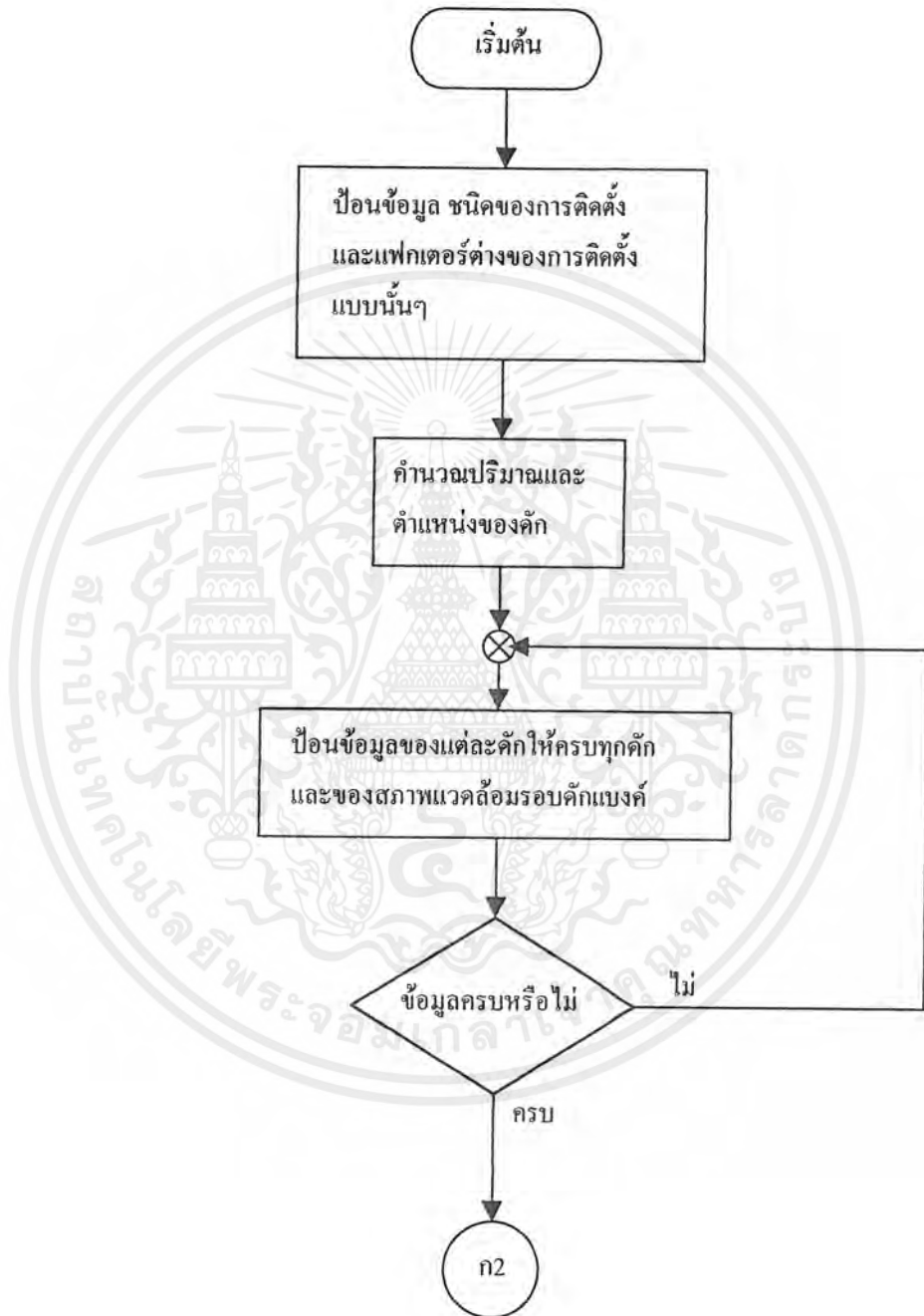
รูปที่ ก.1 โพลีชาร์ทของการคำนวณแบบระบบวงจรเดี่ยว (Separate Circuit) (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



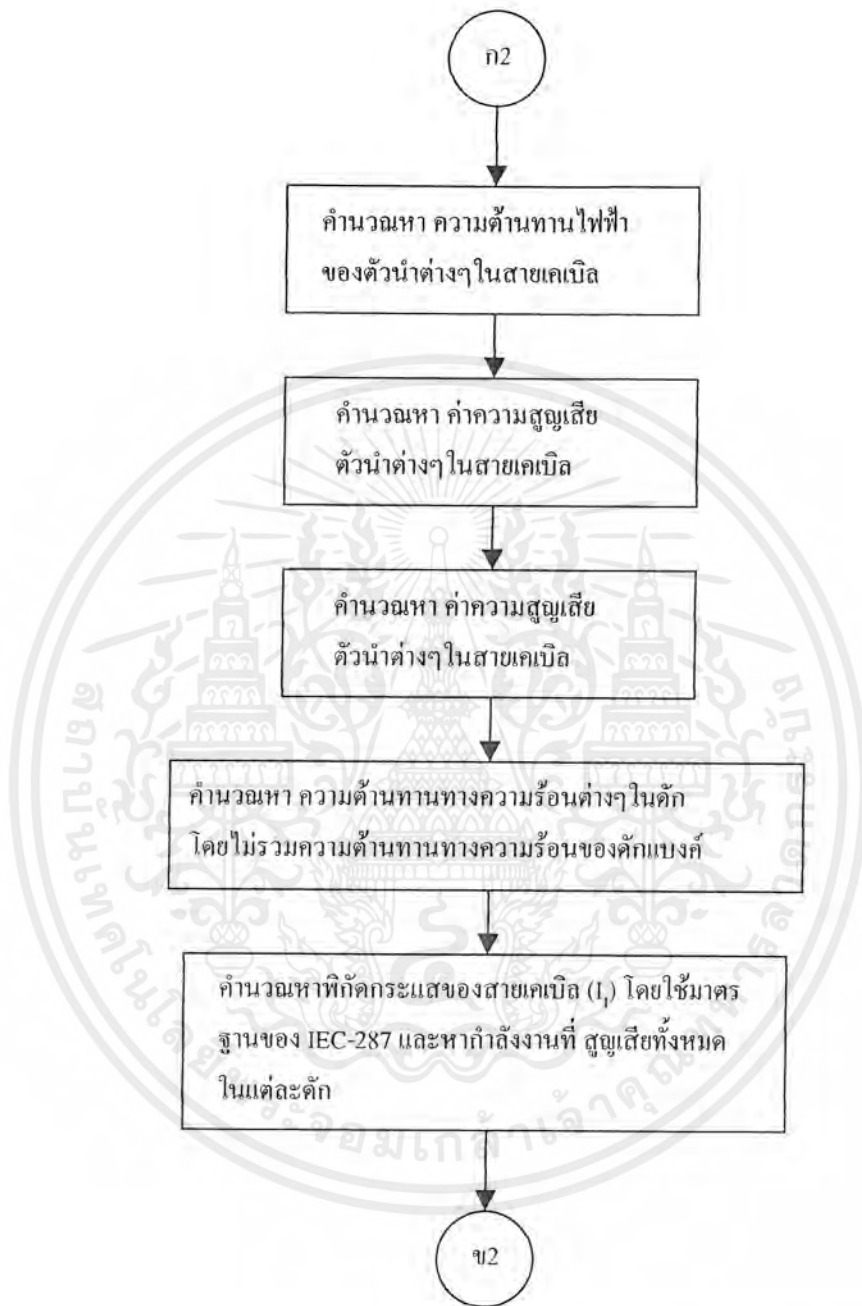
รูปที่ ค.1 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณแบบระบบวงจรเดียว (Separate Circuit) (ต่อ)

## ค. 2 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณแบบระบบหลายวงจร (Multi-Circuits)



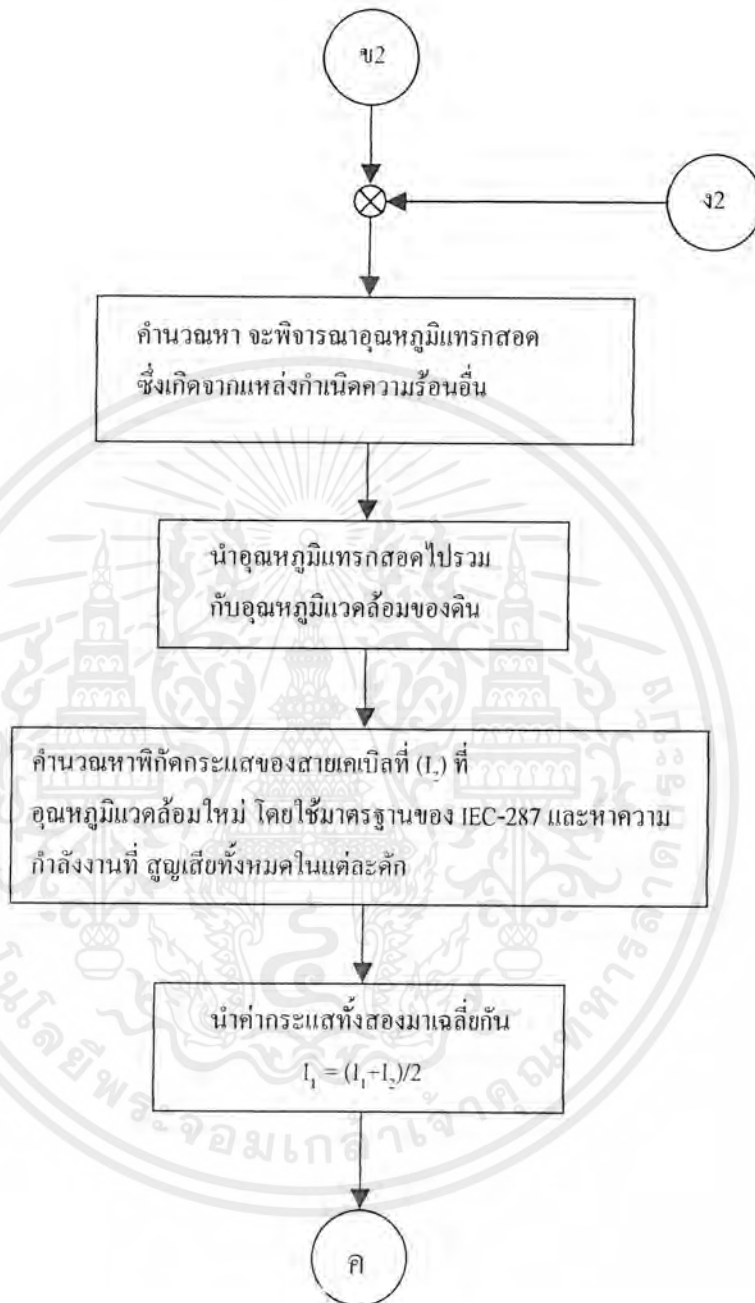
รูปที่ ค.2 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณแบบระบบหลายวงจร (Multi-Circuits)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



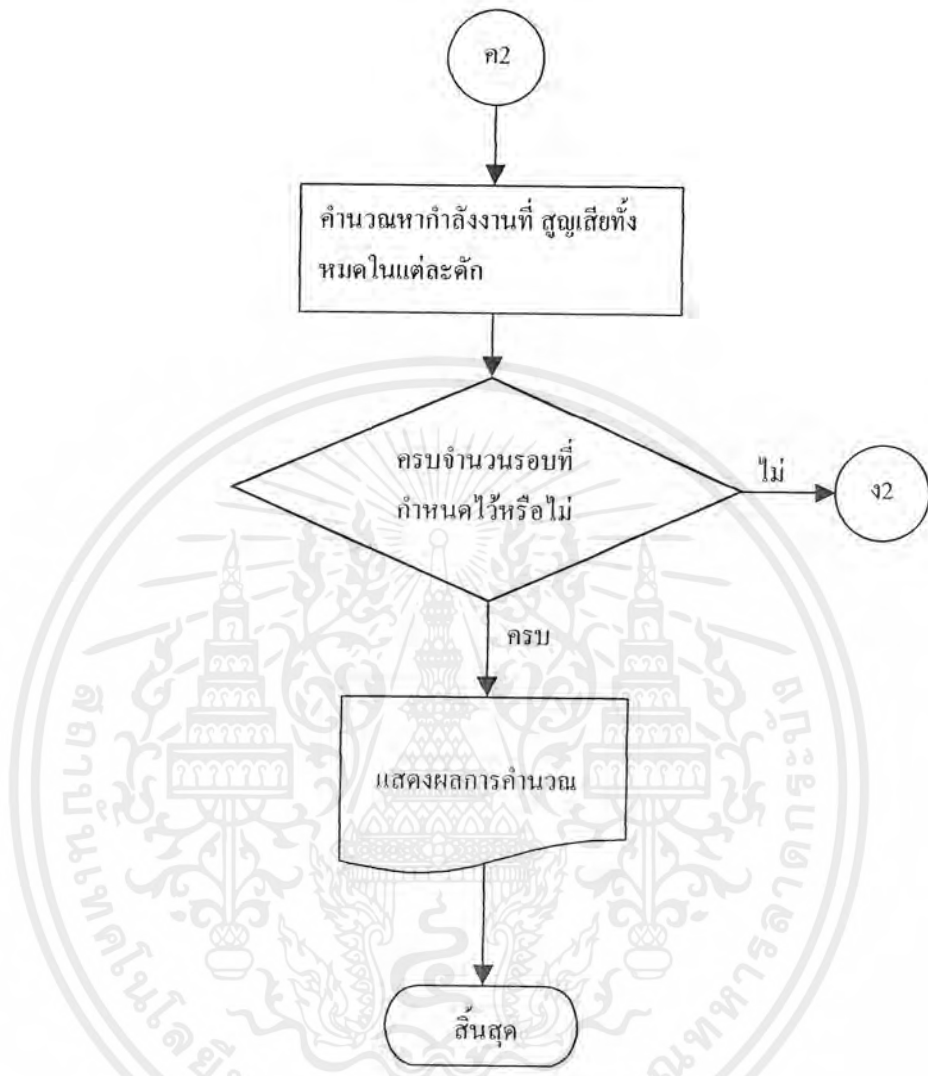
รูปที่ ค.2 โพลีชาร์ทของการคำนวณแบบระบบหลายวงจร (Multi-Circuits) (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณแบบระบบหลายวงจร (Multi-Circuits) (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณแบบระบบหลายวงจร (Multi-Circuits) (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณบุคคลที่มีรายนามข้างล่างนี้ไว้เป็นอย่างสูง เพราะท่านเหล่านี้เป็นผู้ที่ช่วยให้ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

1. รองศาสตราจารย์ สุทธิ บรรจงจิตร  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำความรู้ทางวิชาการ และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ กับโครงการนี้
2. อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยหาข้อมูลที่จำเป็น ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ จนปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี
3. อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยให้คำปรึกษา วิจารณ์ชิ้นงาน และคำแนะนำต่างๆ ในหลายๆเรื่อง
4. แผนกออกแบบสายไฟฟ้าใต้ดิน  
ฝ่ายออกแบบด้านไฟฟ้าและงานวิศวกรรมโยธา การไฟฟ้านครหลวงเขตคลองเตย โดยเฉพาะ คุณอิทธิโรจน์ บุญประเสริฐศรี ที่คอยให้คำแนะนำ และให้ข้อมูลทางเทคนิคเกี่ยวกับการออกแบบสายไฟฟ้าใต้ดินอย่างดี
5. ผู้ปกครองของพวกเราทั้ง 3 คน  
ที่คอยเอื้ออำนวยทุกสิ่งทุกอย่างเพื่อให้งานสำเร็จด้วยความเรียบร้อย
6. พี่เตย  
นักศึกษาปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่แลกเปลี่ยนความรู้และให้ข้อมูลที่จำเป็นเกี่ยวกับสายไฟฟ้าใต้ดิน
7. เพื่อนๆ ทุกคน  
ที่ให้คำปรึกษาในหลายๆ เรื่อง อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกในการทำงาน และบิ๊จจี้อีกหลายๆอย่าง
8. คุณเขาวลัทธิ ช่างโซติ  
พยาบาลแผนกสูติกรรมพิเศษ โรงพยาบาลรามาริบัติ ที่เป็นกำลังใจให้กับใครบางคนในกลุ่มนี้ สำหรับการงานที่ยากลำบาก และต้องอาศัยความทุ่มเททั้งกายและใจ เพื่อทำงานชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J.H.Neher and M.H.McGrath, "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems", AIEE Transactions (Power Apparatus and Systems), vol. 76, pp 752-772, October 1957.
- [2] IEC, "IEC Standard Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% Load Factor)", IEC Standard 287 1982.
- [3] George J. Anders, "Rating of Electric Power Cables", vol.1, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [4] Jurgen O.C. Kansog and Matthew T. Brown, "Ampacity Calculations for Mixed Underground Cable Systems in Same Ductbank", IEEE Transactions (Transmission and Distribution), pp 535-543, April 1994.
- [5] M.A. El-kady and D.J. Horrocks, "Extended Values for Cables in Duct Banks", IEEE Transactions (Power Apparatus and System), vol. PAS-104, no. 8, pp1958-1962, august 1985.
- [6] Sally M. Sellers and W.Z. Black, "Refinements to the Neher – McGrath Model for Calculating the Ampacity of Underground Cables", IEEE Transactions (Power Delivery), vol.11, no.1, pp12-30, January 1996.
- [7] Edwin B. Kurtz and Thomas M. Shoemaker, "The Lineman's and Cableman's Handbook", vol.8, McGraw-Hill, New York, 1992.
- [8] IEC, "IEC Standard Extruded Solid Dielectric Insulated Power Cables for Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV", IEC Standard 502 1994.

## อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศุภี บรรจงจิตร

อ.ชาย ชมภูอินไหว

อ.เชาว์ ชมภูอินไหว

## ผู้จัดทำโครงการ



นายทวี นำพาเจริญ

ที่อยู่ : 903/13 ซ.49 ถ.พระราม 3

ต.บางโพธิ์พวง เขตยานนาวา

กทม. 10120

โทร : 2943274

E-mail : ukawee@santaland.com



นายคนูวัศ แซ่โจ้ว

ที่อยู่ : 293/66-68 ถ.ตลาดใหม่

ต.ตลาด อ.เมือง

จ.สุราษฎร์ธานี 84000

โทร : (077) 273618

E-mail : danuwat\_tee@thaimail.com



นายดลภูวี่ เก็งวินิจ

ที่อยู่ : 38/13 หมู่ที่ 13

ต.บางแก้ว อ.บางพลี

จ.สมุทรปราการ 10540

โทร : 3167392

E-mail : joseph\_it@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้