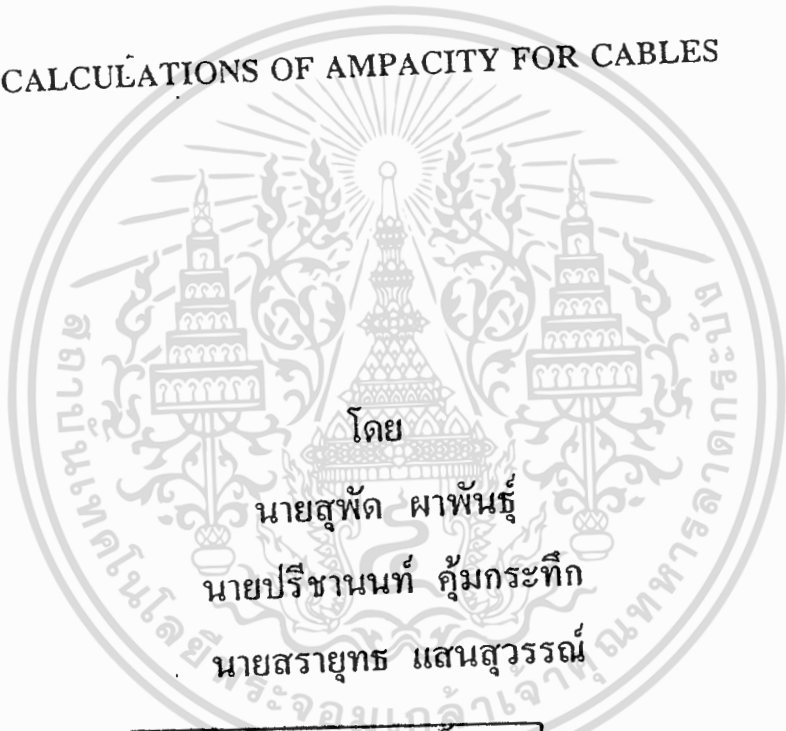




ปีการศึกษา 2538

การคำนวณหากระแสในสายเคเบิล

CALCULATIONS OF AMPACITY FOR CABLES



โดย

นายสุพัต ผาพันธ์

นายปรีชา นนท์ กุ่มกระติก

นายสรายุทธ แสนสุวรรณ

วัน เดือน ปี.....	๔/ ๑. ๑. ๒๕๓๘
เลขทะเบียน.....	๐๓๗๐๑๘
เลขเรียกหนังสือ.....	T ๒๘๑๗. ก. ๒๘๑ ก.

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์สุลี บรรจงจิตร

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว

ปริญญาโทปีการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

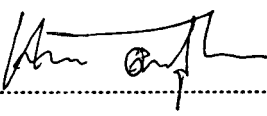
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การคำนวณหากระแสในสายเคเบิล

ผู้จัดทำ

1. นายสุพัต ผาพันธุ์
2. นายปรีชานนท์ คู่่มกระตีก
3. นายสรายุทธ แสนสุวรรณ


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์สุดี บรรจงจิตร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหากระแสในสายเคเบิล

นายสุพัต ผาพันธุ์

นายปรีชานนท์ คู่้มกระติก

นายสรายุทธ แสนสุวรรณ

รศ.ศุติ บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2538

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาพิกัดกระแสในสายเคเบิล โดยอ้างอิงทฤษฎีของ J.H Neher และ M.H.McGrath เป็นหลักในการคำนวณ มุ่งเน้นการคำนวณที่ระดับแรงดันต่ำถึงระดับแรงดันปานกลาง ใช้สาย THW และ XLPE เป็นหลัก โดยวางรูปแบบการติดตั้งออกเป็น 4 แบบใหญ่ ๆ คือ เดินลอยในอากาศ, เดินในท่อร้อยสาย, เดินในดักเบงค์ และเดินฝังดินโดยตรง มีการพิจารณาถึงแฟกเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อพิกัดกระแสของสายเคเบิล เช่น ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ชนิดของฉนวน เป็นต้น สุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับมาตรฐานของ การไฟฟ้านครหลวง

CALCULATIONS OF AMPACITY FOR CABLES**Supat Papun****Prechanon Kumkratug****Sarayut Seasuvan****Assc.Prof. Sulee Bunjongjit Advisor****Lecture Chai Chompoonvai Advisor****1995****ABSTRACT**

This project concentrated on calculations of ampacity for cables which are THW and XLPE cables in low voltage and medium voltage. The calculation refer to J.H. NEHER and M.H. McGrath Theory. The calculation calculated according to environment and installation cables of Metropolitan Electricity Authority (MEA.) To bring the result calculation compare with Metropolitan Electricity Authority. Eventually, development of methode calculation is used by software computer.

III
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายเคเบิล	2
2.1 ส่วนประกอบหลักของสายเคเบิล	2
2.2 คัดนำ	4
2.3 ฉนวน	8
2.4 Cable Shielding	11
2.5 Jacketing , Sheathing , Armoring	12
บทที่ 3 การติดตั้งสายเคเบิล	13
3.1 การติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้ง	13
3.2 การติดตั้งสายเคเบิลโดยการร้อยท่อสายไฟ	13
3.3 การเดินสายเคเบิลบนรางเดินสาย	15
3.4 การเดินสายเคเบิลใต้ดิน	18
บทที่ 4 Neher-McGrath Calculations for Insulated Cables	23
4.1 การวิเคราะห์เบื้องต้น	23
4.2 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน	24
4.3 สมการคำนวณหาค่ากระแส	26
4.4 สมการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน	26
4.5 ตัวอย่างการคำนวณ	30

บทที่ 5 การคำนวณหากระแสในสาย CABLES	34
5.1 ความหมายของสัญลักษณ์	34
5.2 การพิจารณาวงจรสมมูลย์ความร้อน	37
5.3 การพิจารณาหาค่าความสูญเสียและพารามิเตอร์ต่างๆ	40
5.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อน	49
5.5 สรุปขั้นตอนและตัวอย่างการคำนวณในกรณีต่างๆ	54
บทที่ 6 การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาค่ากระแส	115
6.1 การใช้งานโปรแกรม	115
6.2 แผนภูมิขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	120
6.3 ผลการคำนวณหากระแสในสายเคเบิล	123
6.4 บทสรุปและวิจารณ์	127

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันต่ำ	3
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันปานกลาง	3
รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของสายเคเบิลแบบตีเกลียว	5
รูปที่ 2.4 รูปแบบพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ	6
รูปที่ 3.1 ลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลบนราง	13
รูปที่ 3.2 การยึดสายเคเบิลบนเหล็กตัว L ภายในอาคารด้วยแคลมป์	13
รูปที่ 3.3 ลักษณะของท่อ PVC และอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ	14
รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งท่อร้อยสาย	15
รูปที่ 3.5 ลักษณะของ cable trays แบบต่างๆที่ทำจากโลหะ galvanised	15
รูปที่ 3.6 ลักษณะของ cable ladders ที่ทำจากโลหะ galvanised	16
รูปที่ 3.7 ลักษณะรูปร่างของ elbow และ tee ของ cable trays	16
รูปที่ 3.8 ลักษณะการติดตั้ง cable ladders เป็นชั้นๆเพื่อวางสายเป็นจำนวนมากภายในอุโมงค์ใต้ดิน	17
รูปที่ 3.9 ลักษณะการติดตั้ง PVC cable trays ซึ่งมีน้ำหนักเบาใช้กับสถานที่ที่ไม่สามารถติดตั้ง cable trays แบบโลหะได้	17
รูปที่ 3.10 ลักษณะการเดินสายเคเบิลฝังดินโดยตรง	18
รูปที่ 3.11 ลักษณะของแผงท่อร้อยสายขนาดต่างๆ	20
รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของบ่อพักสายและการติดตั้งอุปกรณ์	21
รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน	24
รูปที่ 4.2 วงจรไฟฟ้า	24
รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลย์ทางความร้อนสำหรับตัวนำเดี่ยวเดินลอยในอากาศ	24
รูปที่ 4.4 ลักษณะของ duct bank ขนาดต่างๆ	28
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของ $F(x)$, $F(xp')$ ในฟังก์ชันของ Rdc/k	44
รูปที่ 5.2 ค่า G_b สำหรับ duct bank	44

VI

รูปที่ 6.1	แสดงลักษณะของ MAIN MENU	115
รูปที่ 6.2	แสดงเมนูย่อยของระดับแรงคันท่ำ	116
รูปที่ 6.3	แสดงเมนูย่อยของระดับแรงคันทปานกลางถึงแรงคันทสูง	117
รูปที่ 6.4	โปรแกรมการคำนวณ	117
รูปที่ 6.5	แสดงลักษณะของ INPUT DATA	118
รูปที่ 6.6	แสดงลักษณะของเอทท์พุท	119
รูปที่ 6.7	แสดงตารางเปรียบเทียบกับ กพน.	120
รูปที่ 6.8	แสดงไฟล์บริหารจัดการคำนวณของโปรแกรม	122



VII
สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าความนำของโลหะชนิดต่างๆ	4
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงกับอลูมิเนียม	5
ตารางที่ 2.3 ขนาดตัวนำมาตรฐาน	5
ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิขณะทำงานของ cable dielectric ชนิดต่างๆ	9
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของ cable dielectric ชนิดต่างๆ	10
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากับวงจรสมมูลย์ทางความร้อน	24
ตารางที่ 4.2 ความหมายของตัวแปรในวงจรสมมูลย์ทางความร้อน	25
ตารางที่ 4.3 ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่างๆ	29
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ A', B'	29
ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรต่างๆของ duct bank	30
ตารางที่ 5.1 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่างๆ	40
ตารางที่ 5.2 ค่า K_s และ K_p สำหรับรูปแบบตัวนำแบบต่างๆ	43
ตารางที่ 5.3 แสดง %skin effect ของ Solid Round Conductor และ Conventional Round Concentric Strand Conductors	46
ตารางที่ 5.4 Mutual Reactance, Conductor to Sheath(or Shield)	47
ตารางที่ 5.5 แสดง Specific Inductive Capacitance of Insulation	49
ตารางที่ 5.6 แสดงความต้านทานความร้อนจำเพาะของวัสดุชนิดต่างๆ	50
ตารางที่ 5.7 แสดงค่าคงที่ A, B, C, A', B'	51

บทที่ 1

บทนำ

ในการออกแบบระบบกำลังไฟฟ้า หรือระบบแสงสว่าง สายเคเบิล เป็นองค์ประกอบหลักอันหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวม ดังนั้นจึงควรให้ความพิถีพิถันในการออกแบบเท่าเทียมกับองค์ประกอบที่สำคัญอื่น ๆ ในระบบ ปริมาณไฟฟ้าที่ผู้ออกแบบระบบจะมองข้ามไม่ได้อันหนึ่งคือ พิกัดกระแสของสายเคเบิล

การคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิล มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น ชนิดของตัวนำ รูปแบบการฉนวน ชนิดของฉนวนที่ใช้ ลักษณะการติดตั้ง อุณหภูมิ หรือแม้แต่ความเร็วของลม เมื่อตัวแปรตัวหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้พิกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิลเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทั้งหมดนี้อธิบายอยู่ในทฤษฎีของ J.H. Neher และ M.H. McGrath ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถมองเห็นความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อพิกัดกระแสได้อย่างชัดเจน จึงทำให้ทฤษฎีนี้ได้รับการยอมรับและถูกอ้างอิงใช้เป็นหลักในการคำนวณเรื่อยมา นับแต่ปี ค.ศ. 1957 จวบจนปัจจุบัน

เมื่อมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องกับมากขึ้น วิธีการคำนวณจะมีความยุ่งยากสลับซับซ้อนยิ่งขึ้น จนยากที่จะคำนวณด้วยมือได้โดยง่าย ทำให้เสียเวลามาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และผิดพลาดได้ง่าย เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวข้างต้น จึงมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณหาค่ากระแสในสายเคเบิล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ถูกต้องเที่ยงตรงต่อไป

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายเคเบิล

ปัจจุบันสายไฟฟ้ามีมากมายหลายชนิด และหลายลักษณะในการนำไปใช้งาน สายชนิดหนึ่ง ๆ อาจจะเหมาะกับลักษณะการติดตั้งแบบหนึ่งๆ โดยเฉพาะหรือใช้ได้ทั่วไป ทั้งนี้ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับ การออกแบบโครงสร้างส่วนประกอบของสายไฟฟ้าชนิดนั้นๆ เป็นสำคัญ จากเทคโนโลยีที่มีความเจริญรุดหน้าอย่างรวดเร็ว ได้มีการผลิตวัสดุ และองค์ประกอบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิมขึ้นมาใหม่อยู่เสมอ เป็นต้นว่า ชนิดของฉนวนที่นำมาใช้กับสายไฟฟ้า แต่ก่อนมีเพียงไม่กี่ชนิด และลักษณะการนำไปใช้ก็มีโครงสร้างง่ายๆ ไม่มีความสลับซับซ้อนแต่อย่างใด แต่ปัจจุบันชนิดของฉนวนถูกคิดค้น พัฒนาขึ้นมาอีกหลายชนิดและการนำไปใช้ก็มีความสลับซับซ้อน ทำเป็นหลายชั้น มีการใช้วัสดุอื่นๆ มาประกอบอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะสายในระดับแรงดันปานกลาง และแรงดันสูง จึงเป็นผลก่อให้เกิดความยุ่งยากสับสนในการเลือกนำไปใช้งาน โดยเฉพาะกับบุคคลที่อยู่ในวงนอกไม่ค่อยได้ติดตามข่าวคราว ความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้น

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างส่วนประกอบของสายในระดับแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง รวมถึงคุณสมบัติและหน้าที่ของส่วนประกอบเหล่านั้นเอาไว้ด้วย เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาค้นคว้าสำหรับผู้สนใจต่อไป

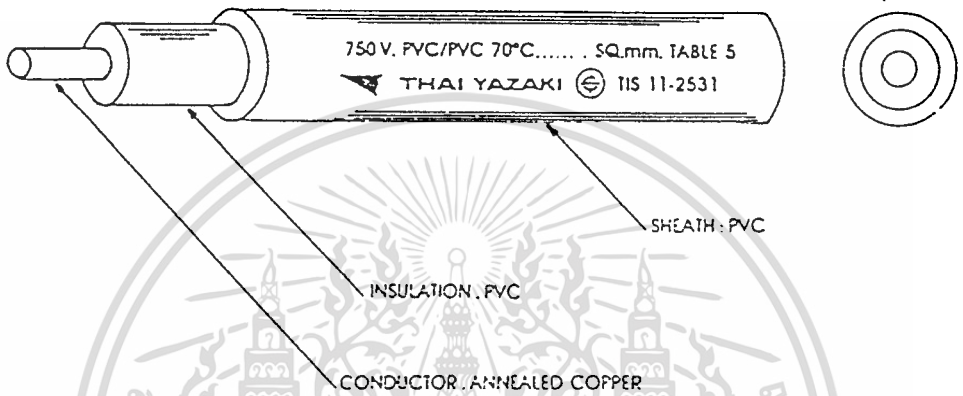
2.1 ส่วนประกอบหลักของสายเคเบิล

โดยทั่วไป สายเคเบิลจะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

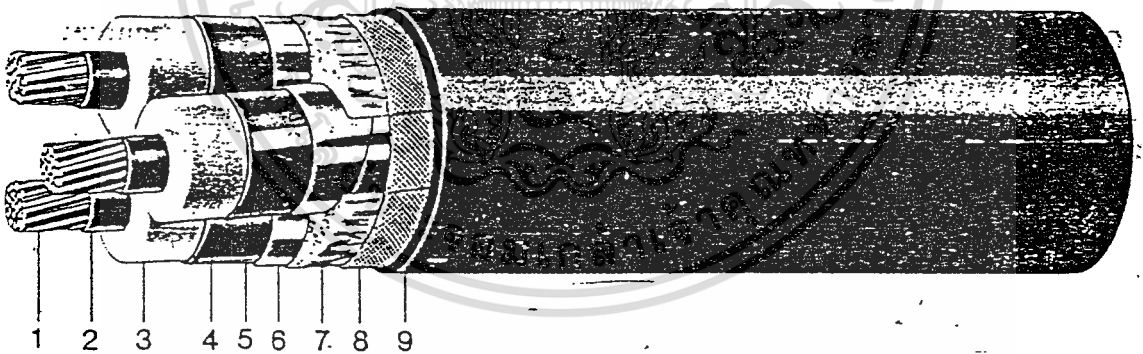
1. ตัวนำ (conductor) ทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี
2. ฉนวน (insulation) มีมากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันกระแสรั่วไหล
3. Shield ใช้เพื่อป้องกันการรบกวนของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก และคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายตัวนำเอง เมื่อมีค่ากระแสสูงๆ ไหลผ่าน ดังนั้นถ้ามีกระแสน้อย เช่นในสายระดับแรงดันต่ำ อาจจะไม่จำเป็นต้องมีชิลด์ก็ได้ เพราะมีผลจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มากนัก และยังทำให้ประหยัดได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Jacketing, Sheathing และ Armoring ทั้งสามชนิดนี้มีความใกล้เคียงกันมาก มีไว้เพื่อป้องกันสายจากสภาพการณ์ภายนอกต่างๆ เช่น ด้าน mechanical, thermal และ chemical ตัวอย่างโครงสร้างส่วนประกอบของสายในระดับแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง แสดงดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันต่ำ



REFERENCES

- | | |
|---|--------------------------------|
| 1. Conductor | 5. Circuit Identification Tape |
| 2. Extruded Conductor Shield | 6. Copper Shield Tape |
| 3. XLPE Insulation | 7. Fillers |
| 4. Extruded Insulation Shield (Free Stripping Type) | 8. Binding Tape |
| | 9. PVC Jacket |

รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ตัวนำ (Conductors)

ตัวนำมีหน้าที่ เป็นสื่อกลางเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยสะดวกที่สุด ดังนั้นตัวนำจึงต้องทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี (high conductivity) ซึ่งโลหะที่สามารถนำมาใช้ได้มีหลายชนิด แต่ปัจจุบันที่ได้รับความนิยมมี 2 ชนิดคือ ทองแดงและอลูมิเนียม ทองแดงมีข้อได้เปรียบอลูมิเนียมคือ มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าดีกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนั้นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมจึงมีค่าน้อยกว่า อย่างไรก็ตามถึงแม้ทองแดงจะมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าอลูมิเนียมประมาณสองเท่าก็ตาม ในระยะหลังมานี้อลูมิเนียมเริ่มได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเทียบกับที่ค่าความต้านทานเท่ากันแล้ว ตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบาและถูกกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นถ้าเป็นสายเคเบิลชนิดเดินลอยในอากาศ เช่นสาย overhead line ถ้าตัวนำที่ใช้เป็นอลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าแล้วจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายจากการก่อสร้าง โครงสร้างรองรับสายเคเบิลได้มากกว่า และเหตุผลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ที่ค่าความต้านทานเท่ากัน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวนำที่ทำจากทองแดงมาก ผลที่ได้เห็นได้ชัดคือ เมื่อตัวนำอลูมิเนียมมีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) รอบตัวนำจะลดน้อยลงที่กักแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน ดังนั้นจึงลดผลจากการเกิดโคโรนา ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบ และยังก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารโทรคมนาคมอีกด้วย

Metal	Relative electrical conductivity (copper = 100)
Silver	106.3
Copper	100.0
Gold	73.8
Aluminium	61.7
Sodium	35.4
Zinc	29.0
Iron	17.2
Tin	15.0
Lead	7.9

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าความนำของโลหะชนิดต่างๆ

คุณสมบัติเชิงเปรียบเทียบ	ทองแดง	อลูมิเนียม
อัตราส่วนความนำไฟฟ้า (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1.0	0.60
อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด (ความต้านทานเท่ากัน)	1.0	1.66
อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง (ความต้านทานเท่ากัน)	1.0	1.29
อัตราส่วนน้ำหนัก (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1.0	0.30
อัตราส่วนน้ำหนัก (ความต้านทานเท่ากัน)	1.0	0.60

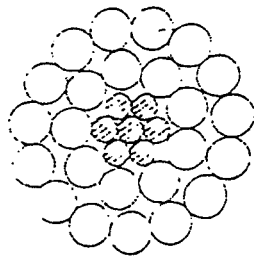
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงกับอลูมิเนียม

โครงสร้างของตัวนำ แบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบที่หนึ่ง เป็นตัวนำเส้นเดี่ยวยึดลักษณะแข็ง (solid) บางครั้งเรียกตัวนำเดี่ยวนี้อีกว่าสาย wire และแบบที่สอง ประกอบด้วยตัวนำหลายๆเส้นบิดเกลียวรวมกันเรียกว่า เคเบิล ลักษณะของตัวนำทั้งสองแบบ แสดงดังรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 ตัวนำแบบตีเกลียวมีข้อดีกว่าตัวนำเส้นเดี่ยว (solid) คือมีความยืดหยุ่น สามารถทำการโค้งงอได้ดีกว่า จำนวนของสาย (wire) ที่นำมาพันตีเกลียวในแต่ละเคเบิล โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสายเท่าๆ กัน จะเป็นสายเคเบิลที่ประกอบด้วย 7, 19, 37, 61, 91 สาย ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3

จำนวนของสายที่นำมาพันตีเกลียวหาได้จากสมการ

$$\text{จำนวนของสายที่นำมาพันตีเกลียว} = 3n^2 - 3n + 1 \quad (2.1)$$

เมื่อ n คือจำนวนชั้นของสายตีเกลียวที่ตรงกลางเคเบิลมีลวดตัวนำย่อยเพียงเส้นเดียว



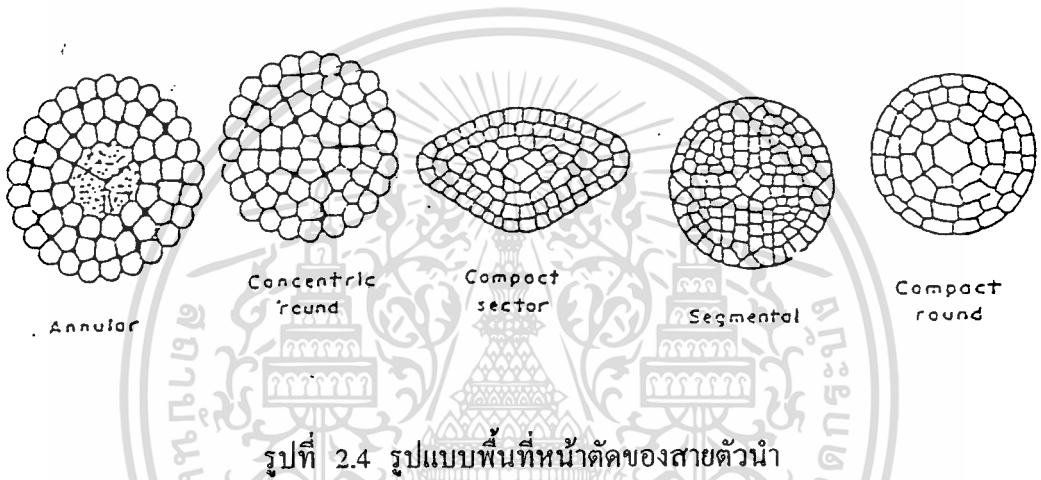
รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของสายตัวนำแบบตีเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ แบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

1. แบบ annular
2. แบบ concentric round
3. แบบ compact sector
4. แบบ segmental
5. แบบ compact round

โดยรูปแบบพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้ง 5 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ

ขนาดของตัวนำ (conductor size)

ขนาดของตัวนำตามมาตรฐาน AWG (American Wire Gauge) จะเริ่มตั้งแต่ขนาดตัวนำเล็กที่สุดเบอร์ 40 จนถึงขนาดตัวนำใหญ่ที่สุดเบอร์ 0000 หรือ 4/0 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

เนื่องจากประเทศในแถบยุโรปและอเมริกา นิยมใช้หน่วยวัดความยาวเป็นฟุต ดังนั้นขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำจะใช้หน่วย circular mil (cmil) โดยที่

$$1 \text{ linear mil} = 0.001 \text{ inch.} = 0.0254 \text{ millimeter} \quad (2.2)$$

และถ้าต้องการแปลงหน่วย cmil ให้เป็นหน่วยตารางนิ้วหรือตารางมิลลิเมตร สามารถหาได้ตามสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 ตามลำดับ

$$(\text{inch})^2 = \text{cmil} \times 0.7854 \times 10^{-6} \quad (2.3)$$

$$(\text{mm})^2 = \text{cmil} \times 5.067 \times 10^{-4} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Size (AWG or kcmil)	(Circular mils)	Number of wires	Solid or Stranded
18	1,620	1	Solid
16	2,580	1	Solid
14	4,110	1	Solid
12	6,530	1	Solid
10	10,380	1	Solid
8	16,510	1	Solid
7	20,820	1	Solid
6	26,250	1	Solid
6	26,250	3	Stranded
5	33,100	3	Stranded
5	33,100	1	Solid
4	41,740	1	Solid
4	41,740	3	Stranded
3	52,630	3	Stranded
3	52,630	7	Stranded
3	52,630	1	Solid
2	66,370	1	Solid
2	66,370	3	Stranded
2	66,370	7	Stranded
1	83,690	3	Stranded
1	83,690	7	Stranded
0 (or 1/0)	105,500	7	Stranded
00 (or 2/0)	133,100	7	Stranded
000 (or 3/0)	167,800	7	Stranded
000 (or 3/0)	167,800	12	Stranded
0000 (or 4/0)	211,600	17	Stranded
0000 (or 4/0)	211,600	12	Stranded
0000 (or 4/0)	211,600	19	Stranded
250	250,000	12	Stranded
250	250,000	19	Stranded
300	300,000	12	Stranded
300	300,000	19	Stranded
350	350,000	12	Stranded
350	350,000	19	Stranded
400	400,000	19	Stranded
450	450,000	19	Stranded
500	500,000	19	Stranded
500	500,000	37	Stranded
600	600,000	37	Stranded
700	700,000	37	Stranded
750	750,000	37	Stranded
800	800,000	37	Stranded
900	900,000	37	Stranded
1,000	1,000,000	37	Stranded

ตารางที่ 2.3 ขนาดตัวนำมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ฉนวน (Insulations)

ฉนวนมีหน้าที่หลักคือ ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่ว (leakage current) โดยฉนวนที่ดีควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) สูง
2. มีค่าความต้านทานจำเพาะ (insulation resistance) สูง
3. มีค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistivity) ต่ำ
4. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ต่ำ
5. มีค่าคงตัวประกอบการสูญเสีย ($\tan \delta$) ต่ำ

ฉนวนที่ใช้ในสายเคเบิล แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ของแข็ง ได้แก่ สารโพลีเมอร์ชนิดต่างๆ
2. ของเหลว ได้แก่ oil base มีลักษณะเช่นเดียวกันกับน้ำมันของหม้อแปลง
3. ก๊าซ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน (N_2), SF_6 เป็นต้น

2.3.1 ฉนวนที่เป็นของแข็ง (ในที่นี้คือ สารโพลีเมอร์) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติก (plastic) และ อีลาสโตเมอร์ (elastomers) หรือยาง (rubber)

พลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. Thermo plastics หมายถึงพลาสติกที่สามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อน เมื่อเย็นจะแข็งตัวและสามารถนำกลับมาหลอมเหลวใช้ใหม่ได้อีก ได้แก่ polyvinyl chloride (PVC), polyethylene (PE)

1.1 polyvinyl chloride (PVC) พัฒนาขึ้นครั้งแรกที่ประเทศเยอรมัน ตั้งแต่ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ vinyl acetate และกลุ่ม copolymer ของ polyvinyl chloride มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่นมีความทนทานต่อความชื้น, ความเย็น, ความร้อน, เปลวไฟ, สารละลาย, น้ำมัน, สารเคมี, ก๊าซโอโซน เหมาะสำหรับระบบส่งจ่ายด้วยระดับแรงดันต่ำ (น้อยกว่า 1 kV) และแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส ลักษณะงานที่เหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ได้ เช่น สายไฟสำหรับไฟแสงสว่าง, สายที่ใช้ในงานควบคุมต่างๆ

1.2 polyethylene (PE) เป็นสารสังเคราะห์ที่ได้จาก ขบวนการผลิต แบบ polymerization โดยมี ethylene เป็น monomer ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 ชนิด คือ ชนิด LDPE (low density polyethylene) และ HDPE (high density polyethylene) polyethylene มีคุณสมบัติที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีหลายประการได้แก่ มีค่าคงตัวประกอบการสูญเสีย ($\tan \delta$) ต่ำ, ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ต่ำ ขณะที่ค่าความนำความร้อน (thermal conductivity) มีค่าสูงมาก นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อความชื้น, การขูดขีด, แสงแดด, สารเคมี, เปลวไฟ และมีความยืดหยุ่นสูง สามารถโค้งงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำๆ อุณหภูมิปกติในการใช้งานคือ 70-80 องศาเซนเซียส ลักษณะงานที่นำไปใช้มีหลายประเภท เช่น ใช้เป็นฉนวนในสายโทรศัพท์, สายสัญญาณ, สายควบคุม, สายเคเบิลที่ระดับแรงดันต่ำ ถึงปานกลาง (ปัจจุบันมีขีดจำกัดการใช้งานอยู่ที่ระดับ 5 kV)

2. Thermosetting plastics เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีก จึงไม่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ มีข้อดีคือ ทนความร้อนสูงๆ ได้, มีความอยู่ตัวสูงไม่เสียรูป, มีรูปร่างแน่นอน, น้ำหนักเบา, เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลได้แก่ cross-link polyethylene (XLPE) และ ethylene propylene rubber (EPR)

2.1 cross-link polyethylene (XLPE) เป็นเทอร์โมเซตชนิดหนึ่ง มีขบวนการผลิต 2 วิธีคือ วิธีแรก เรียกว่า “electron irradiation” โดยจะทำการฉายรังสีที่มี high energy electron beam ไปยัง polyethylene วิธีที่สอง เรียกว่า “chemical crosslinking process” เป็นการผลิตที่อาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง polyethylene กับ organic peroxide ภายใต้อุณหภูมิสูง เมื่อเติมสารบางอย่างลงไปจะทำให้ cross-link polyethylene มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้าดีขึ้น ระดับอุณหภูมิที่สภาวะปกติในการทำงานคือ 90 องศาเซนเซียส และในกรณีลัดวงจรสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 250 องศาเซนเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.2 ethylene propylene rubber (EPR) ได้มาจากการผสมระหว่าง ethylene กับ propylene ซึ่งคล้ายกับวิธีของ XLPE มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อก๊าซไอโซน, ลักษณะสภาพอากาศแบบต่างๆ มีความต้านทานความร้อนต่ำ อีกทั้งมีคุณสมบัติที่ดีใน

Cable dielectric	Max $\theta^{\circ}\text{C}$ continuous operation	Max $\theta^{\circ}\text{C}$ short-circuit operation
impregnated paper	65-80	160-250
p.v.c.	70	150-160
p.e.(low density)	70	120
p.e.(high density)	80	160
x.l.p.e.	90	250

ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิขณะทำงานของ cable dielectric ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่องความยืดหยุ่น จึงถูกนำไปใช้ในระดับแรงดันปานกลาง (น้อยกว่า 35 kV) ส่วนอุณหภูมิทำงานในสภาวะปกติเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส และในกรณีลัดวงจรสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 250 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับกับ XLPE ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ส่วนคุณสมบัติที่สำคัญของฉนวนพลาสติกทั้ง 4 ชนิดที่กล่าวมา แสดงดังตารางที่ 2.5

Insulation	p.v.c.	p.e.		x.l.p.e.	e.p.r.	Impregnated paper
		HDPE	LDPE			
Density (kg m ⁻³)	1400	900	900	900	1200	1250
Thermal resistivity (°C m W ⁻¹)	6.0	3.0	3.5	3.5	5.0	5.0-6.0
Relative permittivity Er	8.0	2.3	2.3	2.5	3.3	3.5
Tangent of dielectric loss angle, tanδ	100 x10 ⁻³	4 x10 ⁻⁴	4 x10 ⁻⁴	4 x10 ⁻⁴	4 x10 ⁻³	2 x10 ⁻³

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของ cable dielectric ชนิดต่างๆ

Elastomer หรือ Rubber เป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดได้เมื่อมีแรงมากระทำ และจะกลับคืนสภาพเดิมเมื่อปลอดจากแรงที่กระทำ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ยางธรรมชาติ เมื่อทำให้เกิด cross-linked ขึ้นเป็นโมเลกุล ทำให้ยางแข็งตัวด้วยการเติมกำมะถัน หรือตะกั่วคาร์บอนेट แล้วให้ความร้อนเรียกว่า vulcanizing rubber
2. ยางสังเคราะห์ เช่น styrene-butadiene rubber (SBR) ราคาถูกกว่ายางธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือดูดน้ำมัน

อย่างไรก็ตามพลาสติกชนิด elastomer หรือ rubber นี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมนักในการนำมาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ฉนวนที่เป็นของเหลว

oil base นับเป็นฉนวนที่รู้จักใช้กันมานานแล้ว มีส่วนผสมพื้นฐานเป็นน้ำมันพืชผสมกับ กำมะถันและยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ฉนวนประเภทนี้มีความ คงทนต่อก๊าซโอโซน และไม่เกิดการออกซิเดชัน (oxidation) มีเสถียรภาพทางไฟฟ้าสูง, มีค่าความ คงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) สูง ด้วยคุณสมบัติที่ดีเช่นนี้ทำให้สามารถใช้ได้กับ ระดับแรงดันสูงๆ และถ้านำไปใช้ประกอบกับฉนวนประเภทอื่นๆ เช่นกระดาษ (oil impregnated paper) จะสามารถใช้ได้กับแรงดันที่สูงเป็นพิเศษได้ ปัจจุบันฉนวนชนิดนี้ได้พัฒนามาไปใช้กับ อุปกรณ์ใหญ่ๆ ในระบบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า, circuit breaker (CB)

2.3.3 ฉนวนที่เป็นก๊าซ

ฉนวนชนิดนี้ถูกนำมาใช้กับระบบส่งใต้ดิน (underground power lines) ก๊าซที่นิยมนำมา ใช้ได้แก่ ไนโตรเจน (N₂) และ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีมากมาย เป็นต้นว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนดี เป็นต้น จึง สามารถใช้ได้กับระดับแรงดันไฟฟ้าสูงเป็นพิเศษ (extra high voltage)

2.4 Cable Shielding

การ shield สายเคเบิล มีวัตถุประสงค์เพื่อจำกัดหรือควบคุมสนามไฟฟ้าของฉนวน หรือตัว นำ โดยใช้ตัวกลางที่ต้องมีการต่อลงดินและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี การ shield โดยทั่วไปมีลักษณะ เป็นเทปโลหะหรือ drainwire โดยทำมาจากโลหะทองแดงหรืออลูมิเนียม ที่มีคุณสมบัติไม่เป็น สารแม่เหล็ก (non-magnetic metallic)

การ shield จะ shield ทั้งรอบตัวนำ (conductor shield) และรอบฉนวน (insulation shield) โดยมีหลักพื้นฐานคือ

1. เพื่อรักษารูปร่างการกระจายของสนามไฟฟ้า ในเนื้อฉนวนให้เป็นรูปการกระจายทาง รัศมีที่สม่ำเสมอ (symmetrical radial stress distribution)
2. เพื่อปกป้องสารแรงดันเหนียวนำ หรือจำกัดสนามแม่เหล็ก, การแทรกสอดของสนาม ไฟฟ้าสถิตย์
3. ลดความรุนแรงของอันตรายที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรหรือรั่วลงกราวด์ และจำกัด ความถี่สูงที่แพร่กระจายออกไป
4. ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวยาว และที่ผิวสัมผัสให้อยู่ในค่าที่ปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Jacketing, Sheathing และ Armoring

Jacketing, Sheathing และ Armoring ทำหน้าที่คล้ายๆ กันคือ ป้องกันอันตรายต่างๆ ที่จะเกิดกับสาย ไม่ว่าจะเป็นทางด้าน mechanical, thermal หรือ chemical

Jacketing โดยทั่วไปทำมาจากพลาสติก ได้แก่ polyvinyl chloride (PVC), polyethylene (PE), nylon, hypalon (CSPE) โดย PVC, PE, nylon จะเป็นเทอร์โมพลาสติก ส่วน CSPE เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต

Sheathing ตะกั่วคือวัสดุชนิดแรกที้นำมาใช้ทำ sheathing มีประสิทธิภาพดีมากในการป้องกันความชื้น ตลอดความยาวของสายเคเบิล แต่มีข้อเสียคือมีน้ำหนักมาก ปัจจุบันได้หันมาใช้อลูมิเนียมแทน เพราะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่า สามารถทำให้มีความหนาตามที่ต้องการได้ง่าย และยังมีการเชื่อมต่อที่ดี

Armoring ที่นิยมใช้มี 3 ชนิด คือ interlocked, flat tape และ round wire ชนิดแรกคือ interlocked มีลักษณะเป็นแทปโลหะบางชนิดเป็นเกลียวคล้ายตัว “S” ใช้พันรอบๆ สายเคเบิล โลหะที่ใช้ทำคือ galvanized และอลูมิเนียม ชนิดที่สอง คือ flat tape มีลักษณะคล้ายกันกับชนิดแรก โดยใช้พันทับ (over lap) กันไปเรื่อยๆ รอบสายเคเบิล ชนิดนี้มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าชนิดแรก ชนิดที่สาม round wire มีลักษณะคล้ายเอาตัวนำเส้นเดี่ยวเล็กๆ (wire) มาจับเรียงกันรอบๆ สายเคเบิลโลหะที่ใช้ทำคือ galvanized steel

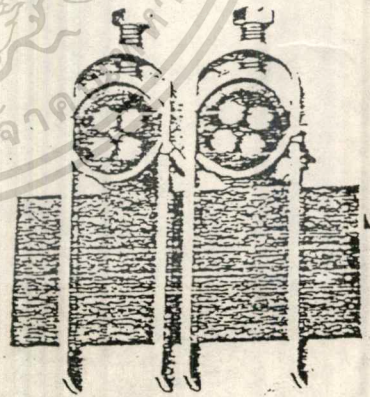
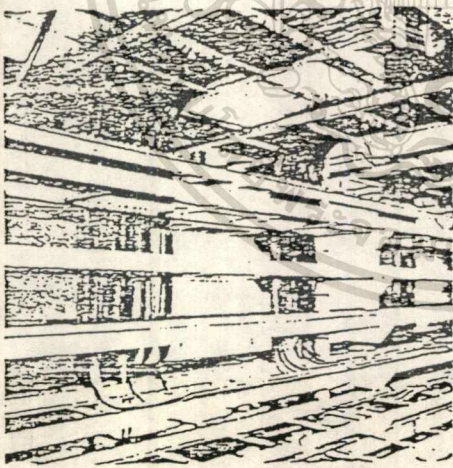
บทที่ 3

การติดตั้งสายเคเบิล

การติดตั้งสายเคเบิลจำแนกได้เป็น 4 รูปแบบดังนี้

3.1 การติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้ง

การติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้งหมายถึงการติดตั้งสายเคเบิลนอกตัวอาคารหรือภายในตัวอาคาร อาจเป็นการติดตั้งพาดบนเสาไฟฟ้า เช่นเดียวกับการติดตั้งสายเปลือย หรือติดตั้งให้ยึดกับผนังอาคาร วางบนพื้นหรือติดตั้งบนรางสายเคเบิล เป็นต้น ดังนั้นการติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้งจึงมีอากาศเป็นตัวกลางปกคลุมอยู่รอบนอกสายเคเบิล ตัวอย่างการติดตั้งและยึดสายเคเบิล แสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลบนราง

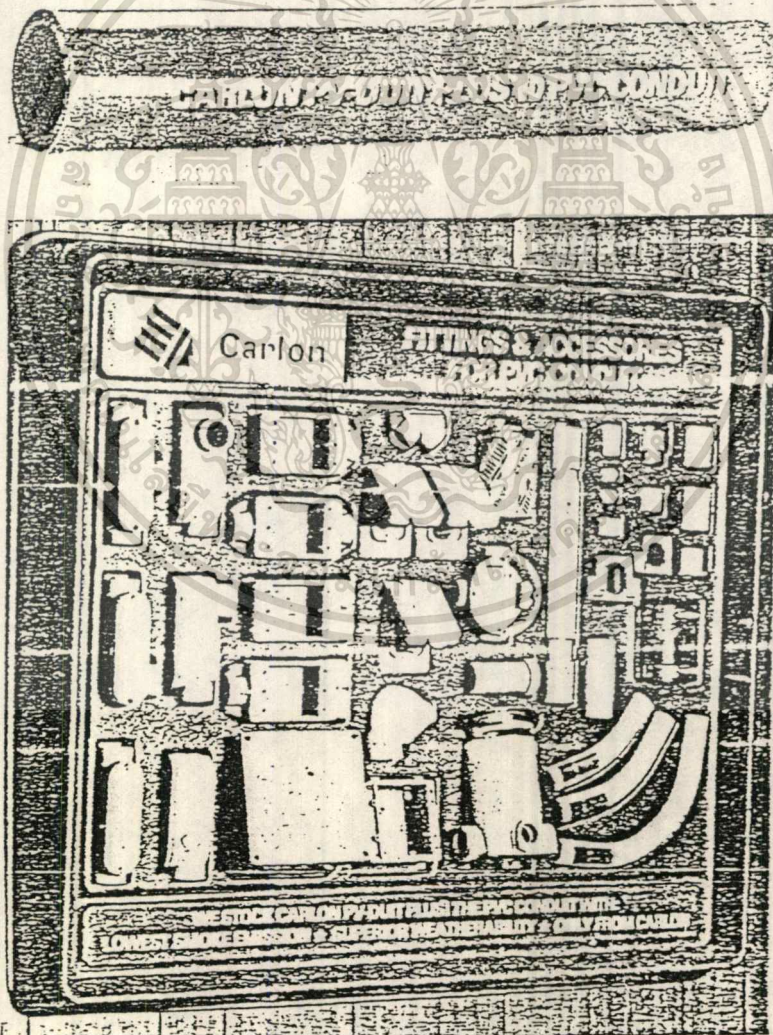
รูปที่ 3.2 การยึดสายเคเบิลบนเหล็กตัว L ภายในอาคารด้วยแคลมป์

3.2 การติดตั้งสายเคเบิลโดยการร้อยท่อสายไฟ (duct หรือ conduit)

การติดตั้งสายเคเบิลวิธีนี้จะต้องเลือกขนาดของ duct และ conduit โดยการพิจารณาจากหลักการพื้นฐานเปอร์เซ็นต์ในการแก้ปัญหาที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการลากดึงสายเคเบิล ซึ่งทำให้ต้อง การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาถึงจำนวนเนื้อตัวนำทั้งหมดที่มีอยู่ในท่อ นอกจากนี้รัศมีของท่อร้อยสายไฟมาตรฐานและความโค้งงอของทางเดินสายก็เป็นสิ่งจำเป็นหรือรัศมีในการโค้งงอด้านในต่ำสุด ก็จะมีผลซึ่งต้องนำมาพิจารณาด้วย โดยท่อที่ใช้จะแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ท่อโลหะ และท่อโลหะ ดังนี้

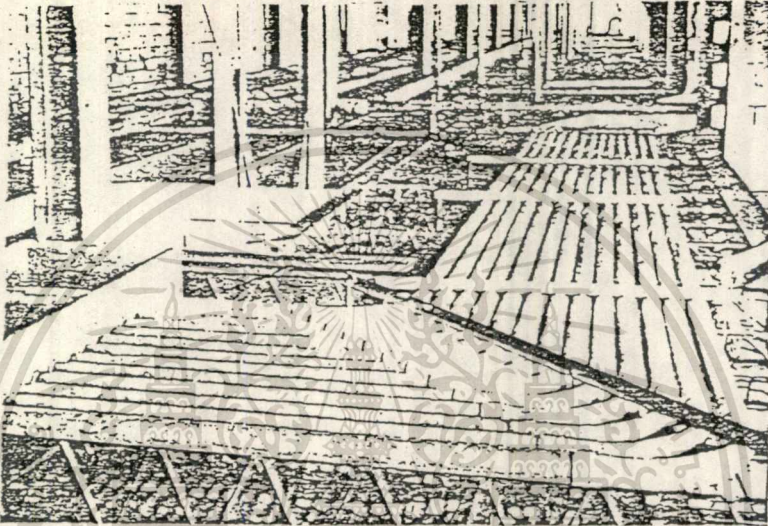
3.2.1 ท่อโลหะ (nonmetallic conduit) ทำมาจาก fiber, asbestos conduit, soapstone, rigid polyvinyl chloride (PVC), high density poly ethylene และ rigid polyvinyl (PV) ขนาดของท่อมีตั้งแต่ 1/2 นิ้วถึง 6 นิ้ว ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ท่อ PVC และ fiber เพราะการโค้งงอหรือหักมุมทำได้ง่าย โดยประกอบเข้ากับอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของท่อ PVC และอุปกรณ์ประกอบท่อต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่เขตเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

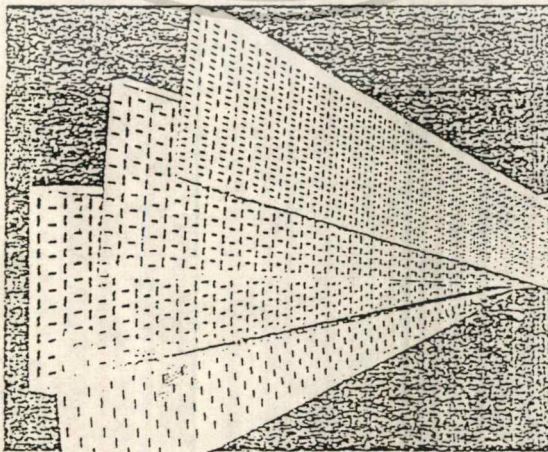
3.2.2 ท่อโลหะ (metal conduit) เป็นท่อที่ทำมาจากโลหะผสมบางครั้งจะเคลือบสังกะสีเอาไว้ด้วยเพื่อป้องกันสนิม แบ่งออกเป็นชนิดท่อโลหะหนา, ท่อโลหะหนาปานกลาง, ท่อโลหะบาง, ท่อโลหะอ่อน ส่วนชนิดที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ชนิด ท่อโลหะหนาปานกลาง (IMC) และชนิดท่อโลหะบาง (EMT) โดยมีลักษณะของท่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งตามตัวอาคารจะแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งท่อร้อยสาย

3.3 การเดินสายบนรางเดินสาย (race way)

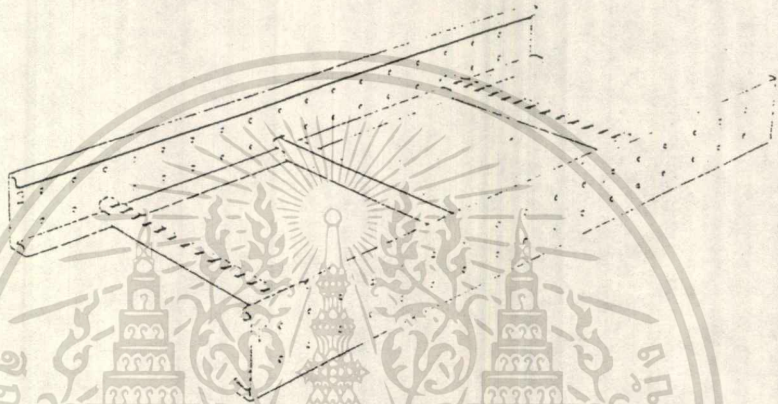
รางเดินสายที่ใช้ อาจจะเป็น cable trays หรือ cable ladders เป็นลักษณะของสิ่งที่รองรับหรือห่อหุ้มสายเคเบิลเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับสายเคเบิลดังกล่าว โดย cable trays และ



รูปที่ 3.5 ลักษณะของ cable trays แบบต่างๆ ที่ทำจากโลหะ galvanised

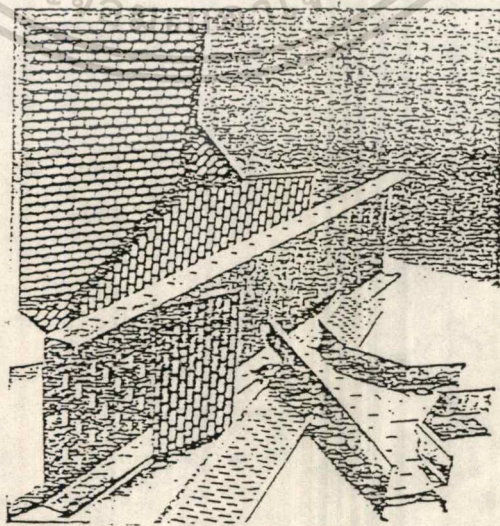
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cable ladders ทำมาจากโลหะหรือพลาสติก สามารถแขวนหรือวางก็ได้ ในกรณีที่ทำกรติดตั้ง cable trays หรือ cable ladders ถูกต้องแล้วก็สามารถร้อยสายเคเบิลลงไปได้เลย นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้งานได้ทุกสถานที่ ในโครงการนี้เป็นศูนย์การค้าหรือ อุตสาหกรรมใหญ่ ๆ อย่าง เช่น สถานีอานกำลัง, โรงงาน เป็นต้น ดังนั้นสายเคเบิลที่มีจำนวนมากจะต้องทำการจัดวางให้เหมาะสมตามสถานที่ ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงถึง cable trays และ cable ladders ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ลักษณะของ cable ladders ที่ทำจากโลหะ galvanized

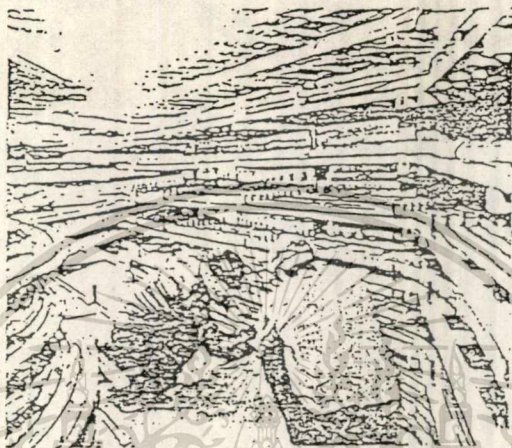
นอกจากนี้ในกรณีที่มีการโค้งตรงมุมหรือต่อ cable trays จะมีอุปกรณ์ที่ช่วยทำงานในลักษณะดังกล่าว โดยทำเป็นชิ้นสำเร็จรูปขึ้นมา จากรูปที่ 3.7 ส่วนที่โค้งเรียกว่า elbow และ



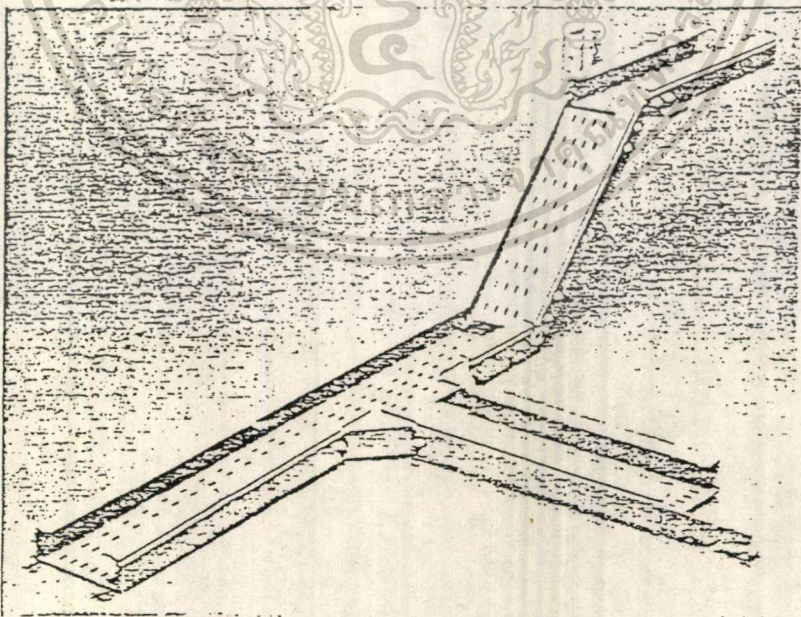
รูปที่ 3.7 ลักษณะรูปร่างของ elbow และ tee ของ cable trays

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เป็นแยกสามทางเรียกว่า tee รูปที่ 3.8 แสดงการติดตั้งของ cable ladders ที่วางเป็นชั้นๆ รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งของ cable trays ที่ทำมาจากพีวีซี



รูปที่ 3.8 ลักษณะการติดตั้ง cable ladders เป็นชั้นๆ เพื่อวางสายเป็นจำนวนมากภายในอุโมงค์ใต้ดิน



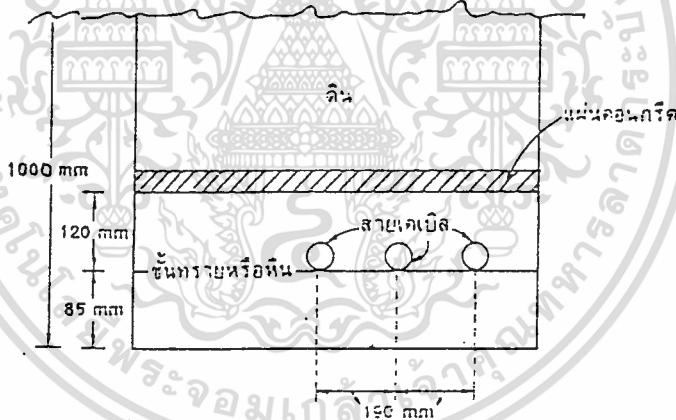
รูปที่ 3.9 ลักษณะการติดตั้ง PVC cable trays ซึ่งมีน้ำหนักเบาใช้กับสถานที่ที่ไม่สามารถติดตั้ง

cable trays แบบโลหะได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเดินสายเคเบิลใต้ดิน (underground cables)

การเดินสายเคเบิลใต้ดินทำได้ 2 วิธี ดังนี้

3.4.1 การเดินสายฝังดินโดยตรง (direct burial) วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการเดินในท่อคือ มีการลงทุนที่ต่ำกว่าและยังสามารถจ่ายกระแสได้มากกว่า เพราะว่าสายสัมผัสกับดินโดยตรงจึงสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่า แต่โดยทั่วไปไม่ค่อยนิยมเพราะว่าการบำรุงรักษาเคเบิลทำได้ยาก หากเกิดลัดวงจรขึ้นอาจจะต้องดึงกับพังถนนซ่อม เป็นต้น ดังนั้นจะใช้ในบางกรณีเท่านั้น เช่น การเดินสายเคเบิลใต้น้ำ (submarine cable) เป็นต้น ซึ่งมีวิธีการคือ จะฝังสายเคเบิลไว้ในคูหรือร่องที่ขุดเอาไว้ที่ความลึกประมาณ 1000 มม. โดยวางหุ้มบนพื้นทรายที่หนาประมาณ 85 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.10 สายเคเบิลจะวางห่างกันประมาณ 190 มม. จากนั้นจะเททรายทับอีกชั้นหนึ่งให้หนาประมาณ 120 มม. แล้วจึงวางแผ่นคอนกรีตทับอีกชั้นหนึ่ง จากนั้นก็เป็นชั้นดิน



รูปที่ 3.10 ลักษณะการเดินสายเคเบิลฝังดินโดยตรง

3.4.2 การเดินสายในแผงท่อใต้ดิน (duct bank) การเดินสายด้วยวิธีนี้จะต้องใช้ท่อร้อยสายและบ่อพักสาย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4.2.1 ชนิดของท่อร้อยสาย ท่อร้อยสายในปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกัน คือ

(I) ท่อใยหิน (asbestos cement duct) มีคุณสมบัติเปราะและแตกง่าย ดังนั้นการก่อสร้างจึงต้องหุ้มด้วยคอนกรีตอีกชั้นหนึ่ง แต่ท่อชนิดนี้มีราคาถูกและระบายความร้อนได้ดีจึงได้รับความนิยมมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

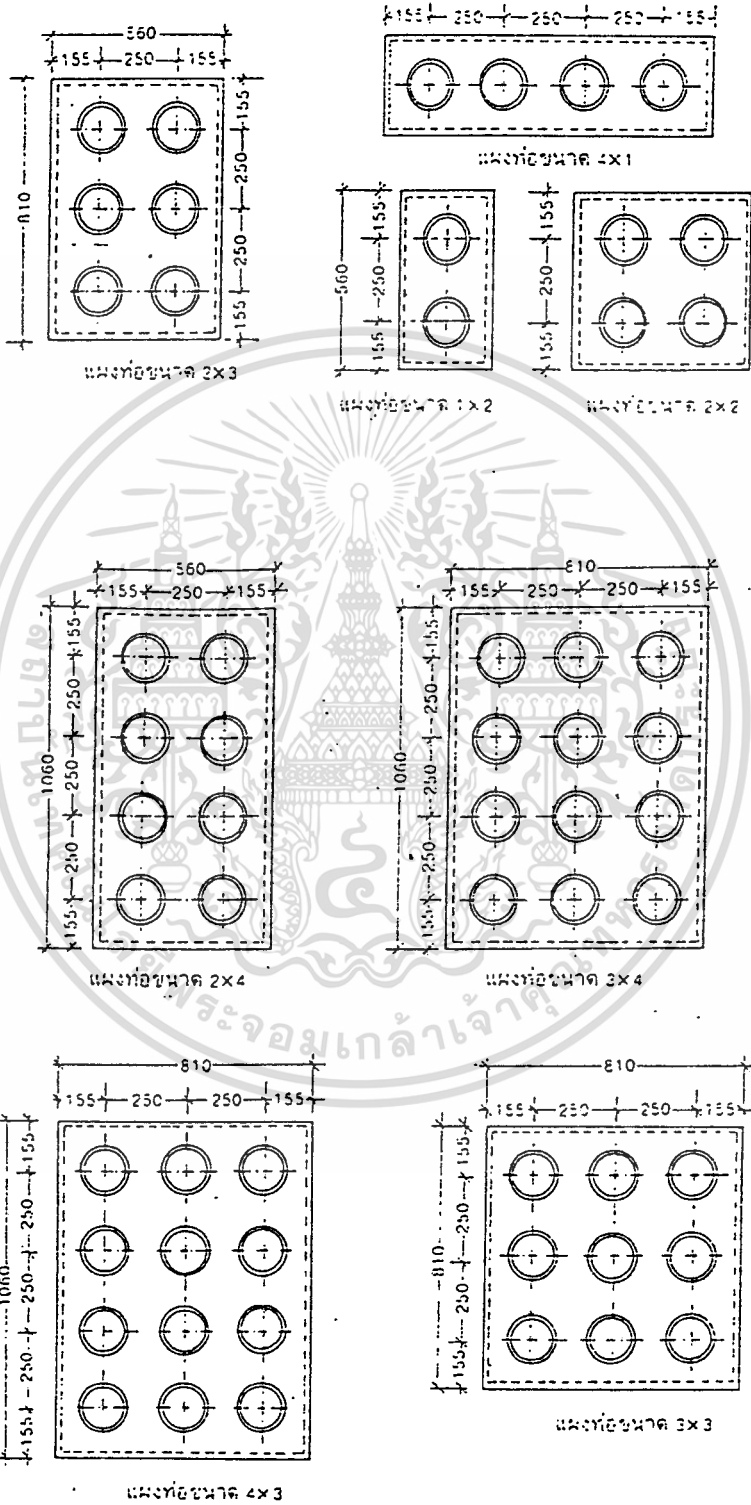


(II) ท่อเหล็กหนา (rigid steel conduit) เป็นท่อออบสังกะสี มีคุณสมบัติทนต่อแรงกดและกระแทกได้ดี นอกจากนี้ยังระบายความร้อนได้ด้วย แต่มีราคาแพง ถ้าใช้ฝังใต้ดินจะมีอายุการใช้งานสั้นกว่าท่อไชน ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นท่อต่อเหนือดินสำหรับทำสายขึ้น (riser) เท่านั้น แต่ท่อเหล็กก็มีข้อเสียคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายจะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในท่อและมีกระแสเอ็ดดี้ (eddy current) ไหลผ่านทำให้เกิดความร้อนขึ้น

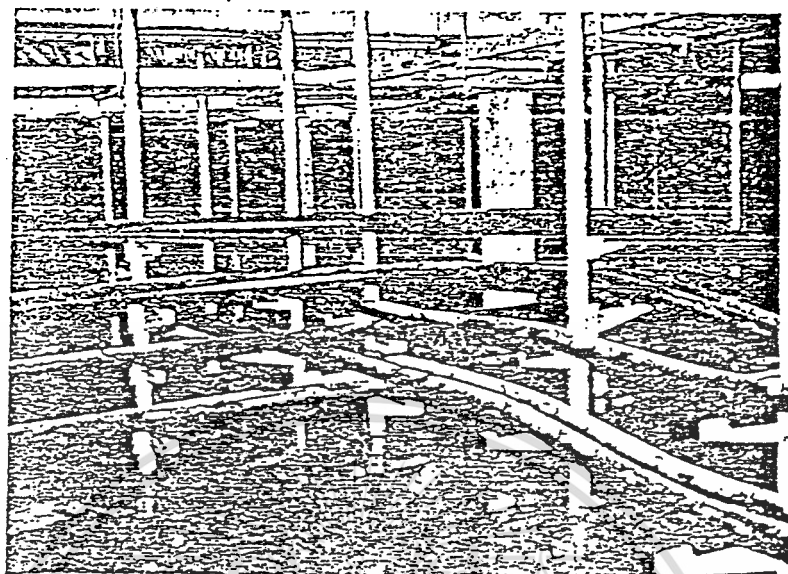
(III) ท่อโพลีเอทิลีน (high density polyethylene) เป็นท่อที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่ทนต่อแรงกดแรงกระแทกได้จำกัด ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้เป็นท่อนำสายขึ้น ถ้าใช้เป็นท่อฝังดินจะต้องหุ้มด้วยคอนกรีตก่อน เนื่องจากโพลีเอทิลีนเป็นฉนวนไฟฟ้าไม่เกิดกระแสเอ็ดดี้ จึงได้รับความนิยมมากต่อท่อเหล็ก

ท่อร้อยสายใต้ดินที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือท่อไชน เพราะมีราคาถูกกว่าชนิดอื่นๆ และยังสามารถระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย การวางท่อร้อยสายจะวางเป็นเส้นตรงโดยเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดและมีอุปสรรคน้อยที่สุดเป็นเส้นทางติดตั้ง ท่อทุกเส้นจะวางลาดไปยังบ่อพักสาย ความลาดประมาณ 5-10 องศา เพื่อป้องกันน้ำขังในท่อ การติดตั้งปกติจะมีมากกว่า 1 วงจร ดังนั้นจึงมีท่อใต้ดินอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อความเป็นระเบียบและสวยงามจึงนิยมเดินเป็นแถว ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ปกติในแถววางท่อจะมีท่อสำรองเดินเผื่อไว้สำหรับการขยายในอนาคต

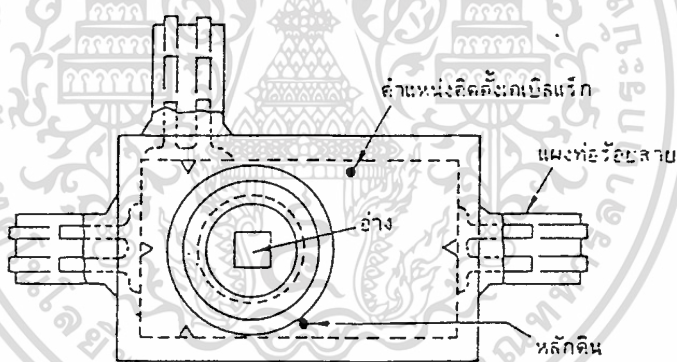
(IV) บ่อพักสาย โดยทั่วไปบ่อพักสายจะมีทั้งบ่อขนาดใหญ่ (manhole) และบ่อขนาดเล็ก (handhold) บ่อขนาดใหญ่บางครั้งเรียกว่าอุโมงค์พักสาย อย่างไรก็ตามบ่อทั้งสองชนิดสร้างใช้เพื่อวัตถุประสงค์เดียวกันคือ อำนวยความสะดวกในการลากสายและหักเลี้ยว บ่อพักสายต่างๆ ไป สร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กมีฝาปิดมิดชิด เนื่องจากอุโมงค์พักสายมีขนาดใหญ่จึงจำเป็นต้องก่อสร้างขึ้นในสถานที่ใช้งานเพราะมีน้ำหนักมาก แต่ถ้าเป็นบ่อขนาดเล็กนิยมหล่อสำเร็จรูปแล้วยกมาวางยังสถานที่ติดตั้งในภายหลัง ที่ก้นบ่อจะมีอ่าง (samp) ซึ่งเป็นปลีที่รวมของน้ำภายในบ่อและจะสูบออกเมื่อต้องการลงไปปฏิบัติงานในบ่อเท่านั้น ที่ผนังของบ่อพักสายจะมีอุปกรณ์จับยึดสายติดอยู่เป็นแถวและที่ก้นบ่อจะมีหลักดิน (ground rod) ปักอยู่โดยใช้เป็นกราวนด์ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ตามปกติท่อพักสายจะวางห่างกันประมาณ 150 ถึง 240 เมตร ทั้งนี้เพื่อมิให้ระยะทางเป็นอุปสรรคในการลากสาย แต่ในพื้นที่บางแห่งที่เป็นจุดหักเลี้ยวก็อาจตั้งบ่อพักสายให้ชัดเจนได้ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการลากสาย



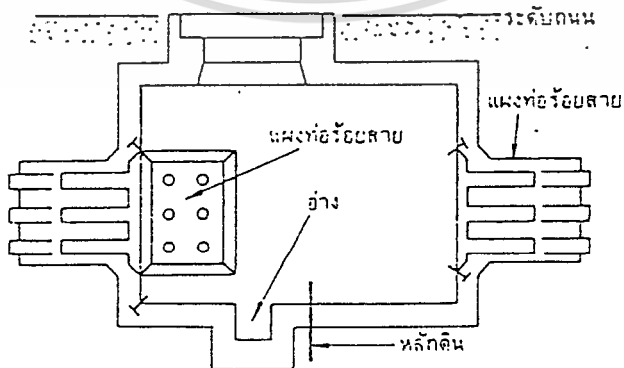
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.11 ลักษณะของแผงท่อร้อยสายขนาดต่างๆนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การเดินสายโทรศัทพ์ในเขตพักอาศัย



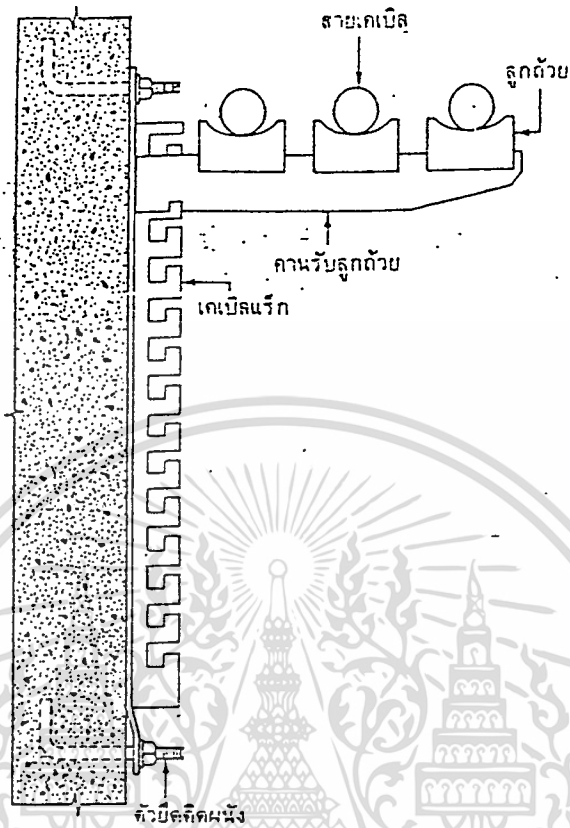
(ข) บ่อพักสายของคานบน



(ค) บ่อพักสายของคานข้าง

รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของบ่อพักสายและการติดตั้งอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) เคเบิลแตร็กและลูกถ้วยรองรับสายเคเบิล

รูปที่ 3.12 (ต่อ) ส่วนประกอบของบ่อพักสายและการติดตั้งอุปกรณ์

บทที่ 4

Neher-McGrath Calculations for Insulated Cables

กล่าวถึงการใช้ Neher-McGrath (NM) method คำนวณหาค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิล (ไม่มี shield, 2000 V_L) โดยอธิบายในรูปวงจรมูลค่าทางความร้อน พร้อมมีตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นด้วย

ในปี 1957 Neher และ McGrath ได้นำเสนอผลงานออกสู่สาธารณชนโดยกล่าวถึงการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ กับอุณหภูมิขณะทำงาน ซึ่งได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรูปแบบตัวนำและเงื่อนไขการติดตั้งแบบต่างๆ ได้ด้วย

เพื่อให้ง่ายขึ้นต่อการคำนวณค่าต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึง เฉพาะในสภาวะคงตัว (steady-state) เท่านั้น ส่วนสภาวะชั่วขณะ (transient) จะกล่าวโดยละเอียดอีกครั้งในบทที่ 5

NM method ได้รับการยอมรับจากหลายๆ สถาบันเพื่อใช้เป็นพื้นฐาน ในการคำนวณหากระแสในสายเคเบิล เช่น NEC, ICEA เป็นต้น

4.1 การวิเคราะห์เบื้องต้น

เมื่อกระแสถูกผ่านเข้าไปในตัวนำ จะทำให้เกิดความร้อน (I^2R) ขึ้น ซึ่งความร้อนนี้จะแผ่กระจายออกไปยังอากาศรอบๆ ตัวนำหรือผ่านไปสู่ดินในกรณีที่ตัวนำเป็นแบบฝัง เนื่องจากระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถูกจำกัดโดยพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ของฉนวนเคเบิล ดังนั้นพิกัดอุณหภูมิของฉนวนจึงเป็นขีดจำกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิล ความร้อน I^2R ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลนำมาเขียนเป็นวงจรมูลค่าความต้านทานความร้อนได้ดังรูปที่ 4.1 และจากรูปที่ 4.1 แปลงให้อยู่ในรูปวงจรรไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.2 สัญลักษณ์และหน่วยของตัวแปรในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงดังตารางที่ 4.1

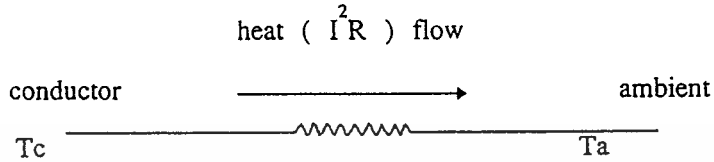
ข้อสังเกต

ในตารางที่ 4.2 แสดงความหมายของสัญลักษณ์ที่มีตัวห้อยต่างๆ ซึ่งตัวห้อยเหล่านี้จะมีความหมายสอดคล้องตามตำแหน่งนั้นๆ ของวงจรมูลค่าทางความร้อน

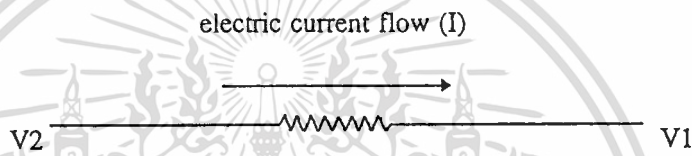
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน

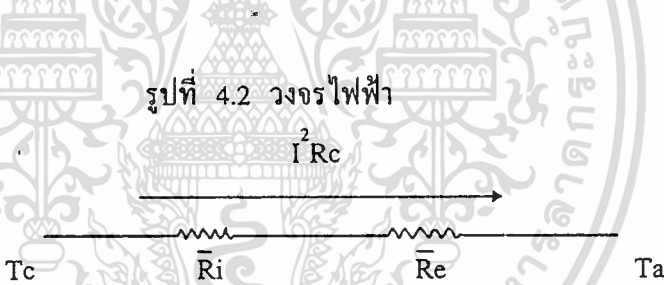
การคำนวณตามวิธี NM methode จะต้องเขียนวงจรสมมูลย์ทางความร้อนตามรูปแบบและการคิดตั้งของสายเคเบิลนั้นๆ ตัวอย่าง เช่น เคเบิลแบบ 1 แกน เดินในอากาศมีวงจรสมมูลย์ทางความร้อนดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน



รูปที่ 4.2 วงจรไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลย์ทางความร้อนสำหรับตัวนำเดี่ยวเดินลอยในอากาศ

Symbol	Electrical Circuit		Thermal Circuit		
	Parameter	Units	Symbol	Parameter	Units
V	voltage	V	T	temperature	°C
I	current	A	$I^2 R$	heat flow	W/ft
R	resistance	Ω	\bar{R}	thermal resistance	°C.ft/W

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากับวงจรสมมูลย์ทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symbol	Parameter	Unit
T_c	conductor temperature	$^{\circ}\text{C}$
T_a	ambient temperature	in
R_c	conductor resistance	$\mu\Omega/\text{ft}$
	thermal resistance	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
\bar{R}_i	insulation	
\bar{R}_j	jacket	
\bar{R}_{sd}	between cable and surrounding enclosure	
\bar{R}_d	duct wall	
\bar{R}_e	between cable and ambient air	
\bar{R}'_e	earth	
\bar{R}_{ca}	total between conductor and ambient	

ตารางที่ 4.2 ความหมายของตัวแปรในวงจรสมมูลย์ทางความร้อน

การหาวงจรสมมูลย์ทางความร้อนของสายเคเบิล มีขั้นตอนดังนี้คือ

ขั้นที่ 1 หาค่าความต้านทานความร้อนในแต่ละส่วน

ขั้นที่ 2 นำค่าความต้านทานความร้อนส่วนต่างๆ ระหว่างตัวนำและอากาศรอบข้างรวมเข้าด้วยกัน

ขั้นสุดท้าย นำค่าความต้านทานที่ได้ในขั้นที่ 2 มาต่ออนุกรมกัน ส่วนสมการ NM methode เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนแสดงไว้ในหัวข้อ 4.4 ซึ่งมีทั้งตัวนำแบบแกนเดี่ยวและ 3 แกน ทั้งแบบเดินลอยในอากาศ, ร้อยท่อเดินในอากาศ, เดินในท่อฝังดิน และฝังดินโดยตรง

ความร้อน

ความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในสายตัวนำเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านมีค่า $= I^2 R_{ac}$ (R_{ac} คือความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ) ในที่นี้ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแสดงในหน่วยของ W/ft

ในบางระบบ ความร้อนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำเป็นผลรวมจากฉนวนของเคเบิล, metallic shield และ raceway อย่างไรก็ตามสำหรับระบบ 2000 V. ค่า dielectric loss มีค่าน้อยมาก ดังนั้น

จึงไม่ได้เกิดผลจาก metallic shield และ raceway ส่วนค่า mutual heating จากสายเคเบิล ที่วางอยู่ใกล้กันจะนำมาคิดด้วยในสมการ เพื่อหาความต้านทานความร้อน

4.3 สมการคำนวณหาค่ากระแส :

ความร้อนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำ (W/ft) คูณด้วย ความต้านทานความร้อนจากตัวนำถึงอากาศรอบข้าง ($^{\circ}\text{C ft/W}$) แสดงถึงระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวนำจากอุณหภูมิรอบข้างนั้นคือ

$$(I^2 R_{ac}) \times \bar{R}_{ca} = T_c - T_a \quad (4.1)$$

หรือ

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{ac} \times \bar{R}_{ca}}} \quad (4.2)$$

(I มีหน่วยเป็น kA เพราะ R_{ac} มีหน่วยเป็น $\mu\Omega / \text{ft}$)

สมการที่ (4.2) แสดงถึงกระแสของตัวนำซึ่งสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิเมื่อมีรูปแบบการใช้งานแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นค่ากระแสที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนของสายเคเบิลนั้นๆ จะยอมรับได้

4.4 สมการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

4.4.1 ความต้านทานความร้อนของฉนวน

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\pi} \log DI/DC \quad (4.3)$$

เมื่อ DC : เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ

DI : เส้นผ่าศูนย์กลางรวมฉนวน

$\bar{\pi}$: ความต้านทานความร้อนของวัสดุ ($\bar{\pi}$ ของวัสดุต่างๆแสดงในตารางที่ 4.3)

4.4.2 ความต้านทานความร้อนของ jacket

$$\bar{R}_j = 0.0104 \bar{\pi}_j n' \frac{t}{D-t} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ \bar{p}_j = ความต้านทานความร้อนของวัสดุ (p_j ของวัสดุต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.4)
 t = ความหนาของ jacket
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางรวม jacket
 n' = จำนวนตัวนำกระแสภายใน D
 \bar{R}_d = ความต้านทานความร้อนของผนังท่อ

4.4.3 ความต้านทานความร้อนของสายเคเบิล ใน Ducts

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A'}{D_s' + B'} \quad (4.5)$$

- เมื่อ n' = จำนวนตัวนำกระแสภายใน D_s
 D_s' = effective diameter ของเคเบิลใน duct
 A', B' = ค่าคงที่ ดังตารางที่ 4.4

4.4.4 ความต้านทานความร้อนของ cables, conduit หรือ duct เมื่อลอยอยู่ในอากาศ

$$\bar{R}_e = \frac{9.5n'}{1 + 1.7 D_s' (\epsilon + 0.41)} \quad (4.6)$$

- เมื่อ D_s' = effective diameter ของ cables , conduit หรือ duct
 ϵ = effective diameter of surface emissivity

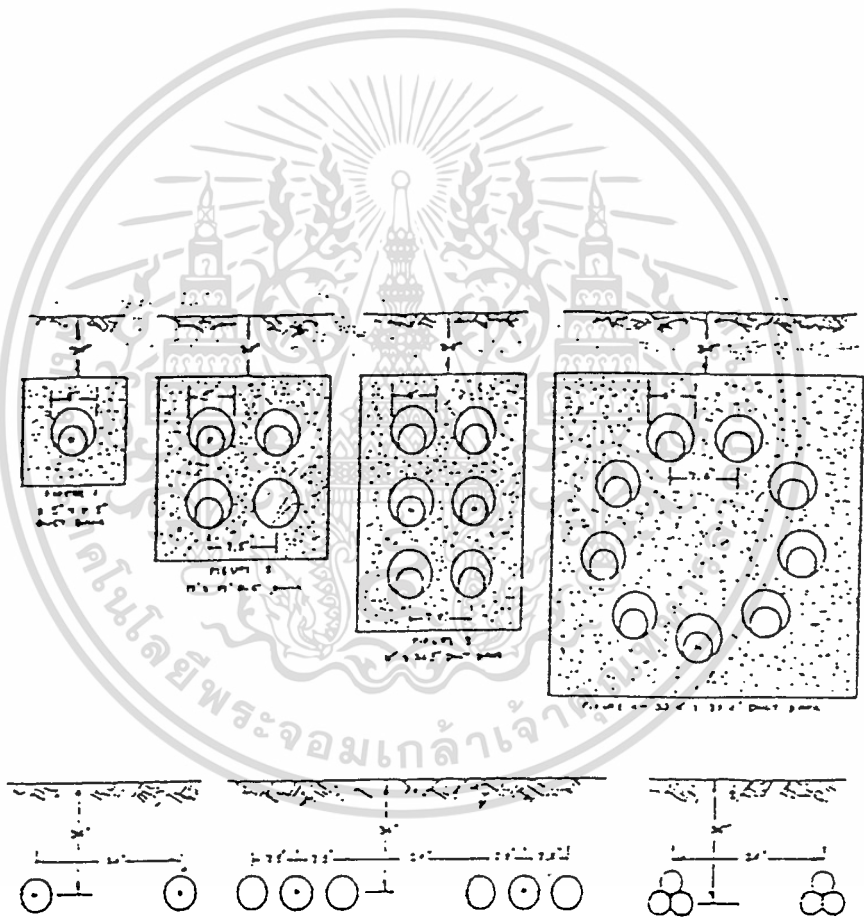
4.4.5 ความต้านทานความร้อนของดิน

$$\bar{R}_e' = 0.012 \bar{p}_{en'} \left[\log \frac{8-3}{D_e} + LF \log \left(\frac{4L \times F}{8-3} \right) \right] \quad (4.7)$$

- เมื่อ n' = จำนวนตัวนำกระแสภายใน D_e
 $\bar{p}_{e'}$ = ความต้านทานความร้อนของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- LF = loss factor
 L = ความลึกของการฝังดิน
 De = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางส่วนที่เริ่มในดินของวงจรสมมูลความร้อน
 (diameter at start of the earth portion of the thermal circuit)
 F = mutual heating factor (ดังตารางที่ 4.5)



รูปที่ 4.4 ลักษณะของ duct bank ขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Material	\bar{p}_i °C ft/W
Paper insulator(solid type)	700
Varnished insulator	600
Paper insulator(other type)	500
Rubber and rubber-like	500
Jute and textile protective covering	500
Fiber duct	480
Polyethylene	450
Transite duct	200
Somastic	100
Concrete	85

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่างๆ

Condition	A'	B'
In metallic conduit	3.2	0.19
In fiber duct in air	5.6	0.33
In fiber duct in concrete	4.6	0.27
In metallic duct in air	4.4	0.26
In metallic duct in concrete	3.7	0.22
Gas-filled pipe cable at 200lb/in ²	2.1	0.68
Oil-filled pipe cable	2.1	0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ A', B' มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 n'}{1+1.7Ds' (\epsilon+0.41)} = \frac{9.5(1)}{1+1.7(0.456)(0.95+0.41)}$$

$$\bar{R}_e = 4.625$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_e = 0.637 + 4.625$$

$$\bar{R}_{ca} = 5.262$$

$$\text{จาก } R_{dc} \text{ at } 90^\circ \text{ C} = \frac{168 \times 228.1 + 90}{228.1 + 25}$$

$$R_{ac} \text{ at } 90^\circ \text{ C} = \frac{168 \times 228.1 + 90 \times 1.0}{228.1 + 25}$$

$$R_{ac} \text{ at } 90^\circ \text{ C} = 211$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{ac} \times R_{ca}}} = \sqrt{\frac{90 - 40}{211 \times 5.262}} \text{ kA}$$

$$I = 212 \text{ A}$$

→ **ตอบ**

4.5.2 กรณีเดินในท่ออลูมิเนียมหนา

ตัวอย่างที่ 4.2 จำนวนหาคะแสของ three 1/0 AWG compact aluminum XHMW cables ซึ่งร้อยในท่ออลูมิเนียมขนาด 1 1/4 นิ้ว (ID = 1.38 นิ้ว, OD = 1.66 นิ้ว) อุณหภูมิรอบข้าง 40° C

$$\begin{aligned} \text{ข้อมูล } DC &= 0.336 \text{ นิ้ว} \\ 2t &= 0.120 \text{ นิ้ว} \\ \bar{\rho}_i &= 400^\circ \text{C ft/W} \\ R_{dc} \text{ ที่ } 25^\circ \text{ C} &= 168 \mu\Omega / \text{ft} \\ ac/dc &= 1.00 \\ T_c &= 90^\circ \text{C} \\ \epsilon &= 0.5 \\ A' &= 3.2 \\ B' &= 0.19 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำ :

จากตัวอย่างที่ 4.1

$T_c = 90^\circ C$

\bar{R}_i
 \bar{R}_{sd}
 \bar{R}_e



$$\bar{R}_i = 0.637$$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'A'}{Ds'+B'}$$

จาก $Ds' = 216 DI = 216 \times 0.456 / 100 = 0.984$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{3(3.2)}{0.984 + 0.19}$$

$T_A = 40^\circ C$

$$\bar{R}_{sd} = 8.177$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 n'}{1 + 1.7 Ds' (\epsilon + 0.41)}$$

$Ds' = OD(\text{ของท่อ}) = 1$

$$= \frac{9.5 (3)}{1 + 1.7(1.66)(0.5 + 0.41)}$$

$$= 7.987$$

$$\bar{R}_e = 7.987$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_e = 0.637 + 8.177 + 7.987$$

$$\bar{R}_{ca} = 16.8$$

จากตัวอย่างที่ 4.1

$$R_{ac} = 211$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{ac} \times \bar{R}_{ca}}} = \sqrt{\frac{90 - 40}{211 \times 16.8}}$$

$$I = 119 A$$

➔ ตอบ

4.5.3 กรณีแบบเดินฝังดิน

ตัวอย่างที่ 4.3 จำนวนหาคะแรงแซงของ three 1/0 AWG concentric copper type USE cables, เดินแบบฝังดินลึก 36 นิ้ว มี loss factor เท่ากับ 0.75, \bar{p}_e เท่ากับ $90^\circ C$ cm/W, อุณหภูมิรอบข้าง $20^\circ C$

ข้อมูล DC = 0.373 นิ้ว

2t = 0.160 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การคำนวณหากระแสในสายเคเบิล

ในการการคำนวณหาค่ากระแสที่ภาวะของอุณหภูมิเปลี่ยนไปนั้นจะต้องคำนวณทั้งสภาวะเสถียร และในตอนที่ไม่เสถียรที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน โดยจะอาศัยกฎของโอห์มและกฎของเคอร์ชอฟฟ์ในการเขียนเป็นวงจรทางความร้อนขึ้นมาเมื่อมีความร้อนก็จะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและจะทำให้เกิด dielectric loss ขึ้นมาซึ่งเป็นผลมาจากกระแสแน่นอน พร้อมทั้งต้องคำนึงถึงการสูญเสียที่มาจาก sheat และ conduit ส่วนในกรณีที่เป็นระบบสายเคเบิลใต้ดิน จะต้องพิจารณาถึงความต้านทานทางความร้อนของดิน และยังคงคำนึงถึงผลของความร้อนที่มาจากสายเคเบิลอื่นๆที่อยู่ในระบบเดียวกันหรือระบบข้างเคียงด้วย

5.1 ความหมายของสัญลักษณ์(Nomenclature)

ก่อนอื่นจะกล่าวถึงสัญลักษณ์ที่ใช้เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยสัญลักษณ์บางตัวจะมีใช้เฉพาะในโครงการนี้เท่านั้น สัญลักษณ์ดังกล่าวมีดังนี้

- (*AF*) หมายถึง attainment factor, per unit (pu)
- A_s* หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของ shielding tape หรือ skid wire, square inches
- α หมายถึง ค่าของความร้อนที่แผ่ออกมา, square inches per hour
- CI* หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, circular inches
- d* หมายถึง ระยะห่าง, inches
- d₁₂* หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 2
- d_{12'}* หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงส่วน image ของตัวที่ 2
- d₁₁* หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงจุดที่มีสิ่งรบกวน
- d_{11'}* หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงส่วน image ของสิ่งรบกวน
- D* หมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลาง, inches
- D_o* หมายถึง ภายในของตัวนำ
- D_e* หมายถึง ภายนอกของตัวนำ

D_i	หมายถึง ภายนอกของ insulation
D_s	หมายถึง ภายนอกของ sheath
D_{sm}	หมายถึง ภายนอกเฉลี่ยของ sheath
D_j	หมายถึง ภายนอกของ jacket
D_s	หมายถึง เฉลี่ยของสายเคเบิลที่วางใกล้กันเป็นรูปสามเหลี่ยม
D_p	หมายถึง ภายในของ duct wall, pipe หรือ conduit
D_e	หมายถึง เริ่มจาก earth portion ของวงจรทางความร้อน
E	หมายถึง แรงดัน line to neutral, kilovolt (kV)
ϵ	หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการแผ่กระจายตามผิว
ϵ_r	หมายถึง ตามแต่นชนิดของ ความเหนียวน้ำ หรือ ความจุ ของ insulation
f	หมายถึง ความถี่, circle per second
F, F_{int}	หมายถึง ผลคูณอัตราส่วนของ ระยะห่าง
$F(x)$	หมายถึง ค่าที่ได้จากฟังก์ชัน Bessel ของ x (ตาราง 5.3, และรูปที่ 5.1)
G	หมายถึง geometric factor
G_i	หมายถึง ได้จากความต้านทานของ insulation
G_2	หมายถึง ได้จาก dielectric loss
G_b	หมายถึง ได้จาก duct bank (รูปที่ 5. 2)
I	หมายถึง ค่ากระแสของตัวนำ, kiloamperes
k_s	หมายถึง แฟกเตอร์ความถูกต้องของ skin effect
k_p	หมายถึง แฟกเตอร์ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านความร้อน
l	หมายถึง ความหนาของ shielding หรือ skid wire, inches
L	หมายถึง ความลึกของการฝังสายเคเบิลนับจากพื้นดิน, inches
L_b	หมายถึง ความลึกจากพื้นดินถึงจุดศูนย์กลางของ duct bank, inches
(lf)	หมายถึง load factor, per unit
(LF)	หมายถึง loss factor, per unit
n	หมายถึง จำนวนตัวนำต่อหนึ่งชุดสายเคเบิล
n'	หมายถึง จำนวนตัวนำภายในหนึ่งสายเคเบิล
N	หมายถึง จำนวนของกลุ่มสายเคเบิลในระบบ
P	หมายถึง ความยาวโดยรอบของ duct bank, inches

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของ $\cos \phi$ หมายถึง เพาเวอร์แฟกเตอร์ของ insulation ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

q_s	หมายถึง อัตราส่วนผลรวมของความสูญเสียใน conductor และ sheath ต่อความสูญเสียใน conductor
q_e	หมายถึง อัตราส่วนผลรวมของความสูญเสียใน conductor, sheath และ conduit ต่อความสูญเสียใน conductor
R	หมายถึง ความต้านทานทางไฟฟ้า, ohms
R_{dc}	หมายถึง ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ
R_{ac}	หมายถึง ความต้านทานกระแสสลับรวมต่อตัวนำ
R_s	หมายถึง ความต้านทานกระแสตรงของ sheath หรือใน shield-skid wire
\bar{R}	หมายถึง ความต้านทานทางอุณหภูมิ (ต่อความสูญเสียของตัวนำ) , thermal ohm-feet
\bar{R}_i	หมายถึง ของ insulation
\bar{R}_j	หมายถึง ของ jacket
\bar{R}_{sd}	หมายถึง ระหว่างผิวของสายเคเบิลกับบริเวณรอบข้าง
\bar{R}_d	หมายถึง ของ duct wall หรือวัสดุที่ใช้หุ้มสายเคเบิล
\bar{R}_{se}	หมายถึง ระหว่าง sheath กับเส้นผ่าศูนย์กลาง De
\bar{R}_e	หมายถึง ระหว่าง conduit กับ ambient
$\bar{R}_{e'}$	หมายถึง ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลาง De กับ ambient earth
$\bar{R}_{ca'}$	หมายถึง ระหว่าง conductor กับ ambient สำหรับ conductor loss
$\bar{R}_{ca'}$	หมายถึง ช่วง transient ของระบบสายเคเบิล
$\bar{R}_{da'}$	หมายถึง ระหว่าง conductor กับ ambient สำหรับ dielectric loss
\bar{R}_{int}	หมายถึง ได้จากผลของ interference
\bar{R}_{ya}	หมายถึง ระหว่าง steam pipe กับ ambient earth
ρ	หมายถึง ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า, circular mil ohms per foot
$\bar{\rho}$	หมายถึง ความต้านทานจำเพาะทางความร้อน, degrees centigrade centimeter per watt
s	หมายถึง ระยะในสายเคเบิลที่มี 3-conductor ระหว่างกระแสที่จุด center ของตัวนำและแกนของสายเคเบิล, inches
S	หมายถึง ระยะห่างของสายเคเบิลที่อยู่ติดกันนับจากแกนของสายเคเบิล, inches
t, T	หมายถึง ความหนา, inches
T	หมายถึง อุณหภูมิ, degrees centigrade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_a	หมายถึง อุณหภูมิรอบข้างเป็น air หรือ earth
T_c	หมายถึง อุณหภูมิของตัวนำ
T_m	หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของ medium
ΔT	หมายถึง ผลต่างของอุณหภูมิ, degrees centigrade
ΔT_c	หมายถึง ของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากกระแสทำให้เกิดความสูญเสีย
ΔT_d	หมายถึง ของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจาก dielectric loss
ΔT_{int}	หมายถึง ของสายเคเบิลที่เพิ่มขึ้นจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอก
τ	หมายถึง อุณหภูมิที่ความต้านทานศูนย์, degrees centigrade
V_w	หมายถึง ความเร็วลม, miles per hour
W	หมายถึง ความสูญเสียในสายเคเบิล, watt per conductor foot
W_c	หมายถึง ความสูญเสียในตัวนำ
W_s	หมายถึง ความสูญเสียใน sheath หรือ shield
W_p	หมายถึง ความสูญเสียใน pipe หรือ conduit
W_d	หมายถึง ความสูญเสียใน dielectric
X_m	หมายถึง mutual reactance ของ conductor ถึง sheath หรือ shield, microohms per foot
Y	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของ ac/dc ratio, pu
Y_c	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน conductor
Y_s	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน sheath หรือ shield
Y_p	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน pipe หรือ conduit
Y_a	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน armor

5.2 การพิจารณาวงจรทางความร้อน

5.2.1 การคำนวณหาผลต่างของอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากตัวนำถึงบริเวณรอบๆของตัวนำจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น ซึ่งสามารถแยกออกเป็นสองส่วนดังนี้ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกระแส (I^2R) ใน conductor sheath หรือ conduit คือ ΔT_c และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก dielectric loss คือ ΔT_d ดังนั้นจะได้ว่า

$$T_c - T_a = \Delta T_c + \Delta T_d \quad (\text{degrees centigrade}) \quad (5.1)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่ละส่วนเกิดจากความร้อน heat flow ไหลผ่านความต้านทานทางความร้อน และเมื่อเกิดความสูญเสียขึ้นในระบบสายเคเบิลหลายๆจุดจะทำให้ heat flow ในวงจรทางความร้อน เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น

$$\Delta T_c = W_c(\bar{R}_i + q_s \bar{R}_{se} + q_e \bar{R}_e) \quad (\text{degrees centigrade}) \quad (5.2)$$

ในการจ่ายกระแสให้โหลดนั้น โดยทั่วไปโหลดจะมีแบบคงที่และแบบไม่คงที่ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงค่าของ load factor (lf) ด้วย และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดจะทำให้ loss factor (LF) เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งทั้ง load factor และ loss factor จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกัน ดังนี้

$$(LF) = 0.3(lf) + 0.7(lf)^2 \quad (\text{per unit}) \quad (5.3)$$

เมื่อพิจารณาระบบสายเคเบิลใต้ดินจะเห็นว่า ในการหาค่าสูงสุดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนั้น หาได้จากระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดบ่อยๆและเป็นวัฏจักรเหมือนเดิม ส่วนความสูญเสีย และ heat flow หาได้จากช่วงที่มี โหลดสูงสุด โดยจะให้ loss factor เป็น base และ heat flow ก็ จะลดลงด้วยค่า load factor ดังนั้นจากสมการที่ 5. 2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta T_c = W_c[\bar{R}_i + q_s \bar{R}_{se} + q_e(\bar{R}_{ex} + (LF)\bar{R}_{xa})] \quad (\text{degrees centigrade}) \quad (5.4)$$

ส่วนผลต่างของอุณหภูมิจาก conductor ถึง D_x ที่ขึ้นอยู่กับ heat-loss ได้มาจากช่วงที่โหลด สูงสุด และผลต่างของอุณหภูมิจาก D_x ถึง ambient ก็จะขึ้นอยู่กับ average loss ที่คิดในช่วง 24 ชั่วโมง สำหรับสายเคเบิลหรือท่อในอากาศจะมีความร้อนสะสมในระบบนั้นน้อย และผลต่างของ อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดที่โหลดสูงสุดเช่นกัน

เมื่อจำนวนของสายเคเบิลที่ติดตั้งด้วยกันใต้พื้นดินหรือใน duct bank ความร้อนจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากสายเคเบิลแต่ละตัวนั่นเอง ในการคำนวณหาผลต่างของอุณหภูมิที่สายเคเบิลแต่ละสาย นั้น หาได้จากสมการที่ 5.4 โดยจะต้องสมมติให้กระแสไหลในสายเคเบิลแต่ละสายเท่าๆกันและ จ่ายโหลดที่มีวัฏจักรเหมือนกัน ดังนั้นเมื่อมีจำนวนของสายเคเบิลในระบบอยู่ N ตัวจะได้ว่า

$$\Delta T_c = W_c[\bar{R}_i + q_s \bar{R}_{se} + q_e(\bar{R}_{ex} + (LF)\bar{R}_{xa} + (N-1)\bar{R}_{pa})] \quad (\text{degrees centigrade}) \quad (5.5)$$

$$\Delta T_c = W_c(\bar{R}_i + q_e \bar{R}_{se} + q_e \bar{R}_e) \quad (\text{degrees centigrade}) \quad (5.5A)$$

เมื่อสมการที่ 5.5 เขียนอยู่ในเทอมของความต้านทานทางความร้อน \bar{R}_e

ส่วนผลต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจาก dielectric loss นั้นในระบบแรงดันต่ำไม่ค่อยมีผลมากนัก แต่ในระบบแรงสูงมีผลมาก ซึ่งจะต้องพิจารณาอย่างละเอียดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยจะต้องคำนวณทั้งในช่วง transient และ steady state ค่าของ dielectric loss d เกิดขึ้นที่ช่วงกลางของความต้านทานทางความร้อนระหว่าง conductor กับ sheath ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก dielectric loss ΔT_d หาได้จาก

$$\Delta T_d = W_d \bar{R}_{da'} \quad (\text{degrees centigrade}) \quad (5.6)$$

โดยที่ค่าความต้านทานทางความร้อน $\bar{R}_{da'}$ จะขึ้นอยู่กับค่าของ \bar{R}_i , \bar{R}_{se} และ \bar{R}_e ตามแต่กรณีดังสมการที่ผ่านมา

5.2.2 การคำนวณหาขนาดกระแสของสายเคเบิล

ในการคำนวณหาขนาดกระแสจะต้องคิดผลของความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำเข้ามาด้วย ซึ่งจะอยู่ในหน่วย microhms per foot ดังนั้นในสมการที่ 5.5A นำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta T_c = I^2 R_{dc}(I + Y_c) \bar{R}_{ca'} \quad (\text{degrees centigrade}) \quad (5.7)$$

ซึ่งในส่วนของ $R_{dc}(I + Y_c)$ เป็นค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำ และ $\bar{R}_{ca'}$ เป็นความต้านทานทางความร้อนรวมของวงจรทางความร้อนดังนี้

$$\bar{R}_{ca'} = \bar{R}_i + q_s \bar{R}_{se} + q_e \bar{R}_e \quad (\text{thermal ohm-feet}) \quad (5.8)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 5.1 จะได้ว่า

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(I + Y_c) \bar{R}_{ca'}}} \quad (\text{kiloampares}) \quad (5.9)$$

5.3 การพิจารณาหาค่าความสูญเสียและพารามิเตอร์ต่างๆ

5.3.1 การคำนวณหาค่าความต้านทานกระแสตรง

การคำนวณหาค่าความต้านทานของตัวนำจะต้องรวม lay factor เพิ่มขึ้นอีก 2% จากตาราง 5.1 จะได้ว่า

Electrical Resistivity of Various Materials

Material	Circular Mil Ohms per Foot at 20 C	r, C
Copper (100% IACS*)	10 371	231.5
Aluminum (61% IACS)	17 002	228.6
Commercial Bronze (43.6% IACS)	23.6	564
(90 Cu-10 Zn)		
Brass (27.3% IACS)	38.0	912
(70 Cu-30 Zn)		
Lead (7.84% IACS)	132.3	216

* International Annealed Copper Standard.

ตาราง 5.1 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่างๆ

$$R_{dc} = \frac{1.02 \rho_c}{CI} \quad (\text{microohms per foot at } 20^\circ\text{C}) \quad (5.10)$$

หรือ

$$R_{dc} = \frac{12.9}{CI} \quad (\text{for 100% IACS copper conductor at } 75^\circ\text{C}) \quad (5.10A)$$

หรือ

$$R_{dc} = \frac{21.2}{CI} \quad (\text{for 61% IACS aluminum at } 75^\circ\text{C}) \quad (5.10B)$$

เมื่อ CI คือ ขนาดของตัวนำในหน่วย circular inches และ ρ_c คือ ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าในหน่วย circular mil ohms per foot โดยในการหาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆจะต้องทำการเทียบจากค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 20°C หากจาก $(\tau + T)/(\tau + 20)$ ส่วนความต้านทานของ sheath หาได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\rho_c}{4 D_{smt}} \quad (\text{microhms per foot at } 20^\circ\text{C}) \quad (5.11)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \frac{37.9}{D_{smt}} \quad (\text{for lead at } 50^\circ\text{C}) \quad (5.11A)$$

หรือ

$$R_s = \frac{4.75}{D_{smt}} \quad (\text{for 61\% aluminum at } 50^\circ\text{C}) \quad (5.11B)$$

และ

$$D_{sm} = D_s - t \quad (\text{inches}) \quad (5.12)$$

สำหรับตัวนำที่มี shield หรือ skid wire ด้วยสามารถหาค่าความต้านทานได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\pi \rho_s}{4 A_s} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi D_{sm}}{l} \right)^2} \quad (\text{per part, microhms per foot at } 20^\circ\text{C}) \quad (5.13)$$

ค่าความต้านทานของ shield และ skid wire สามารถหาจากการวัดทางไฟฟ้าได้เหมือนกัน

5.3.2 การคำนวณหาค่าความสูญเสียต่างๆ

ความสูญเสียใน conductor, sheath และ pipe หรือ conduit นิยมหาในสัดส่วนของ ac/dc

ดังนี้

$$R_{ac} / R_{dc} = I + Y_c + Y_s + Y_p \quad (5.14)$$

โดยอัตราส่วน ac/dc ของ conductor คือ $I + Y_c$ เมื่อพิจารณาที่ sheath หรือ shield จะได้ $I + Y_c + Y_s$ และเมื่อพิจารณาที่ pipe หรือ conduit จะได้ $I + Y_c + Y_s + Y_p$ ซึ่งจะได้ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นใน conductor, sheath และ pipe ดังนี้

$$W_c = I^2 R_{dc} (I + Y_c) \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (5.15)$$

$$W_s = I^2 R_{dc} Y_s \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (5.16)$$

$$W_p = I^2 R_{dc} Y_p \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (5.17)$$

เมื่อรู้ค่าของ Y_c , Y_s และ Y_p ก็สามารถหาค่าความสูญเสียต่างๆได้ ซึ่งค่าความสูญเสียนี้ก็จะมีนำไปหาค่า q_s และ q_e ต่อไป โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_s = \frac{W_c + W_s}{W_c} = 1 + \frac{Y_s}{1 + Y_c} \quad (5.18)$$

$$q_s = \frac{W_c + W_s + W_p}{W_c} = 1 + \frac{Y_s + Y_p}{1 + Y_c} \quad (5.19)$$

โดยที่ตัวแฟกเตอร์ Y_c เป็นผลรวมของ Y_{cs} ที่เกิดจาก skin effect และ Y_{cp} ที่เกิดจาก proximity effect และค่าความสูญเสียของตัวนำสามารถหาได้จาก

$$W_c = I^2 R_{dc} (1 + Y_{cs} + Y_{cp}) \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (5.20)$$

ซึ่งจะเป็นการคิดผลของ skin effect เข้ามาด้วยโดยหาจาก skin effect function $F(x)$ ดังนี้

$$Y_{cs} = F(x_s) \quad (5.21)$$

$$x_s = 0.875 \sqrt{\frac{fk_s}{R_{dc}}} = \frac{6.80}{\sqrt{R_{dc}/k_s}} \quad (\text{at 60 cycles}) \quad (5.22)$$

เมื่อค่า k_s หาได้จากตาราง 5.2 แล้วนำมาหาค่า $F(x)$ ในตาราง 5.3 หรือหาได้จากรูปที่ 5.1 ดังนี้

Electrical Resistivity of Various Materials

Material	Circular Mil Ohms per Foot at 20 C	r. C
Copper (100% IACS)*	10.371	234.6
Aluminum (61% IACS)	17.002	223.1
Commercial Bronze (43.6% IACS)	23.8	564
(90 Cu-10 Zn)		
Brass (27.3% IACS)	38.0	912
(70 Cu-30 Zn)		
Lead (7.84% IACS)	132.3	236

* International Annealed Copper Standard.

ตาราง 5.1 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่างๆ

หรือหาได้จากกรคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \frac{D_c - D_o}{D_c + D_o} \left(\frac{D_c + 2D_o}{D_c + D_o} \right)^2 \tag{5.23}$$

Recommended Values of k , and k_p

Conductor Construction	Coating on Strands	Treatment	k	k_p
Concentric round	None	None	1.0	1.0
Concentric round	Tin or alloy	None	1.0	1.0
Concentric round	None	Yes	1.0	0.80
Compact round	None	Yes	1.0	0.6
Compact segmental	None	None	0.435	0.6
Compact segmental	Tin or alloy	None	0.5	0.7
Compact segmental	None	Yes	0.435	0.37
Compact sector	None	Yes	1.0	(see note)

NOTES:

1. The term "treated" denotes a completed conductor which has been subjected to a drying and impregnating process similar to that employed on paper power cable.
2. Proximity effect on compact sector conductors may be taken as one-half of that for compact round having the same cross-sectional area and insulation thickness.
3. Proximity effect on annular conductors may be approximated by using the value for a concentric round conductor of the same cross-sectional area and spacing. The increased diameter of the annular type and the removal of metal from the center decreases the skin effect but, for a given axial spacing, tends to result in an increase in proximity.
4. The values listed above for compact segmental refer to four segment constructions. The "uncoated-treated" values may also be taken as applicable to four segment compact segmental with hollow core (approximately 0.75 inch clear). For "uncoated-treated" six segment hollow core compact segmental limited test data indicates k , and k_p values of 0.39 and 0.33 respectively.

ตาราง 5.2 ค่า k_s และ k_p สำหรับรูปแบบตัวนำแบบต่างๆ

เมื่อเทียบกับการหาจาก Bessel function ในแบบเกิด skin effect ที่ตัวนำและที่ความถี่ 60 cycle ค่าที่ได้จากสมการที่ 5.23 จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.01 จากค่า magnitude สำหรับ copper หรือ aluminum ส่วนค่า k_p นั้นสามารถใช้กับตัวนำตีเกลียวได้เช่นกัน โดยได้แสดงค่าเอาไว้ในตาราง 5.2 ส่วนค่า Y_{cp} สามารถหาได้ดังนี้

$$Y_{cp} = F_{(xp)} \left(\frac{D_c}{S} \right)^2 \left[\frac{1.18}{F_{(xp)} + 0.27} + 0.312 \left(\frac{D_c}{S} \right)^2 \right] \tag{5.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

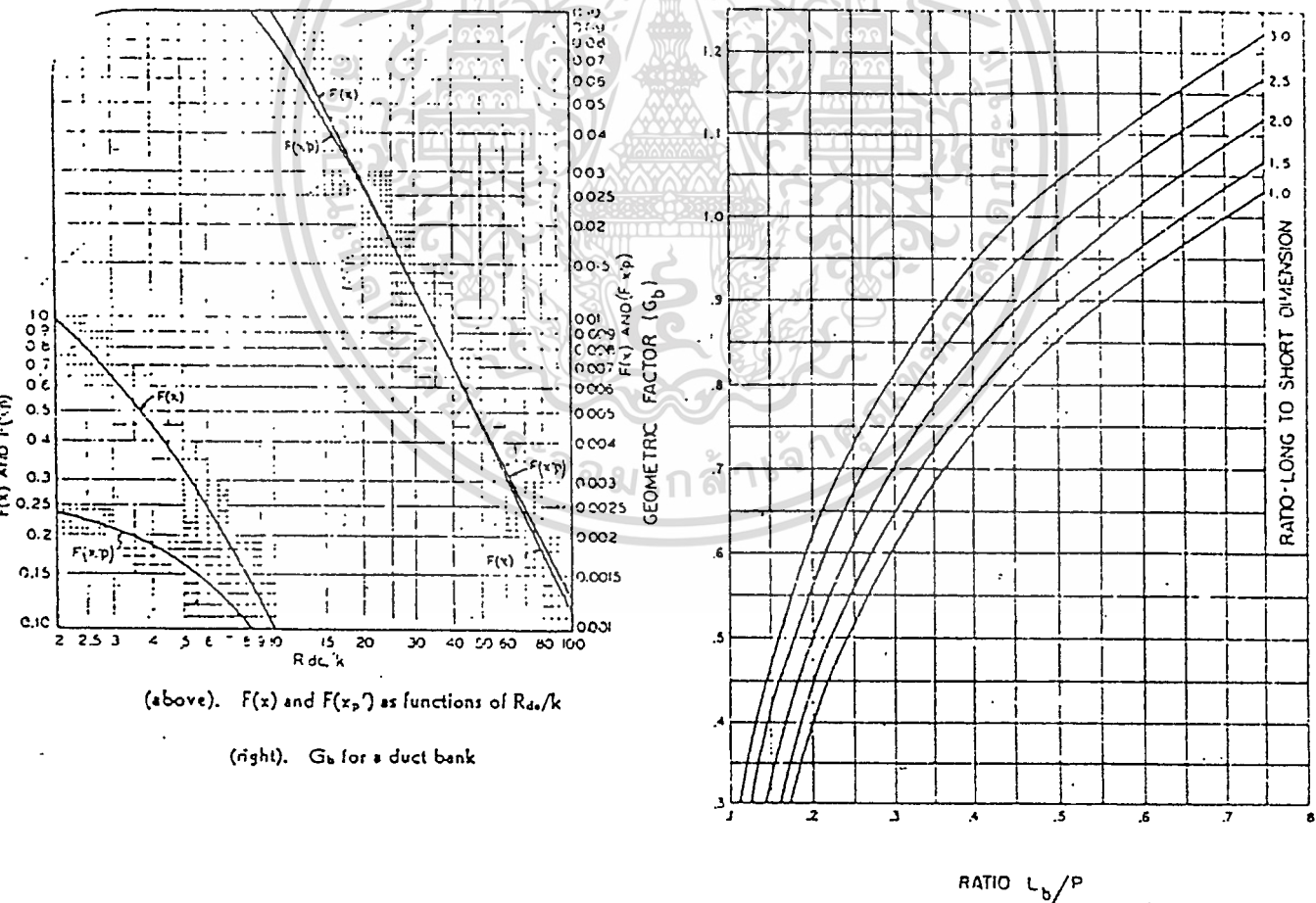
เมื่อเทอมที่สองมีค่าน้อยกว่าเทอมที่หนึ่งมากๆ จึงสามารถเขียนสมการที่ 5.24 ใหม่ได้ดังนี้

$$Y_{cp} = 4F_{(xp)} \left[\frac{0.295(D_c/S)^2}{F_{(xp)} + 0.27} \right] = 4 \left(\frac{D_c}{S} \right)^2 F_{(xp')} \quad (5.24A)$$

และค่าของ x_p หาได้จาก

$$x_p = \frac{6.80}{\sqrt{R_{dc}/k_p}} \quad (5.25)$$

โดยฟังก์ชัน $F_{(xp')}$ แสดงเอาไว้ในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของ $F(x), F(x_p)$

ในฟังก์ชันของ R_{dc}/k

รูปที่ 5.2 ค่า G_b สำหรับ Duct Bank

การติดตั้งตัวนำไว้กับรางรองสายมีลักษณะคล้ายกันกับการติดตั้งไว้ในท่อ การหาค่าต่างๆ ประมาณได้จากสมการที่ 5.24 และ 5.24A โดยที่แฟคเตอร์ Y_s เป็นผลรวมของแฟคเตอร์สองตัว คือ Y_{sc} ที่ทำให้เกิดกระแส circulating และ Y_{se} ที่ทำให้เกิดกระแส eddy ส่วนค่าความสูญเสียที่ shield หรือ sheath หาได้จาก

$$W_s = I^2 R_{dc}(Y_{sc} + Y_{se}) \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (5.26)$$

ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากยิ่งขึ้น เมื่อมีการติดตั้งสายเคเบิลสามเส้นไว้ในท่อเดียวกัน และเมื่อพิจารณาสายเคเบิลตัวนำเดี่ยวที่มี sheath สามชั้นจะได้ค่า Y_{sc} ดังนี้

$$Y_{sc} = \frac{R_s / R_{dc}}{1 + (R_s / X_m)^2} \quad (5.27)$$

เมื่อ $(R_s / X_m)^2$ มีค่ามากๆ และเป็นกรณีของสายเคเบิลแบบ shielded nonleaded จะสามารถเขียนสมการที่ 5.27 ใหม่ได้ดังนี้

$$Y_{sc} = \frac{X_m}{R_s R_{dc}} \quad (5.27A)$$

และ

$$X_m = 0.882 f \log(2S / D_{sm}) \quad (\text{microhms per foot}) \quad (5.28)$$

$$X_m = 52.9 \log(2S / D_{sm}) \quad (\text{microhms per foot at 60 cycle}) \quad (5.28A)$$

สำหรับการติดตั้งแบบใช้รางรองสายค่า X_m หาได้จาก

$$X_m = 52.9 \log\left(\frac{2.52S}{D_{sm}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{S}{D_p - S}\right)^2} \quad (\text{microhms per foot at 60 cycl}) \quad (5.29)$$

หรือ

$$X_m = 52.9 \log(2.3S / D_{sm}) \quad (\text{approximately}) \quad (5.29A)$$

โดยที่ค่าเฉลี่ยของ X_m นี้ได้แสดงไว้ในตาราง 5.4 ซึ่งเป็นค่าสำหรับสายเคเบิลที่ติดตั้งแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า และผลของกระแส eddy ในสายเคเบิลที่ติดตั้งแบบดังกล่าวจะได้ค่า Y_{se} ออกมาดังนี้

$$Y_{se} = \frac{3R_s / R_{dc}}{\left(\frac{5.2R_s}{f}\right)^2 + \frac{1}{5}\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right)^2} \left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2 \left[1 + \frac{5}{12}\left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2 \right] \quad (5.30)$$

และเมื่อค่าของ $(5.2R_s / f)^2$ มากกว่า $(1/5)(2S / D_{sm})^2$ มากๆ จะสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$Y_{se} = \frac{396}{R_s R_{dc}} \left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2 \left[1 + \frac{5}{12}\left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2 \right] \quad (\text{approximately at 60 cycle}) \quad (5.30A)$$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.3...	0.00...	0.00...	0.01...	0.01...	0.01...	0.01...	0.01...	0.01...	0.01...	0.01...
0.4...	0.01...	0.01...	0.02...	0.02...	0.02...	0.02...	0.02...	0.03...	0.03...	0.03...
0.5...	0.03...	0.04...	0.04...	0.04...	0.05...	0.05...	0.05...	0.06...	0.06...	0.06...
0.6...	0.07...	0.07...	0.08...	0.08...	0.09...	0.10...	0.10...	0.11...	0.11...	0.12...
0.7...	0.12...	0.13...	0.14...	0.15...	0.16...	0.17...	0.18...	0.19...	0.19...	0.20...
0.8...	0.21...	0.22...	0.24...	0.25...	0.26...	0.28...	0.29...	0.30...	0.31...	0.33...
0.9...	0.34...	0.36...	0.38...	0.39...	0.41...	0.43...	0.45...	0.47...	0.48...	0.50...
1.0...	0.52...	0.54...	0.56...	0.58...	0.61...	0.63...	0.65...	0.68...	0.70...	0.73...
1.1...	0.76...	0.79...	0.81...	0.84...	0.87...	0.90...	0.94...	0.97...	1.00...	1.03...
1.2...	1.07...	1.11...	1.14...	1.18...	1.22...	1.26...	1.30...	1.34...	1.39...	1.42...
1.3...	1.47...	1.52...	1.56...	1.61...	1.66...	1.71...	1.76...	1.81...	1.86...	1.92...
1.4...	1.97...	2.02...	2.08...	2.14...	2.20...	2.26...	2.32...	2.39...	2.45...	2.52...
1.5...	2.58...	2.65...	2.72...	2.79...	2.86...	2.93...	3.01...	3.08...	3.16...	3.24...
1.6...	3.32...	3.40...	3.49...	3.57...	3.66...	3.75...	3.83...	3.92...	4.02...	4.11...
1.7...	4.21...	4.30...	4.40...	4.50...	4.60...	4.70...	4.81...	4.91...	5.02...	5.13...
1.8...	5.24...	5.35...	5.47...	5.58...	5.70...	5.82...	5.94...	6.06...	6.19...	6.31...
1.9...	6.44...	6.57...	6.70...	6.83...	6.97...	7.11...	7.24...	7.38...	7.53...	7.67...
2.0...	7.82...	7.96...	8.11...	8.26...	8.42...	8.57...	8.73...	8.89...	9.05...	9.21...
2.1...	9.38...	9.54...	9.71...	9.88...	10.05...	10.22...	10.40...	10.58...	10.76...	10.94...
2.2...	11.13...	11.31...	11.50...	11.69...	11.88...	12.07...	12.27...	12.47...	12.67...	12.87...
2.3...	13.07...	13.27...	13.48...	13.68...	13.90...	14.11...	14.33...	14.54...	14.76...	14.98...
2.4...	15.21...	15.43...	15.66...	15.89...	16.12...	16.35...	16.58...	16.82...	17.16...	17.30...
2.5...	17.54...	17.78...	18.03...	18.27...	18.52...	18.78...	19.03...	19.28...	19.54...	19.80...
2.6...	20.06...	20.32...	20.68...	20.85...	21.12...	21.38...	21.65...	21.93...	22.20...	22.48...
2.7...	22.75...	23.03...	23.31...	23.60...	23.88...	24.17...	24.45...	24.74...	25.03...	25.33...
2.8...	25.62...	25.92...	26.21...	26.51...	26.81...	27.11...	27.42...	27.72...	28.03...	28.34...
2.9...	28.65...	28.96...	29.27...	29.58...	29.90...	30.21...	30.53...	30.85...	31.17...	31.49...
3.0...	31.81...	32.13...	32.45...	32.78...	33.11...	33.44...	33.77...	34.10...	34.43...	34.77...
3.1...	35.10...	35.44...	35.78...	36.11...	36.45...	36.79...	37.13...	37.47...	37.82...	38.16...
3.2...	38.50...	38.85...	39.20...	39.55...	39.89...	40.24...	40.59...	40.94...	41.29...	41.65...
3.3...	42.00...	42.35...	42.71...	43.06...	43.42...	43.78...	44.14...	44.49...	44.85...	45.21...
3.4...	45.57...	45.93...	46.29...	46.66...	47.02...	47.38...	47.74...	48.11...	48.47...	48.84...
3.5...	49.20...	49.57...	49.94...	50.30...	50.67...	51.04...	51.40...	51.77...	52.14...	52.51...
3.6...	52.88...	53.25...	53.62...	53.99...	54.36...	54.73...	55.10...	55.48...	55.85...	56.22...
3.7...	56.59...	56.96...	57.33...	57.71...	58.08...	58.45...	58.82...	59.20...	59.57...	59.94...
3.8...	60.31...	60.69...	61.06...	61.44...	61.81...	62.18...	62.56...	62.93...	63.30...	63.68...
3.9...	64.03...	64.42...	64.80...	65.17...	65.55...	65.92...	66.29...	66.67...	67.04...	67.41...
4.0...	67.79...	68.16...	68.53...	68.91...	69.28...	69.65...	70.03...	70.40...	70.77...	71.14...
4.1...	71.52...	71.89...	72.26...	72.63...	73.00...	73.38...	73.75...	74.12...	74.49...	74.86...
4.2...	75.23...	75.60...	75.97...	76.34...	76.71...	77.08...	77.45...	77.82...	78.19...	78.56...
4.3...	78.93...	79.30...	79.67...	80.04...	80.41...	80.78...	81.14...	81.51...	81.88...	82.25...
4.4...	82.61...	82.98...	83.35...	83.71...	84.08...	84.45...	84.81...	85.18...	85.55...	85.91...
4.5...	86.28...	86.64...	87.01...	87.37...	87.73...	88.10...	88.46...	88.82...	89.19...	89.55...
4.6...	89.91...	90.28...	90.64...	91.00...	91.37...	91.73...	92.09...	92.45...	92.81...	93.17...
4.7...	93.53...	93.89...	94.25...	94.61...	94.97...	95.33...	95.69...	96.05...	96.41...	96.77...
4.8...	97.13...	97.49...	97.85...	98.21...	98.57...	98.92...	99.28...	99.64...	100.00...	100.35...
4.9...	100.71...	101.07...	101.42...	101.78...	102.14...	102.49...	102.85...	103.21...	103.56...	103.92...

ตาราง 5.3 แสดง % Skin Effect ของ Solid Round Conductor และ Conventional Round Concentric Strand Conductors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mutual Reactance at 60 Cycles, Conductor to Sheath (or Shield)

$D_{sm}/2s$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.4	21.1	20.5	19.9	19.4	18.9	18.3	17.8	17.4	16.9	16.4
0.3	27.7	26.9	26.2	25.5	24.8	24.1	23.5	22.9	22.2	21.6
0.2	37.0	35.9	34.8	33.8	32.8	31.9	31.0	30.1	29.3	28.4
0.1	52.9	50.7	48.7	46.9	45.2	43.6	42.1	40.7	39.4	38.2

ตาราง 5.4 Mutual Reactance ,Conductor to Sheath(or shield)

เมื่อเกิดการ short-circuit sheath จะทำให้ค่าความสูญเสีย eddy loss ที่ sheath นั้นลดลง และ สมการที่ 5.30 หรือ 5.30A ต้องคูณด้วยอัตราส่วนดังนี้ $R_s^2 / (R_s^2 + X_m^2)$ ซึ่งในสมการที่ 5.30 และ 5.30A ใช้ในการคำนวณผลของกระแส eddy สำหรับสายเคเบิลแบบหนึ่งตัวนำที่ติดตั้งในท่อที่แยกกัน ในกรณีของสายแบบสามสายเคเบิลก็สามารถประมาณค่าความสูญเสียออกมาได้จากสมการที่ผ่านมา ส่วนผลของกระแส eddy สำหรับสายเคเบิลแบบสามตัวนำหาได้จาก

$$Y_{se} = \frac{3R_s}{R_{dc}} \left[\frac{\left(\frac{2s}{D_{sm}}\right)^2}{\left(\frac{5.2R_s}{f}\right)^2 + 1} + \frac{\left(\frac{2s}{D_{sm}}\right)^4}{4\left(\frac{5.2R_s}{f}\right)^2 + 1} + \frac{\left(\frac{2s}{D_{sm}}\right)^8}{16\left(\frac{5.2R_s}{f}\right)^2 + 1} + \dots \right] \quad (5.31)$$

เมื่อ $(5.2R_s/f)^2$ เป็นส่วนที่ทำให้สมการมีค่ามากที่สุด ในเทอมที่หนึ่งและมีค่ามากกว่า 1 มากๆ ดังนั้นนำมาเขียนใหม่จะได้ว่า

$$Y_{se} = \frac{3f^2}{5.2R_s R_{dc}} \left(\frac{2s}{D_{sm}}\right)^2 \quad (\text{approximately}) \quad (5.31A)$$

เมื่อ

$$s = 1.155T + 0.60(V_{\text{gauge.depth}}) \quad (\text{for compact sectors})$$

$$s = 1.155T + 0.58D_c \quad (\text{for round conductors}) \quad (5.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T คือ ความหนาของ insulation ที่รวมความหนาของ shielding tapes ด้วย(ถ้ามี) โดยสมการที่ 5.31 จะใช้สำหรับสายเคเบิลแบบ aluminum sheath และสมการที่ 5.31A ใช้สำหรับสายเคเบิลแบบ lead sheath

ในสายเคเบิลแบบสามตัวนำที่มีการชิลด์ด้วย shielded paper lead จะต้องใช้ tape ที่เป็น copper หรือ bronze ประมาณ 3-mil หรือ 5-mil แทรกระหว่าง paper tape เพื่อใช้ในการ shielding และเป็นตัวมัด (binder) สายเคเบิลเข้าไว้ด้วยกัน โดยความต้านทานกระแสตรง copper tape 5-mil ที่ 0.75 นิ้ว จะได้ประมาณ 2,200 microohms per foot ที่ 20°C ซึ่งเป็นความต้านทานแบบ linear ที่จะต้องคูณด้วย lay correction factor ตามสมการที่ 5.13 และมีค่าอยู่ระหว่าง 4 ถึง 12 หรือมากกว่า การที่มี shielding และ binder นี้จะทำให้ได้ค่าความต้านทาน approximately ของสายเคเบิลออกมา 10,000 microohms per foot หรือมากกว่า ยิ่งไปกว่านี้ก็ต้องกำหนดให้ค่าความต้านทานนั้นลดลงครึ่งหนึ่ง อันเนื่องมาจากตัวนำที่วางติดกันนั่นเอง ส่วนในการคำนวณของ lead sheath ใช้สมการที่ 5.27 กับ 5.30 สำหรับสายเคเบิลสามตัวนำแบบ shielded paper lead ที่มีการ shielding และ binder จะไม่คำนึงถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นเลยก็ได้

สมการที่ 5.31 นั้นจะใช้ในการประมาณค่าของ Y_p สำหรับสายเคเบิลที่ติดตั้งไว้ในรางรองสาย ซึ่งจะยึดพื้นฐานมาจากการคำนวณแบบ pipe ที่ไม่เป็นตัวนำแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามจะต้องหาค่าเฉลี่ยของระยะห่าง s ในบริเวณ wide triangular จาก $s = (D_p - D_s) / 2$ และถ้าคิดที่จุดศูนย์กลางของ pipe ในบริเวณ close triangle ก็จะได้ $s = 0.578 D_s$

สำหรับในกรณีของ magnetic pipe หรือ conduit จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Y_p = \frac{1.54s - 0.115 D_p}{R_{dc}} \quad (3\text{-conductor cable}) \quad (5.33)$$

$$Y_p = \frac{0.89S - 0.115 D_p}{R_{dc}} \quad (1\text{-conductor, close triangular}) \quad (5.34)$$

$$Y_p = \frac{0.34S + 0.175 D_p}{R_{dc}} \quad (1\text{-conductor, cradled}) \quad (5.35)$$

จากสมการข้างบนสามารถนำไปใช้ได้กับ steel pipe และ iron conduit แต่กรณี iron conduit จะต้องคูณด้วย 0.8 เสียก่อน สำหรับค่าที่ถูกต้องของผลที่เกิดใน pipe ที่เป็น magnetic pipe หรือ conduit ทั้งการติดตั้งแบบ triangular และ cradled จะต้องคูณ Y_c และ Y_r ด้วย 1.7 เสียก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 การคำนวณหาค่าความสูญเสีย dielectric loss

ค่าของ dielectric loss W_d สำหรับสายเคเบิลแบบ shielded สามตัวนำและสายเคเบิลหนึ่งตัวนำหาได้ดังนี้

$$W_d = \frac{0.00276 E^2 \epsilon \cos \phi}{\log\left(\frac{2T + D_c}{D_c}\right)} \quad (\text{watts per conductor foot at 60 cycles}) \quad (5.36)$$

และสำหรับสายเคเบิลแบบ belted สามตัวนำหาได้จาก

$$W_d = \frac{0.019 E^2 \epsilon \cos \phi}{G_2} \quad (\text{watts per conductor foot at 60 cycle}) \quad (5.37)$$

เมื่อค่า ϵ หาได้จากตาราง 5.5 สำหรับค่าความสูญเสีย dielectric loss ของตัวนำแบบ compact sector จะประมาณให้เท่ากับตัวนำแบบ concentric round เมื่อทั้งสองแบบมีพื้นที่หน้าตัดและความหนาของ insulation เท่ากัน



Specific Inductive Capacitance of Insulations

Material	ϵ_r
Polylethylene.....	2.3
Paper insulation (solid type).....	3.7 (IPCEA value)
Paper insulation (other types).....	3.3-4.1
Rubber and rubber-like com- pounds.....	3 (IPCEA value)
Varnished cambric.....	3 (IPCEA value)

ตาราง 5.5 แสดง Specific Inductive Capacitance of Insulation

5.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อน

5.4.1 ความต้านทานความร้อนของ insulation สำหรับสายเคเบิลหนึ่งตัวนำ

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log\left(\frac{D_i}{D_c}\right) \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.38)$$

เมื่อ $\bar{\rho}_i$ คือความต้านทานทางความร้อนจำเพาะของ insulation (ตาราง 5.6) ในสายเคเบิลแบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal Resistivity of Various Materials

Material	$\bar{\rho}$, C Cm/Watt
Paper insulation (solid type)...	700 (IEEE value)
Varnished cambric.....	600 (IEEE value)
Paper insulation (other types)...	500-550
Rubber and rubber-like.....	500 (IEEE value)
Jute and textile protective covering.....	500
Fiber duct.....	450
Polyethylene.....	450
Transite duct.....	200
Synthetic.....	100
Concrete.....	85

ตาราง 5.6 แสดงความต้านทานความร้อนจำเพาะของวัสดุชนิดต่างๆ

ตัวนำหลายตัวก็จะเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณระหว่าง conductor กับ sheath และจะแผ่ออกมาจาก conductor ไปยัง sheath ความต้านทานแบบนี้หาได้จาก

$$\bar{R}_i = 0.00522 \bar{\rho}_i G_i \quad (\text{thermal ohm-feet}) \quad (5.39)$$

โดยที่ค่า G_i ของสายเคเบิลแบบ shielded สามตัวนำหาได้จากสมการที่ผ่านมา

5.4.2 ความต้านทานทางความร้อนของ Jackets, Duct Walls และ Coating

ความต้านทานทางความร้อนจะสัมพันธ์กับความหนาของ jackets และ fiber duct walls สามารถหาได้จาก

$$\bar{R} = 0.0104 \rho' n' \left(\frac{t}{D-t} \right) \quad (\text{thermal ohm-feet}) \quad (5.40)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก และ n' คือจำนวนของตัวนำในส่วนที่มีความร้อนไหลผ่าน

5.4.3 ความต้านทานทางความร้อนระหว่างผิวของสายเคเบิลกับบริเวณรอบข้างที่เป็น Pipe, Conduit หรือ Duct Wall

เป็นการหาค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างผิวของสายเคเบิล กับสิ่งที่นำมาล้อมรอบ หาได้จาก

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'A}{1+(B+CT_m)D_r} \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.41)$$

ซึ่งค่า A , B และ C คือค่าคงที่ D_r แทนเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของสายหรือกลุ่มของสายเคเบิล และ n' คือจำนวนตัวนำที่อยู่ภายใน D_r โดยที่ค่าคงที่ A , B และ C หาได้จากตาราง 5.7 ถ้าสมมติให้ปริมาณของ $T_m = 60^\circ\text{C}$ สมการที่ 5.41 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'A'}{D_r+B'} \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.41A)$$

Constants for Use in Equations 41 and 41(A)

Condition	A	B	C	A'	B'
In metallic conduit.....17	3.6	0.023	3.2	0.19	
In fiber duct in air.....17	2.1	0.016	3.6	0.33	
In fiber duct in concrete.....17	2.3	0.024	4.6	0.27	
In transit duct in air.....17	3.0	0.014	4.4	0.26	
In transit duct in concrete.....17	2.9	0.025	3.7	0.22	
Gas-filled pipe cable at 200 psi.....3.1	1.16	0.0053	2.1	0.68	
Oil-filled pipe cable.....0.84	0	0.0065	2.1	2.45	

$D_r = 1.00 \times$ diameter of cable for one cable
 $1.65 \times$ diameter of cable for two cables
 $2.15 \times$ diameter of cable for three cables
 $2.50 \times$ diameter of cable for four cables

ตาราง 5.7 แสดงค่าคงที่ A, B, C, A', B'

ซึ่งเป็นกรณีของการเดินสายใน ducts ค่า \bar{R}_{sd} จะเป็นค่าที่อยู่ภายใน duct wall และความต้านทานทางความร้อนของ duct wall ก็จะรวมกับค่า \bar{R}_{se}

5.4.4 ความต้านทานทางความร้อนจากสายเคเบิล, Conduits หรือ Ducts ที่ติดตั้งในอากาศ

ความต้านทานทางความร้อน \bar{R}_{se} ระหว่างสายเคเบิล conduits หรือ ducts ที่ติดตั้งในอากาศ สามารถหาได้จาก

$$\bar{R}_e = \frac{15.6n'}{D_r \left[\left(\frac{\Delta T}{D_r} \right)^{\frac{1}{4}} + 1.6\varepsilon(1+0.0167T_m) \right]} \quad (\text{thermal Ohm-foot}) \quad (5.42)$$

เมื่อ ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวของสายเคเบิล T_r กับอุณหภูมิที่อากาศรอบข้าง T_a และถ้าสมมติให้ $T_r = 60^\circ\text{C}$, $T_a = 30^\circ\text{C}$ และ D_r มีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 10 จะเขียนสมการที่ 5.42 ใหม่ได้ดังนี้

$$\bar{R}_e = \frac{9.5n'}{1+1.7D_r(\varepsilon+0.41)} \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.42A)$$

เมื่อค่า ε ของ pipes, conduits หรือ ducts เท่ากับ 0.95 และของ lead และ aluminum sheaths เท่ากับ 0.2 ถึง 0.5 และจะมีค่าเท่ากับ 0.41 ถ้า pipes, conduits หรือ ducts มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 3.5 นิ้วขึ้นไป เมื่อนำสายเคเบิลไปติดตั้งแบบลอยในอากาศ จะมีผลของลมเข้ามาเกี่ยวข้องกับคิ้ว ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ 5.42 ใหม่ได้ดังนี้

$$\bar{R}_e = \frac{3.5n'}{D_r(\sqrt{V_w}/D_r+0.62\varepsilon)} \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.42B)$$

5.4.5 ความต้านทานทางความร้อนยังผลระหว่างสายเคเบิล หรือ Ducts หรือ Pipes และ Ambient Earth

ในกรณีที่สายเคเบิลติดตั้งอยู่ใน duct bank จะต้องพิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างค่า $\bar{\rho}_e$ ของคอนกรีตกับค่า $\bar{\rho}_e$ ของพื้นดิน และความต้านทานทางความร้อนระหว่างจุดใดๆของสายเคเบิลในดินกับ ambient earth หาได้จาก

$$\bar{R}_{pe} = 0.012 \bar{\rho}_e \log\left(\frac{d'}{d}\right) \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.43)$$

โดยที่ $\bar{\rho}_e$ เป็นค่าความต้านทานทางความร้อนจำเพาะของดิน d' เป็นระยะจากการ image ของสายเคเบิลถึงจุด P และ d เป็นระยะจากสายเคเบิลถึงจุดศูนย์กลาง P ถ้าสายเคเบิลเป็นแบบฝังดินโดยตรงและใช้ชนิดเคเบิลท่อฝังดินจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_e = 0.012 \bar{\rho}_e n' \left[\log\left(\frac{D_x}{D_e}\right) + (LF) \log\left(\frac{4L \times F}{D_x}\right) \right] \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.44)$$

โดยที่ D_x เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางที่กำหนดขึ้นมาเนื่องจากผลของ loss factor ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ α และช่วงของ loss cycle สามารถหาได้จาก

$$D_x = 1.02 \sqrt{\alpha (\text{length of cycle in hours})} \quad (\text{inches}) \quad (5.45)$$

สำหรับใน dielectric loss cycle จะใช้ค่า $\alpha = 2.75$ square inches per hour และ D_x เท่ากับ 8.3 นิ้ว เมื่อใช้กับแบบฝังดิน ส่วนค่าแฟกเตอร์ F เกิดจากผลต่างความร้อนของสายเคเบิลหาได้จาก

$$F = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) \dots \dots \dots \left(\frac{d_{1N'}}{d_{1N}} \right) \quad (N-1 \text{ terms}) \quad (5.46)$$

เมื่ออุณหภูมิของตัวนำมีค่าสูงสุดก็จะทำให้ $4LF / D_x$ มีค่าสูงสุดด้วย N แทนจำนวนของสายเคเบิลหรือท่อ และ F จะเป็น unity เมื่อ $N = 1$ เมื่อสายเคเบิลถูกติดตั้งไว้ในคอนกรีตอย่างเช่นใน duct bank จะทำให้ค่าของความต้านทานทางความร้อนจำเพาะแตกต่างออกไปจากเดิม โดยในการคำนวณนั้น ต้องรวมเอาค่าความต้านทานทางความร้อนที่ชั้นกลางระหว่างท่อกับดินก็คือคอนกรีต $\bar{\rho}_c$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 5.44 ใหม่ได้เป็น

$$\bar{R}_e = 0.012 \bar{\rho}_e n' \left[\log\left(\frac{D_x}{D_e}\right) + (LF) \log\left(\frac{4L \times F}{D_x}\right) \right] + 0.012 (\bar{\rho}_e - \bar{\rho}_c) n' N (LF) G_b \quad (\text{thermal ohm-foot}) \quad (5.44A)$$

เมื่อพิจารณาที่ผิวของ duct bank จะได้รับรัศมี r_b ออกมา ความต้านทานทางความร้อนระหว่าง duct bank กับ ผิวดินจะอยู่ในเทอมของ r_b และ L_b ซึ่งสามารถเขียนสมการของ G_b ได้ดังนี้

$$G_b = \log \frac{Lb^2 + \sqrt{Lb^2 - rb}}{rb} = \log \left[\frac{Lb}{rb} + \sqrt{\left(\frac{Lb}{rb}\right)^2 - 1} \right] \quad (5.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ x เป็นขนาดความกว้างและ y เป็นขนาดความยาวของ duct bank ดังนั้นรัศมีที่สัมผัสขอบภายในของ duct bank คือ

$$r_1 = x/2 \quad (5.46)$$

• และรัศมีที่สัมผัสมุมทั้งสองของ duct bank และเป็นรัศมีใหญ่สุดจะได้ดังนี้

$$r = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{2} \quad (5.47)$$

เมื่อพิจารณาค่าของ P ใน duct bank จะได้ว่า

$$P = 2(x+y) = 4 \frac{x}{2} \left(1 + \frac{y}{x}\right) \quad (5.48)$$

ค่าพารามิเตอร์ P นี้จะนำไปเขียนอยู่ในเทอมอัตราส่วน L_b / P ซึ่งหาได้จากรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นรูปที่ได้จากสมการ 5.45 และ สมการ 5.48 ที่ค่าอัตราส่วน y/x ต่างๆกัน

5.5 สรุปขั้นตอนและตัวอย่างการคำนวณกรณีต่างๆ

5.5.1 กรณีที่ระดับแรงดันต่ำ มีขั้นตอนการคำนวณและตัวอย่างในแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

(1). หากค่าความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ

$$R_{dc|T_c} = R_{dc|20^\circ C} \left[\frac{T + T_c}{T + T_c} \right] \quad \mu\Omega / ft$$

(2) หาผลของ Skin Effect ซึ่งจะใช้ร่วมกับผลของ Eddy Current

1. เปิดตารางค่าคงที่ของสายเบิ้ลซึ่งจะได้ค่า k_s และ k_p
2. นำค่า $\frac{R_{dc}}{k_s}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.1 จะได้ค่า $F(x)$ ซึ่งจะเท่ากับ Y_s
3. นำค่า $\frac{R_{dc}}{k_p}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.1 จะได้ค่า $F(x_p)$
4. $S = D_c + 2(T + Y_{cs})$
5. $Y_{cp} = 2 \left(\frac{D_c}{S} \right)^2 (F(x_p))$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเรียงในเพื่อใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

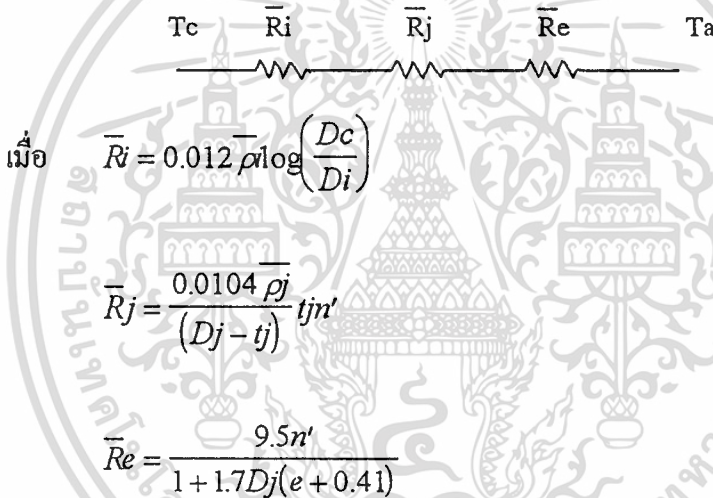
$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp}$$

(3) หาพลังงานสูญเสียเนื่องจาก Dielectric

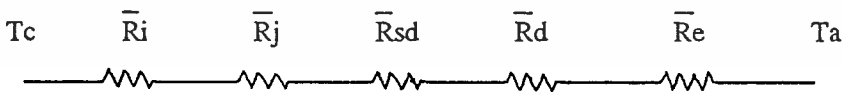
$$W_d = \frac{0.00276 E^2 \epsilon_r \cos \phi}{\log \left(\frac{2T + D_c}{D_c} \right)} \quad (\text{watts per conductor})$$

(4) กำหนดหาค่าความต้านทานความร้อน ซึ่งจะสัมพันธ์กับลักษณะการติดตั้ง ดังต่อไปนี้

1. กรณีเดินลอยในอากาศ



2. กรณีเดินในท่อลอยในอากาศ



เมื่อ

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho} \log \left(\frac{D_c}{D_i} \right)$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \bar{\rho} j}{(D_j - t_j)} t_j n'$$

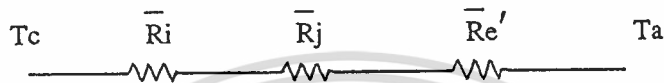
$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A'}{D_s' + B'}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}d = \frac{0.0104 \bar{\rho}d}{(Dd - td)} n'td$$

$$\bar{R}e = \frac{9.5n'}{1 + 1.7Dj(e + 0.41)}$$

3. กรณีเดินฝังกินโดยตรง



เมื่อ $\bar{R}i = 0.012 \bar{\rho} \log \left(\frac{Dc}{Di} \right)$

$$\bar{R}j = \frac{0.0104 \bar{\rho}j}{(Dj - tj)} tjn'$$

$$\bar{R}e = 0.012 \bar{\rho}en' \left[\log \frac{8.3}{De} + LF \log \left(\frac{4LxF}{8.3} \right) \right]$$

4. กรณีเดินในท่อฝังกิน



เมื่อ $\bar{R}i = 0.012 \bar{\rho} \log \left(\frac{Dc}{Di} \right)$

$$\bar{R}j = \frac{0.0104 \bar{\rho}j}{(Dj - tj)} tjn'$$

$$\bar{R}sd = \frac{n'A'}{Ds' + B'}$$

$$\bar{R}d = \frac{0.0104 \bar{\rho}d}{(Dd - td)} n'td$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_e = 0.012 \bar{\rho}_{en} \left[\log \frac{8.3}{D_e} + LF \log \left(\frac{4LxF}{8.3} \right) \right]$$

(4) คำนวณหาค่าอณุมหิมิตี Dielectric

1. กรณีเดินลอยในอากาศ $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_e \right]$
2. กรณีเดินในท่อลอยในอากาศ $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_e \right]$
3. กรณีเดินฝังดินโดยตรง $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_{e'} \right]$
4. กรณีเดินในท่อฝังดิน $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_{e'} \right]$

(5) คำนวณหาค่ากระแสของสายเคเบิล จากสมการ

$$I = \frac{\sqrt{T_c - (T_a + \Delta T_d)}}{\sqrt{R_{dc}(1 + y_c) \bar{R}_{ca}}} \quad \text{kA}$$

(6) ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง 5.1. กรณีเดินลอยในอากาศ ที่ระดับแรงดันต่ำ

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิล XLPE แบบ NON shield-เบอร์ 70
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 600 Volts
- ตัวนำเป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 C° (R_{dc}) = 0.268 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (D_c) = 9.9 m.m. = 0.389763 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (D_j) = 15.5 m.m. = 0.610235 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 1.1 m.m. = 0.043307 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (t_j) = 1.4 m.m. = 0.055118 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (T_c) = 90 C°
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (T_a) = 40 C°
- ความถี่ที่ใช้ (f) = 50 Hz

- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 90^{\circ} &= R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ}(20^{\circ}) \frac{(234.5+T_c) \times 1000}{(234.5+20^{\circ})} \quad 3.28084 \\
 &= \frac{0.268 (234.5+90^{\circ}) \times 1000}{(234.5+20^{\circ})} \quad 3.28084 \\
 &= 104.154175 \text{ microhms per foot}
 \end{aligned}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

$$\text{จะได้ } K_s = 1, K_p = 0.8$$

$$\frac{R_{dc}}{K_s} = \frac{104.154175}{1} = 104.154175 \text{ นำไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1}$$

$$\text{จะได้ } F(X_s) = 0.00115 \text{ ซึ่งจะเท่ากับ } Y_{cs}$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{104.154175}{0.8} = 130.192719 \text{ ไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'_p) = 0.0013$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.389763 + 2[0.043307 + 0.00115] = 0.478677$$

$$Y_{cp} = \frac{2 D_c^2 F(X'_p)}{S^2} = \frac{2(0.389763)(0.0013)}{0.4786^2} = 0.001724$$

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} = 1 + 0.00115 + 0.001724 = 1.002874$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.3464 \text{ Volt}$$

$$D_i = D_c + 2T = 0.389763 + 2(0.043307) = 0.476377 \text{ นิ้ว}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log \frac{D_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho}_i \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ }^{\circ}\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \times 390 \times \log \frac{0.476377}{0.389763}$$

$$= 0.407862822 \text{ thermal ohm-foot}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_d = \frac{0.00276 \times \epsilon_r \times (\text{pf}) \times E^2}{\log \frac{2T+D_c}{D_c}}$$

จาก ตาราง 5.5 ค่า ϵ_r ของ polyethylene = 2.3

ค่า pf ของฉนวน = 0.005

$$W_d = \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (0.3464)^2}{\log [2(0.043307) + 0.389763]}$$

$$= 0.000044 \text{ watt per conductor}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'}{(D_j - t_j)}$$

n' คือจำนวนตัวนำในระบบ = 1

ค่า thermal resistivity ของ Jacket = $360 \text{ C}^\circ\text{cm/watt}$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.055118 \times 1}{(0.610235 - 0.055118)} = 0.371745 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 \times 1}{[1 + 1.7 D_j (e + 0.41)]}$$

ค่า e เมื่อติดตั้งสายในอากาศ = 0.41

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 \times 1}{[1 + 1.7 \times 0.610235 (0.41 + 0.41)]} = 5.133283 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_e = 0.407862822 + 0.371745 + 5.133283$$

$$= 5.912890503 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\Delta T_d = W_d \frac{[\bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_e]}{2} = \frac{0.00004 [0.407862822 + 0.371745 + 5.133283]}{2}$$

$$= 0.000250 \text{ C}^\circ$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c)R_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = \sqrt{\frac{90^\circ - (40 + 0.00025)}{104.154175 \times 1.002874 \times 5.912890503}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดกระแสของสายเคเบิล = 284.526367 Amp.

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง 286 Amp.

ตัวอย่าง 5.2. กรณีสายแกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อโลหะในอากาศ ที่ระดับแรงดันต่ำ

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิลแบบ XLPE เบอร์ 70
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 600 Volts
- ตัวนำเป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20C° (Rdc) = 0.268 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (Dc) = 9.9 m.m. = 0.389763 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (Dj) = 15.5 m.m. = 0.610235 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 1.1 m.m. = 0.043307 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (tj) = 1.4 m.m. = 0.055118 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (Tc) = 90C°
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (Ta) = 40C°
- ความถี่ที่ใช้ (f) = 50 Hz
- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round
- ใช้ท่อโลหะขนาด 2 นิ้ว

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 90C^{\circ} &= R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 20C^{\circ} \frac{[234.5+T_c] \cdot 1000}{[234.5+20^{\circ}]} \cdot 3.28084 \\
 &= \frac{0.268[234.5+90^{\circ}] \cdot 1000}{[234.5+20^{\circ}]} \cdot 3.28084 \\
 &= 104.154175 \text{ microhm per foot}
 \end{aligned}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

จะได้ $K_s = 1$, $K_p = 0.8$

$R_{dc} = \frac{104.154173}{1} = 104.154175$ นำไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1

$K_s = 1$

จะได้ $F(x_s) = 0.00115$ ซึ่งจะเท่ากับ Y_{cs}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{104.154175}{0.8} = 130.192719 \text{ ไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'p) = 0.0013$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.389763 + 2[0.043307 + 0.00115] = 0.478677$$

$$Y_{cp} = \frac{2(D_c)^2 F(X'p)}{S^2} = \frac{2(0.389763)^2 (0.0013)}{(0.4786)^2} = 0.001724$$

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} = 1 + 0.00115 + 0.001724 = 1.002874$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.3464 \text{ Volt}$$

$$D_i = D_c + 2T = 0.389763 + 2(0.043307) = 0.476377 \text{ นิ้ว}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log \frac{D_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho}_i \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ } ^\circ\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_i = \frac{0.012 \times 390 \times \log \frac{0.476377}{0.389763}}{0.389763}$$

$$= 0.407862822 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times \epsilon_r \times (pf) \times E^2}{\log \frac{2T + D_c}{D_c}}$$

$$\text{จาก ตาราง 5.5 ค่า } \epsilon_r \text{ ของ polyethylene} = 2.3$$

$$\text{ค่า pf ของฉนวน} = 0.005$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (0.3464)^2}{\log \frac{2(0.043307) + 0.389763}{0.389763}}$$

$$0.389763$$

$$= 0.000044 \text{ watt per conductor}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'}{(D_j - t_j)}$$

$$n' \text{ คือจำนวนตัวนำในระบบ} = 3$$

$$\bar{\rho}_j \text{ thermal resistivity ของ Jacket} = 360 \text{ } ^\circ\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.055118 \times 3}{(0.610235 - 0.055118)} = 1.115234043 \text{ thermal ohm-foot}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \bar{\rho}_d n' t_d}{(D_c - t_d)}$$

จากค่า thermal resistivity ของท่อ ($\bar{\rho}_d$) = 30 C° cm/watt

t_d ความหนาของท่อ = 0.146 นิ้ว

D_p outside diameter ของท่อ = 2.375 นิ้ว

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \times 30 \times 3 \times 0.146}{(2.375 - 0.146)} = 0.061308209 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 n'}{1 + 1.7 D_p [e + 0.41]}$$

จากค่า e ของการเดินร้อยท่อ = 0.95

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 \times 3}{1 + 1.7 \times 2.375 [0.95 + 0.41]} = 4.3907 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A'}{D' s + B'}$$

$$D' s = \frac{2.15 D_i}{2.15 \times 0.476377} = 1.02421055 \text{ นิ้ว}$$

จาก ตาราง 5.7 เมื่อท่อเป็นแบบโลหะจะได้ค่า $A' = 3.2$ ค่า $B' = 0.19$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{3 \times 3.2}{1.02421055 + 0.19} = 7.9064 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{ca} &= \bar{R}_i - \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_c \\ &= 0.407862822 + 1.115234043 + 7.9064 + 0.061308209 + 4.3907 \\ &= 13.88147683 \text{ thermal ohm-foot} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_d &= w d \frac{[\bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_e]}{2} \\ &= 0.000044 \frac{[0.407862822 + 1.115234043 + 7.9064 + 0.061308209 + 4.3907]}{2} \\ &= 0.000601811 \text{ C}^\circ \end{aligned}$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c) \bar{R}_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \sqrt{\frac{90 - (40 + 0.000601811)}{104.154175 \times 1.002874 \times 13.88147683}} \times 1000 \quad \text{Amp.}$$

พิกัดกระแสของสายเคเบิล = 185.9 Amp.

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง = 191 Amp.

ตัวอย่าง 5.3 กรณีสายแกนเดี่ยวไม่เกิน 3 เส้น หรือหลายแกนไม่เกิน 3 แกนฝังดินโดยตรงแรงดันต่ำ

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิลแบบ XLPE เบอร์ 70
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 600 Volts
- ตัวนำเป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20C° (Rdc) = 0.268 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (Dc) = 9.9 m.m. = 0.389763 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (Dj) = 15.5 m.m. = 0.610235 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 1.1 m.m. = 0.043307 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (tj) = 1.4 m.m. = 0.055118 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (Tc) = 90C°
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (Ta) = 30C°
- ความถี่ที่ใช้ (f) = 50 Hz
- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round

วิธีทำ

$$\begin{aligned} R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 90C^\circ &= R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 20C^\circ \frac{[234.5 + T_c]}{[234.5 + 20^\circ]} [1000] \\ &= \frac{0.268 [234.5 + 90^\circ]}{(234.5 + 20^\circ)} [1000] \\ &= 104.154175 \text{ microhm per foot} \end{aligned}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

จะได้ $K_s = 1$, $K_p = 0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_{ds}}{K_s} = \frac{104.154173}{1} = 104.154175 \text{ นำไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1}$$

$$\frac{R_{ds}}{K_s} = 1$$

$$\text{จะได้ } F(X_s) = 0.00115 \text{ ซึ่งจะเท่ากับ } Y_{cs}$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{104.154175}{0.8} = 130.192719 \text{ ไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'_p) = 0.0013$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = 0.8$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.389763 + 2[0.043307 + 0.00115] = 0.478677$$

$$Y_{cp} = \frac{2(D_c)^2 F(X'_p)}{S^2} = \frac{2(0.389763)^2 (0.0013)}{(0.4786)^2} = 0.001724$$

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} = 1 + 0.00115 + 0.001724 = 1.00287$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.3464 \text{ Volt}$$

$$D_i = D_c + 2T = 0.389763 + 2(0.043307) = 0.476377 \text{ นิ้ว}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \frac{\bar{\rho}_i \log D_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho}_i \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm/watt}$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_i &= 0.012 \times 390 \times \log \frac{0.476377}{0.389763} \\ &= 0.407862822 \text{ thermal ohm-foot} \end{aligned}$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times \epsilon_r \times (\text{pf}) \times E^2}{\log \frac{2T + D_c}{D_c}}$$

Dc

$$\text{จาก ตาราง 5.5 ค่า } \epsilon_r \text{ ของ polyethylene} = 2.3$$

$$\text{ค่า pf ของฉนวน} = 0.005$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (0.3464)^2}{\log [2(0.043307) + 0.389763]}$$

0.389763

$$= 0.000044 \text{ watt per conductor}$$

$$\bar{R}_j = 0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (Dj-tj) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n' คือจำนวนตัวนำในระบบ = 3

ค่า thermal resistivity ของ Jacket = $360 \text{ C}^\circ \text{ cm/watt}$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.055118 \times 3}{(0.610235 - 0.055118)} = 1.11523 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_e' = 0.012 \bar{\rho}_j n' \left[\frac{\log(8.3)}{De} + (LF) \frac{\log(4LF)}{8.3} \right]$$

จากค่า thermal resistivity ของดิน = $90 \text{ C}^\circ \text{ cm/watt}$

$$D_j = D_e = 0.610235 \text{ นิ้ว}, F = 1.0$$

$$\text{ฝังดินลึก (L)} = 24 \text{ นิ้ว}$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_e' &= 0.012 \times 90 \times 3 \left[\frac{\log(8.3)}{0.610235} + 0.8 \frac{\log(4 \times 24 \times 1)}{8.3} \right] \\ &= 6.428598994 \text{ thermal ohm-foot} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{ca} &= \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_c \\ &= 0.407862822 + 1.115235 + 6.428598994 \\ &= 7.951696816 \text{ thermal ohm-foot} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_d &= W_d \frac{[\bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_e']}{2} \\ &= \frac{0.000044 [0.407862822 + 1.115235 + 6.428598994]}{2} \\ &= 0.000340904 \end{aligned}$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c)R_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = \sqrt{\frac{90 - (30 + 0.000340901)}{(104.154175)(1.00287)(7.951696816)}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = 268.77 \text{ Amp.}$$

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง = 270 Amp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 5.4. สายแกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อโลหะฝังดิน ที่ระดับแรงดันต่ำ

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิลแบบ XLPE เบอร์ 70
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 600 Volts
- ตัวนำเป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20C° (Rdc) = 0.268 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (Dc) = 9.9 m.m. = 0.389763 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (Dj) = 15.5 m.m. = 0.610235 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 1.1 m.m. = 0.043307 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (tj) = 1.4 m.m. = 0.055118 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (Tc) = 90C°
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (Ta) = 30C°
- ความถี่ที่ใช้ (f) = 50 Hz
- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 90C^{\circ} &= R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 20C^{\circ} \frac{[234.5+T_c]}{[234.5+20^{\circ}]} [1000] \\
 &= 0.268[234.5+90^{\circ}] [1000] \\
 &= 104.154175 \text{ microhm per foot}
 \end{aligned}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

จะได้ $K_s = 1, K_p = 0.8$

$$\frac{R_{dc}}{K_s} = \frac{104.154173}{1} = 104.154175 \text{ นำไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1}$$

จะได้ $F(x_s) = 0.00115$ ซึ่งจะเท่ากับ Y_{cs}

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{104.154175}{0.8} = 130.192719 \text{ ไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'p) = 0.0013$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.389763 + 2[0.043307 + 0.00115] = 0.478677$$

$$Y_{cp} = \frac{2(Dc)^2 F(X'p)}{S^2} = \frac{2(0.389763)^2 (0.0013)}{(0.4786)^2} = 0.001724$$

$$1+Y_c = 1+Y_{cs}+Y_{cp} = 1+0.00115+0.001724 = 1.00287$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.3464 \text{ Volt}$$

$$D_i = D_c + 2T = 0.389763 + 2(0.043307) = 0.476377 \text{ นิ้ว}$$

$$\bar{R}_i = \frac{0.012 \bar{\rho}_i \log D_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho}_i \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ } ^\circ\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_i = \frac{0.012 \times 390 \times \log [0.476377]}{0.389763}$$

$$= 0.407862822 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times \epsilon_r \times (\text{pf}) \times E^2}{\log \frac{2T+D_c}{D_c}}$$

$$\text{จาก ตาราง 5.5 ค่า } \epsilon_r \text{ ของ polyethylene} = 2.3$$

$$\text{ค่า pf ของฉนวน} = 0.005$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (0.3464)^2}{\log [2(0.043307) + 0.389763]} = 0.000044 \text{ watt per conductor}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'}{(D_j - t_j)}$$

$$n' \text{ คือจำนวนตัวนำในระบบ} = 3$$

$$\text{ค่า thermal resistivity ของ Jacket} = 360 \text{ } ^\circ\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.055118 \times 3}{(0.610235 - 0.055118)} = 1.115235 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \bar{\rho}_{dn'}(td)}{(D_d - td)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dd outside diameter ของท่อ = 2.375 นิ้ว

td ความหนาของท่อ = 0.146 นิ้ว

จากค่า thermal resistivity ของท่อ ($\bar{\rho}_d$) = 30 C° cm/watt

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \times 30 \times 3 \times 0.146}{(2.375 - 0.146)} = 0.061308209 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'A'}{D's+B'}$$

$$D's = 2.15 D_i$$

$$= 2.15 \times 0.476377 = 1.02421055 \text{ นิ้ว}$$

จาก ตาราง 5.7 เมื่อท่อเป็นแบบโลหะจะได้ค่า A' = 3.2 ค่า B' = 0.19

$$\bar{R}_{sd} = \frac{3 \times 3.2}{1.02421055 + 0.19} = 7.9064 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_{e'} = \frac{0.012 \bar{\rho}_{en'} [\log(8.3) + LF \log(4LF)]}{D_e \quad 8.3}$$

ค่า thermal resistivity ของดิน = 30 C° cm/watt

$$D_e = D_d = \text{outside diameter ของท่อ} = 2.375$$

$$\text{ความลึก (L)} = 24 \text{ นิ้ว}$$

$$F = 1$$

$$\bar{R}_{e'} = \frac{0.012 \times 30 \times 3 [\log(8.3) + 0.8 \log(4 \times 24 \times 1)]}{2.375 \quad 8.3}$$

$$= 1.50548651 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_e$$

$$= 0.407862822 + 1.115235 + 7.9064 + 0.061308209 + 1.50548651$$

$$= 10.99629254$$

$$\Delta T_d = W_d \frac{[\bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_e]}{2}$$

$$= 0.000044 [0.407862822 + 1.115235 + 7.9064 + 0.061308209 + 1.50548651]$$

$$2$$

$$= 0.000474863$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1+Y_c)R_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = \sqrt{\frac{90 - (30 + 0.00047486)}{104.154175 \times 1.002874 \times 10.99629254}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = 228.5546 \text{ Amp.}$$

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงได้พิกัดกระแส = 230 Amp.

5.5.2 กรณีที่ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง มีขั้นตอนการคำนวณและตัวอย่างในแต่ ละกรณีดังต่อไปนี้

(1). หาค่าความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ

$$R_{dc|T=T_c} = R_{dc|T=20^\circ C} \left[\frac{T+T_c}{T+T_c} \right] \mu\Omega / ft$$

(2) หาผลของ Skin Effect ซึ่งจะใช้ร่วมกับผลของ Eddy Current

1. เปิดตารางค่าคงที่ของสายเบิ้ลซึ่งจะได้ค่า k_s และ k_p
2. นำค่า $\frac{R_{dc}}{k_s}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.1 จะได้ค่า $F_{(x)}$ ซึ่งจะเท่ากับ Y_s
3. นำค่า $\frac{R_{dc}}{k_p}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.1 จะได้ค่า $F_{(x'p)}$
4. $S = D_c + 2(T + Y_{cs})$
5. $Y_{cp} = 2 \left(\frac{D_c}{S} \right)^2 (F_{(x'p)})$
6. ผลรวมของ skin effect ทั้งหมดคือ

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp}$$

(3) หาพลังงานสูญเสียเนื่องจาก Dielectric

$$W_d = \frac{0.00276 E^2 \epsilon \cos \phi}{\log \left(\frac{2T + D_c}{D_c} \right)} \quad (\text{watts per conductor})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) หาค่าอัตราส่วน loss ที่เกิดขึ้น

1. หาค่า y_{se} โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 เมื่อเป็นสายแกนเดี่ยว

$$Y_{se} = \frac{3}{R_s R_{dc}} \left[\frac{2sf}{5.2 D_{sm}} \right]^2$$

กรณีที่ 2 เมื่อเป็นสายหลายแกน

$$Y_{se} = \frac{3R_s}{R_{dc} \left[\left(\frac{5.2R_s}{f} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{2S}{D_{sm}} \right)^2 \right]} \left[\frac{D_{sm}}{2S} \right]^2 \left[1 + \frac{5}{12} \left(\frac{D_{sm}}{2f} \right)^2 \right]$$

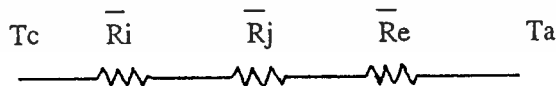
$$q_e = 1 + \frac{Y_s}{1 + Y_c}$$

$$Y_p = \frac{1.54s - 0.115D_p}{R_{dc}}$$

$$q_s = 1 + \frac{Y_s + Y_p}{1 + Y_c}$$

(5) คำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน ซึ่งจะสัมพันธ์กับลักษณะการติดตั้ง ดังต่อไปนี้

1. กรณีเดินลอยในอากาศ



$$\text{เมื่อ } \bar{R}_i = 0.012 \rho_l \log \left(\frac{D_c}{D_i} \right)$$

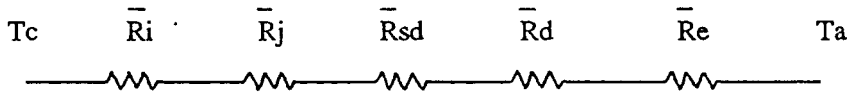
$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \rho_j}{(D_j - t_j)} t_j n'$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5n'}{1 + 1.7D_j(e + 0.41)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + qe\bar{R}_e$$

2. กรณีเดินในท่อลอยในอากาศ



เมื่อ $\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho} \log \left(\frac{D_c}{D_i} \right)$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \bar{\rho}_j}{(D_j - t_j)} t_j n'$$

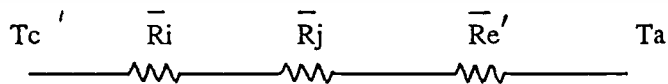
$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A'}{D_s' + B'}$$

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \bar{\rho}_d}{(D_d - t_d)} n' t_d$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 n'}{1 + 1.7 D_j (e + 0.41)}$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + q_s (\bar{R}_{sd} + \bar{R}_d) + q_e \bar{R}_e$$

3. กรณีเดินฝังดินโดยตรง



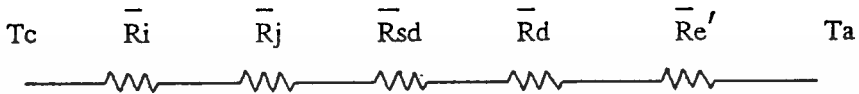
เมื่อ $\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho} \log \left(\frac{D_c}{D_i} \right)$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \bar{\rho}_j}{(D_j - t_j)} t_j n'$$

$$\bar{Re}' = 0.012 \bar{\rho} n' \left[\log \frac{8.3}{De} + LF \log \left(\frac{4LxF}{8.3} \right) \right]$$

$$\bar{Rca} = \bar{Ri} + \bar{Rj} + qe \bar{Re}'$$

4. กรณีเดินในท่อฝังดิน



เมื่อ $\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho} \log \left(\frac{D_c}{D_i} \right)$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \bar{\rho}_j}{(D_j - t_j)} t_j n'$$

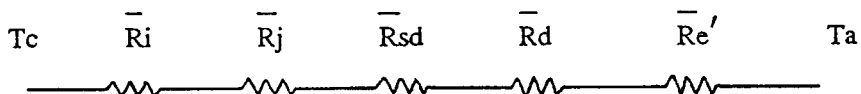
$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A'}{D_s' + B'}$$

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \bar{\rho}_d}{(D_d - t_d)} n' t_d$$

$$\bar{Re}' = 0.012 \bar{\rho} n' \left[\log \frac{8.3}{De} + LF \log \left(\frac{4LxF}{8.3} \right) \right]$$

$$\bar{Rca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + q_s (\bar{R}_{sd} + \bar{R}_d) + q_e \bar{Re}'$$

4. กรณีเดินใน duct bank



เมื่อ $\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho} \log \left(\frac{D_c}{D_i} \right)$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \bar{\rho}_j}{(D_j - t_j)} t_j n'$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'A'}{Ds' + B'}$$

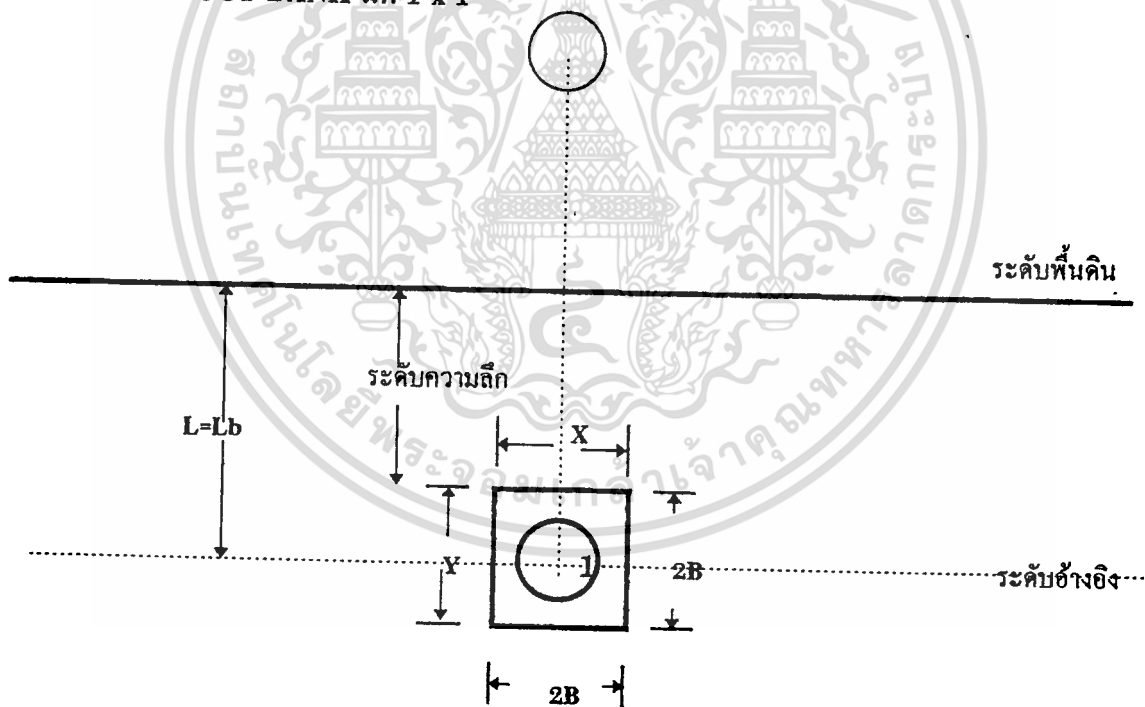
$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \bar{\rho} d}{(Dd - td)} n'td$$

$$\bar{R}_{e'} = 0.012 \bar{\rho} en' \left[\log \frac{8.3}{De} + LF \log \left(\frac{4LxF}{8.3} \right) \right] + 0.012 (\bar{\rho}_e - \bar{\rho}_c) n'N(LF)Gb$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + qs(\bar{R}_{sd} + \bar{R}_d) + qe\bar{R}_{e'}$$

การหาค่า F , L และ G_b มีวิธีการหาขึ้นอยู่กับขนาดและมิติของ duct bank ดังต่อไปนี้

1. DUCT BANK มิติ 1 x 1



จากรูปจะได้ว่า

$$\begin{aligned} L \text{ (ระดับอ้างอิง)} &= L_b \text{ (ระดับตั้งแต่ผิวดินถึงกึ่งกลางของ duct bank)} \\ &= \text{ระดับความลึก} + B \end{aligned}$$

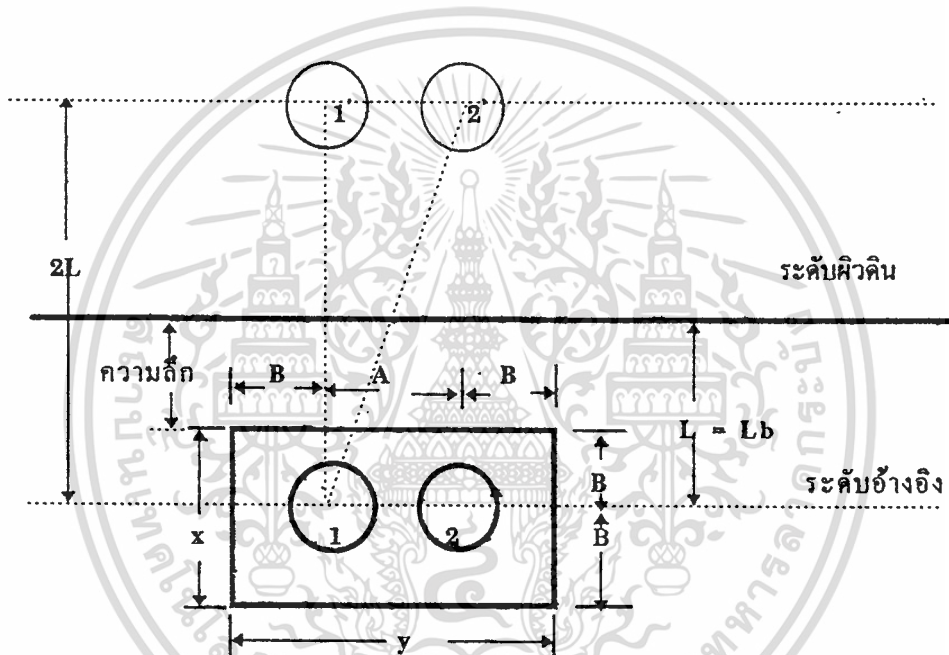
$$\frac{Y}{X} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = 1 \quad , \quad \frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{2(4B)}$$

จากค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ค่า G_b

2. DUCT BANK มิติ 2 x 1



จากรูปจะได้ว่า

$$L = L_b = \text{ระยะความลึก} + B$$

$$F = \frac{\sqrt{(2L)^2 + A^2}}{A}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{(2A + 8B)}$$

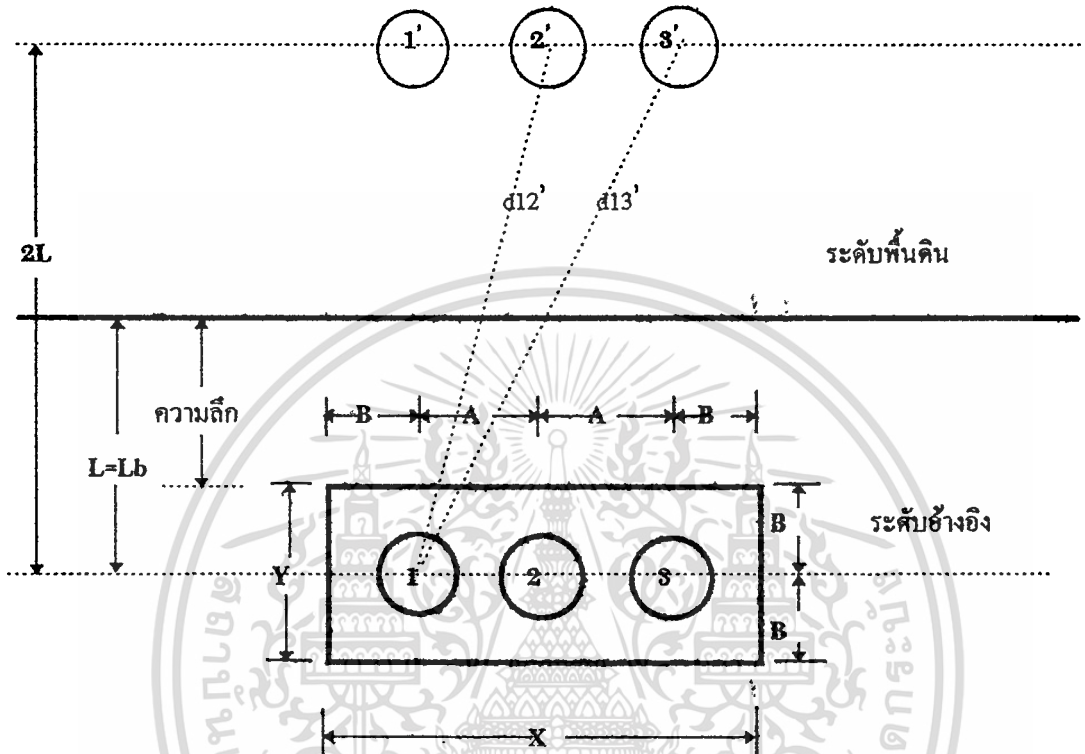
$$\frac{Y}{X} = 1 + \frac{A}{2B}$$

จากค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ค่า G_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จำนวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. DUCT BANK มิติ 3 x 1



จากรูปจะได้ว่า

$L = L_b = \text{ความลึกของการฝัง} + B$

$$F = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) = \frac{\sqrt{[(2L)^2 + A^2][L^2 + A^2]}}{A^2}$$

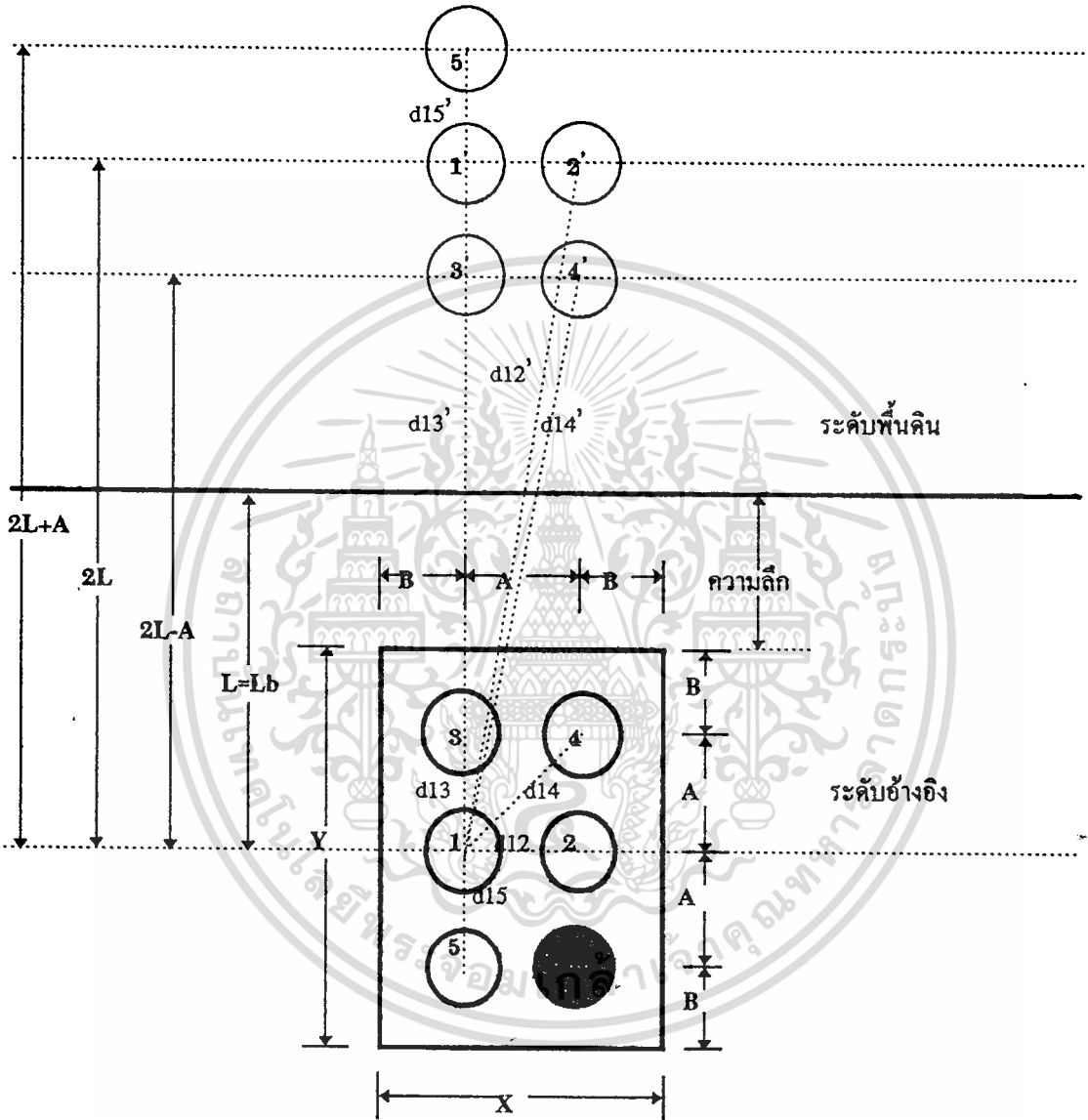
$$\frac{Y}{X} = 1 + \frac{A}{B}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{(8B + 4A)}$$

จากค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ค่า G_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. DUCT BANK มิติ 2 x 3 จำนวน 5 วงจร



จากรูปจะได้ว่า

$$L = Lb = \text{ความลึกของการฝัง} + A + B$$

$$F = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14'}}{d_{14}} \right) \left(\frac{d_{15'}}{d_{15}} \right)$$

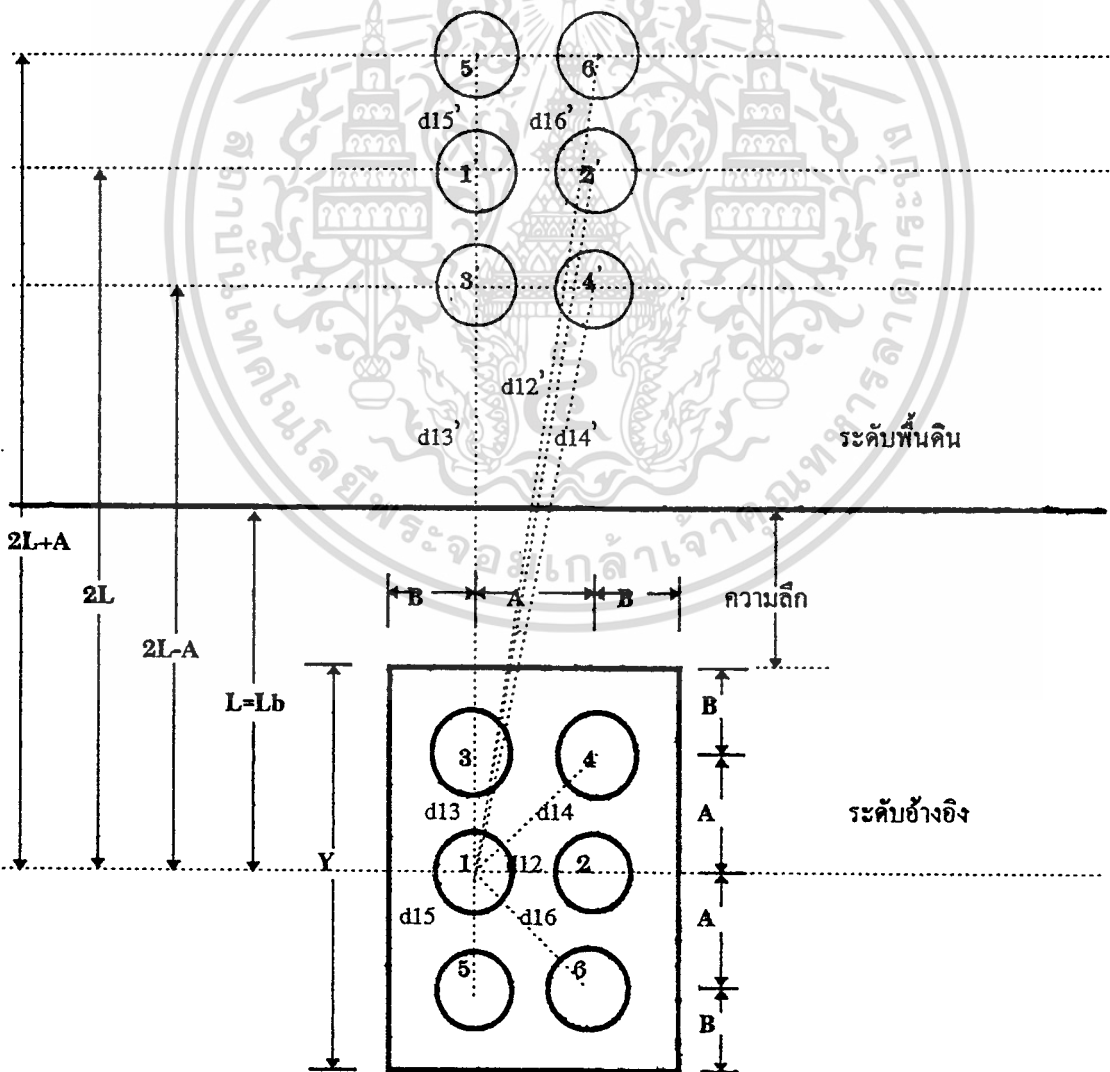
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \left[\frac{4L^2 - A^2}{A^2} \left[\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)[(2L - A)^2 + A^2]}}{\sqrt{2A^2}} \right] \right]$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{2B + 2A}{2B + A} \quad , \quad \frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{8B + 6A}$$

จากค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ค่า G_b

6. DUCT BANK มิติ 2 x 3 จำนวน 6 วงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ: การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้ว่า

$$L = L_b = \text{ความลึกของการฝัง} + A + B$$

$$F = \left(\frac{d_{17}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14'}}{d_{14}} \right) \left(\frac{d_{15'}}{d_{15}} \right) \left(\frac{d_{16'}}{d_{16}} \right)$$

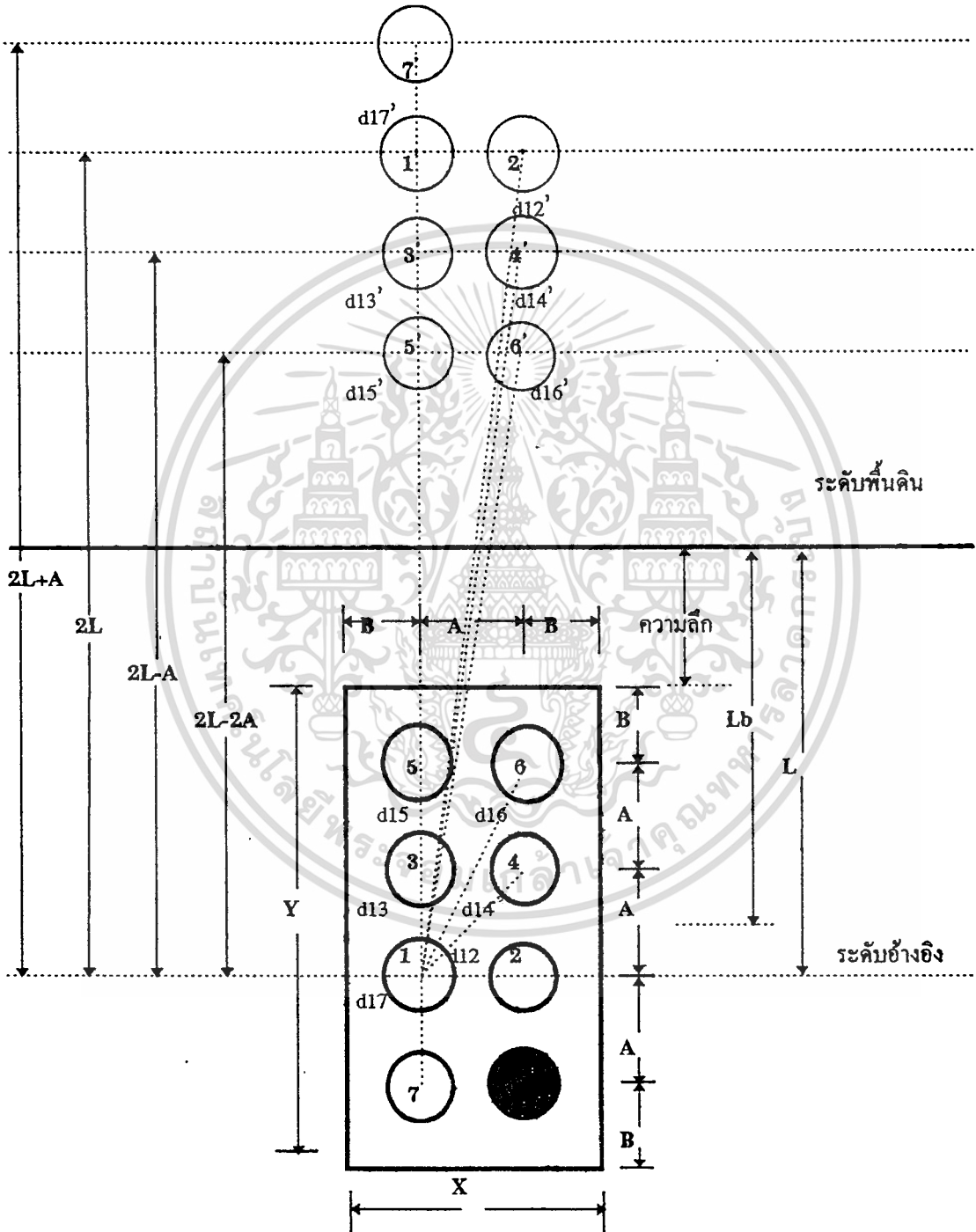
$$F = \left[\frac{4L^2 - A^2}{A^2} \sqrt{\frac{(4L^2 + A^2)[(2L - A)^2 + A^2][(2L + A)^2 + A^2]}{2A^3}} \right]$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{2B + 2A}{2B + A}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{8B + 6A}$$

จากค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ค่า G_b

7. DUCT BANK มิติ 2 x 4 จำนวน 7 วงจร



จากรูปจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็น L ความลึกของการฝัง $+ 2A + B$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_b = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 1.5A + B$$

$$F = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}}\right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}}\right) \left(\frac{d_{14'}}{d_{14}}\right) \left(\frac{d_{15'}}{d_{15}}\right) \left(\frac{d_{16'}}{d_{16}}\right) \left(\frac{d_{17'}}{d_{17}}\right)$$

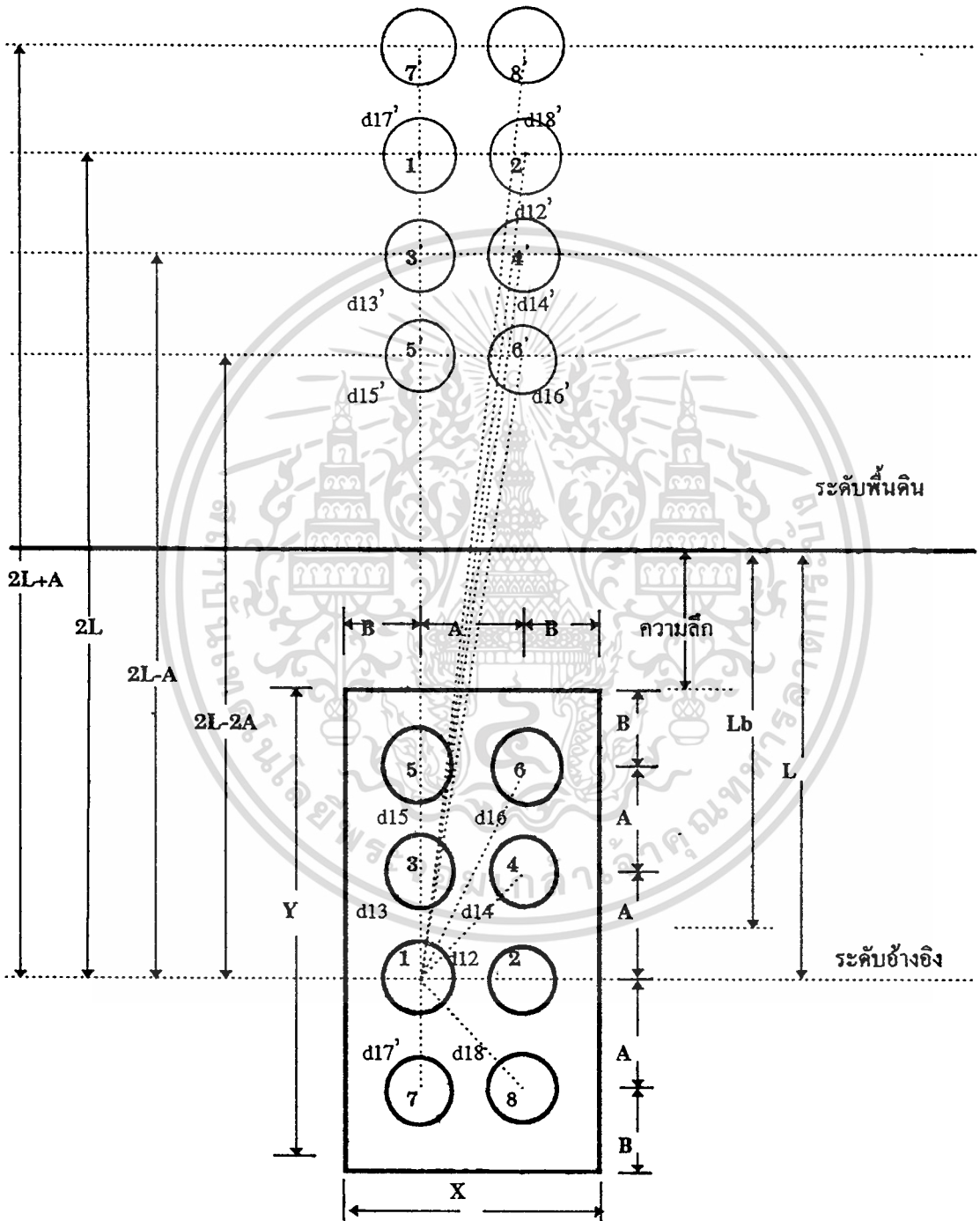
$$F = \left[\frac{(4L^2 - A^2)(2L - 2A)}{2A^3} \sqrt{\frac{(4L^2 + A^2)[(2L - A)^2 + A^2][(2L - 2A)^2 + A^2]}{10A^3}} \right]$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{3A + 2B}{A + 2B}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{8A + 8B}$$

จากค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ค่า G_b

8. DUCT BANK มิติ 2x4 จำนวน 8 วงจร



จากรูปจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็น $L = Lb = \text{ความลึกของการฝัง} + A + B$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14'}}{d_{14}} \right) \left(\frac{d_{15'}}{d_{15}} \right) \left(\frac{d_{16'}}{d_{16}} \right) \left(\frac{d_{17'}}{d_{17}} \right) \left(\frac{d_{18'}}{d_{18}} \right)$$

$$= [F_1][F_2]$$

$$F_1 = \left[\frac{\sqrt{(2L)^2 + A^2}}{A} \right] \left[\frac{(2L - A)}{A} \right] \left[\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right]$$

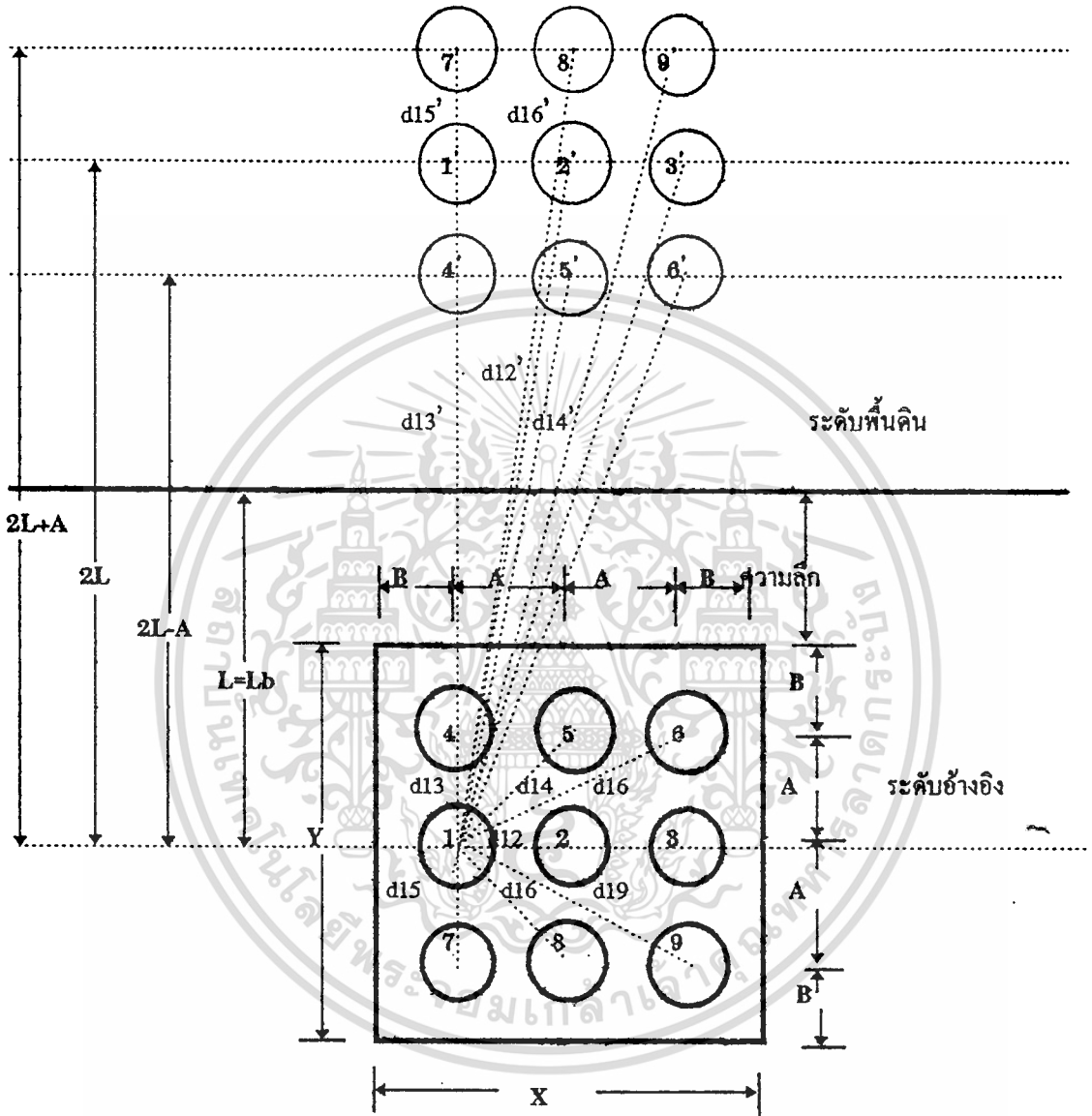
$$F_2 = \left[\frac{(2L - 2A)}{2A} \right] \left[\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{A^2 + 4A^2}} \right] \left[\frac{2L + A}{A} \right] \left[\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right]$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{3A + 2B}{A + 2B}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{8A + 8B}$$

จากค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ค่า G_b

9. DUCT BANK มิติ 3 x 3 จำนวน 9 วงจร



จากรูปจะได้ว่า

$$L = L_b = \text{ความลึกของการฝัง} + A + B$$

$$F = (F_1)(F_2)(F_3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_1 = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14'}}{d_{14}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)}}{A} \right) \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + 4A^2)}}{2A} \right) \left(\frac{2L - A}{A} \right)$$

$$F_2 = \left(\frac{d_{15'}}{d_{15}} \right) \left(\frac{d_{16'}}{d_{16}} \right) \left(\frac{d_{17'}}{d_{17}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2}A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + (2A)^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{2L + A}{A} \right)$$

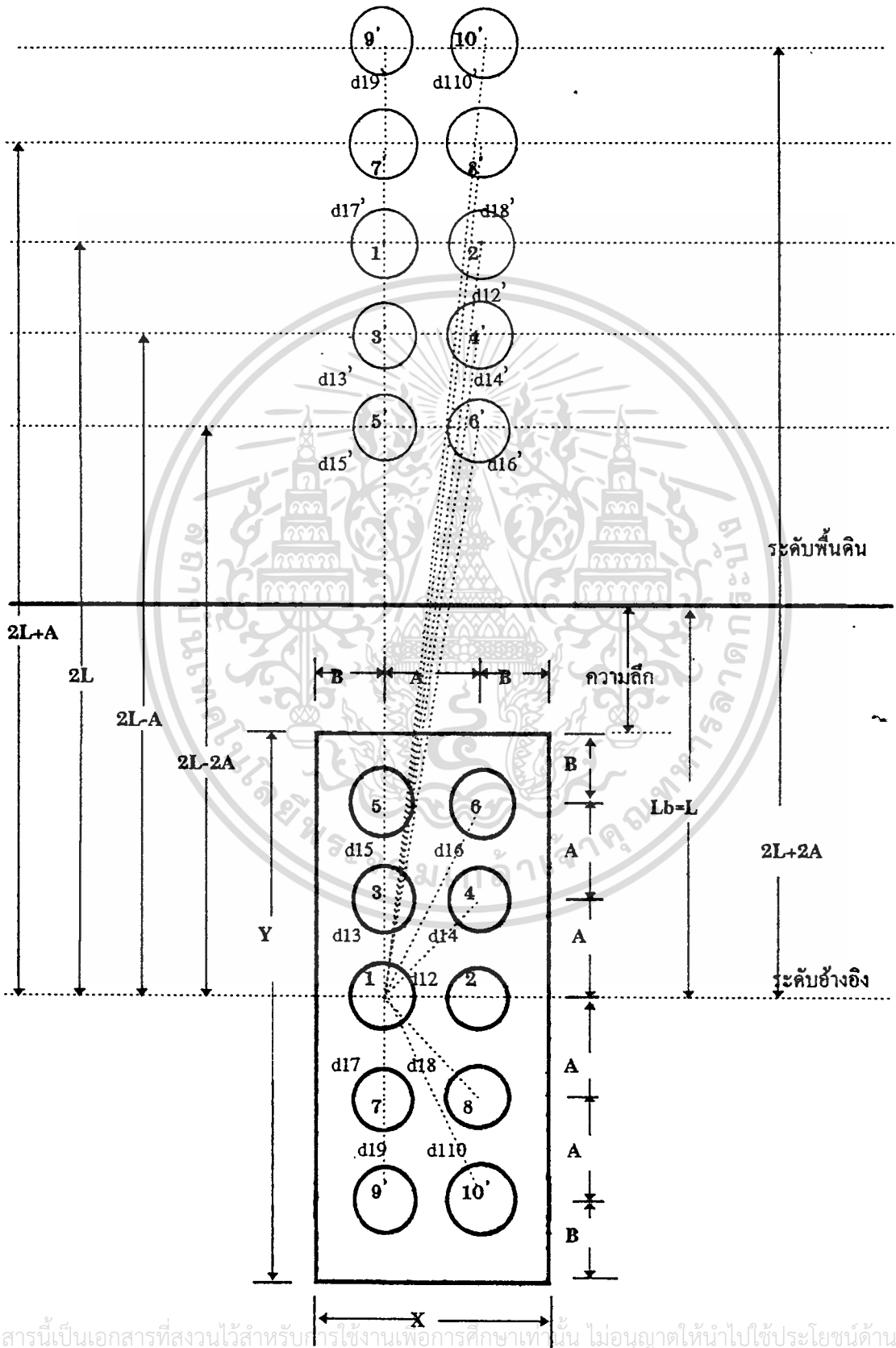
$$F_3 = \left(\frac{d_{18'}}{d_{18}} \right) \left(\frac{d_{19'}}{d_{19}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + A^2}}{\sqrt{2}A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right)$$

$$\frac{Y}{X} = 1$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{8A + 8B}$$

นำค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟที่ 5.2 จะได้ G_b

10. DUCT BANK มิติ 2 x 5 จำนวน 10 วงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้ว่า

$$L = Lb = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 2A + B$$

$$F = (F_1)(F_2)(F_3)$$

$$F_1 = \left(\frac{d_{12}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14}}{d_{14}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)}}{A} \right) \left(\frac{2L - A}{A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right)$$

$$F_2 = \left(\frac{d_{15}}{d_{15}} \right) \left(\frac{d_{16}}{d_{16}} \right) \left(\frac{d_{17}}{d_{17}} \right) = \left(\frac{2L - 2A}{2A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{2L + A}{A} \right)$$

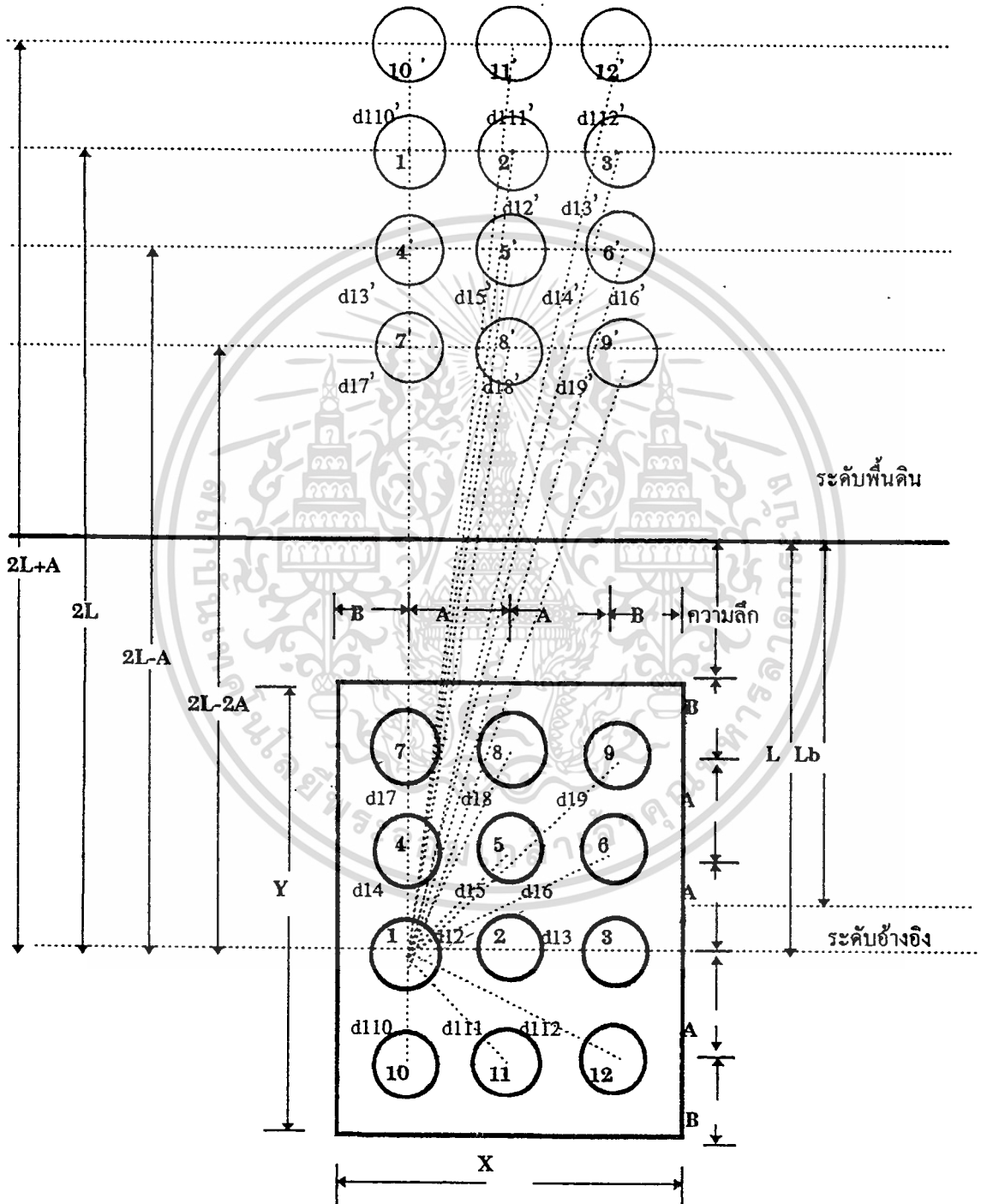
$$F_3 = \left(\frac{d_{18}}{d_{18}} \right) \left(\frac{d_{19}}{d_{19}} \right) \left(\frac{d_{10}}{d_{10}} \right) = \left(\frac{2L + 2A}{2A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{4A^2 + A^2}} \right) \left[\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right]$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{4A + 2B}{A + 2B}$$

$$\frac{Lb}{P} = \frac{Lb}{10A + 8B}$$

นำค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{Lb}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ G_b

11. DUCT BANK มิติ 3 x 4 จำนวน 12 วงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้ว่า

$$L_b = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 1.5 A + B$$

$$L = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 2A + B$$

$$F = (F_1)(F_2)(F_3)(F_4)$$

$$F_1 = \left(\frac{d_{12}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14}}{d_{14}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)}}{A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L)^2 + 4A^2}}{2A} \right) \left(\frac{2L - A}{A} \right)$$

$$F_2 = \left(\frac{d_{15}}{d_{15}} \right) \left(\frac{d_{16}}{d_{16}} \right) \left(\frac{d_{17}}{d_{17}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2}A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{4A^2 + A^2}} \right) \left(\frac{2L - 2A}{2A} \right)$$

$$F_3 = \left(\frac{d_{18}}{d_{18}} \right) \left(\frac{d_{19}}{d_{19}} \right) \left(\frac{d_{110}}{d_{110}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{4A^2 + 4A^2}} \right) \left(\frac{2L + A}{A} \right)$$

$$F_4 = \left(\frac{d_{111}}{d_{111}} \right) \left(\frac{d_{112}}{d_{112}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{2}A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right)$$

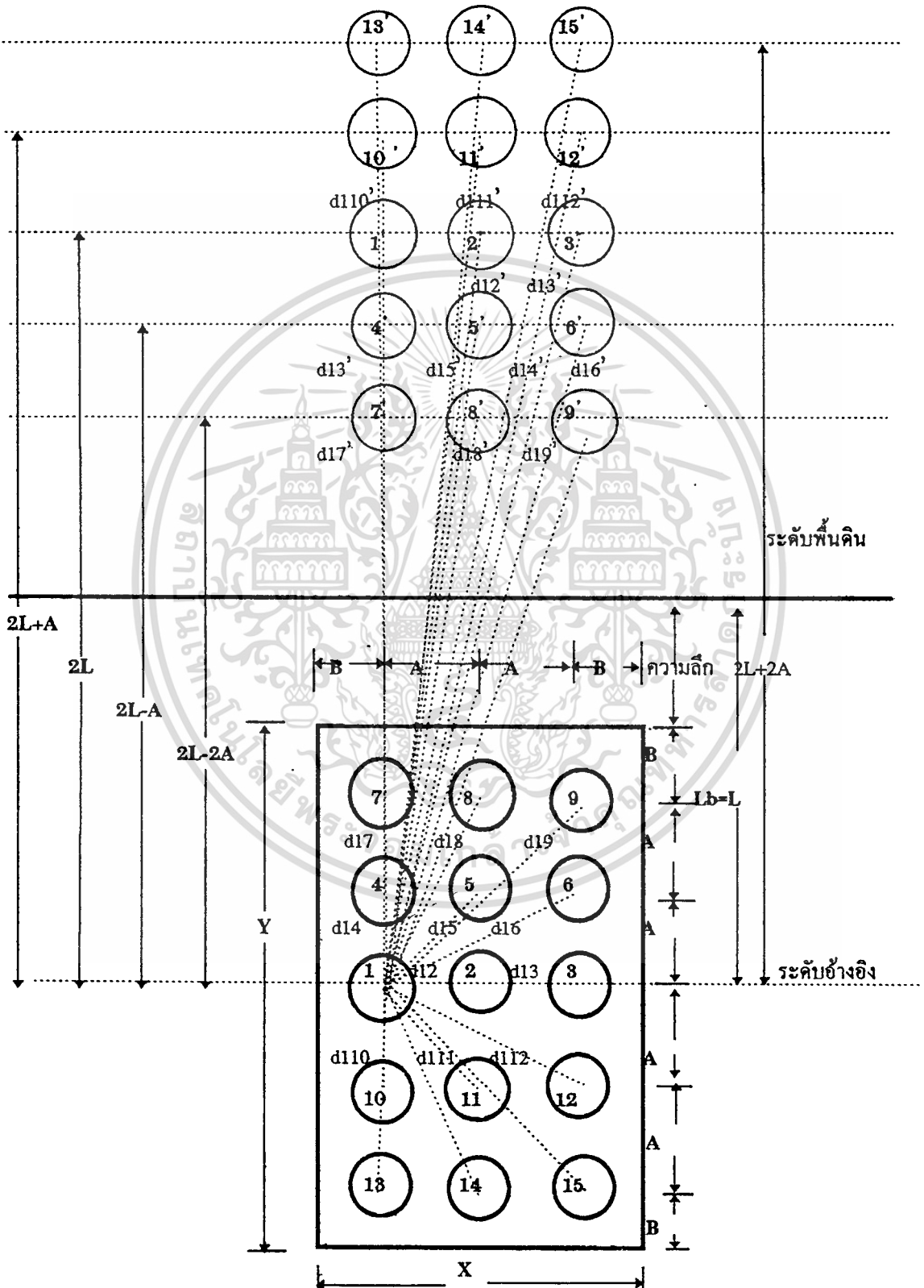
$$\frac{Y}{X} = \frac{3A + 2B}{2A + 2B}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{10A + 8B}$$

นำค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟที่ 5.2 จะได้ G_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. DUCT BANK มิติ 3 x 5 จำนวน 15 วงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้ว่า

$$L = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 1.5 A + B$$

$$L_b = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 2A + B$$

$$F = (F_1)(F_2)(F_3)(F_4)(F_5)$$

$$F_1 = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}}\right)\left(\frac{d_{13'}}{d_{13}}\right)\left(\frac{d_{14'}}{d_{14}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)}}{A}\right)\left(\frac{\sqrt{4L^2 + 4A^2}}{2A}\right)\left(\frac{2L - A}{A}\right)$$

$$F_2 = \left(\frac{d_{15'}}{d_{15}}\right)\left(\frac{d_{16'}}{d_{16}}\right)\left(\frac{d_{17'}}{d_{17}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{4A^2 + A^2}}\right)\left(\frac{2L - 2A}{2A}\right)$$

$$F_3 = \left(\frac{d_{18'}}{d_{18}}\right)\left(\frac{d_{19'}}{d_{19}}\right)\left(\frac{d_{110'}}{d_{110}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{4A^2 + 4A^2}}\right)\left(\frac{2L + A}{A}\right)$$

$$F_4 = \left(\frac{d_{111'}}{d_{111}}\right)\left(\frac{d_{112'}}{d_{112}}\right)\left(\frac{d_{113'}}{d_{113}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}}\right)\left(\frac{2L + 2A}{2A}\right)$$

$$F_5 = \left(\frac{d_{114'}}{d_{114}}\right)\left(\frac{d_{115'}}{d_{115}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{4A^2 + A^2}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + 4A^2)}}\right)$$

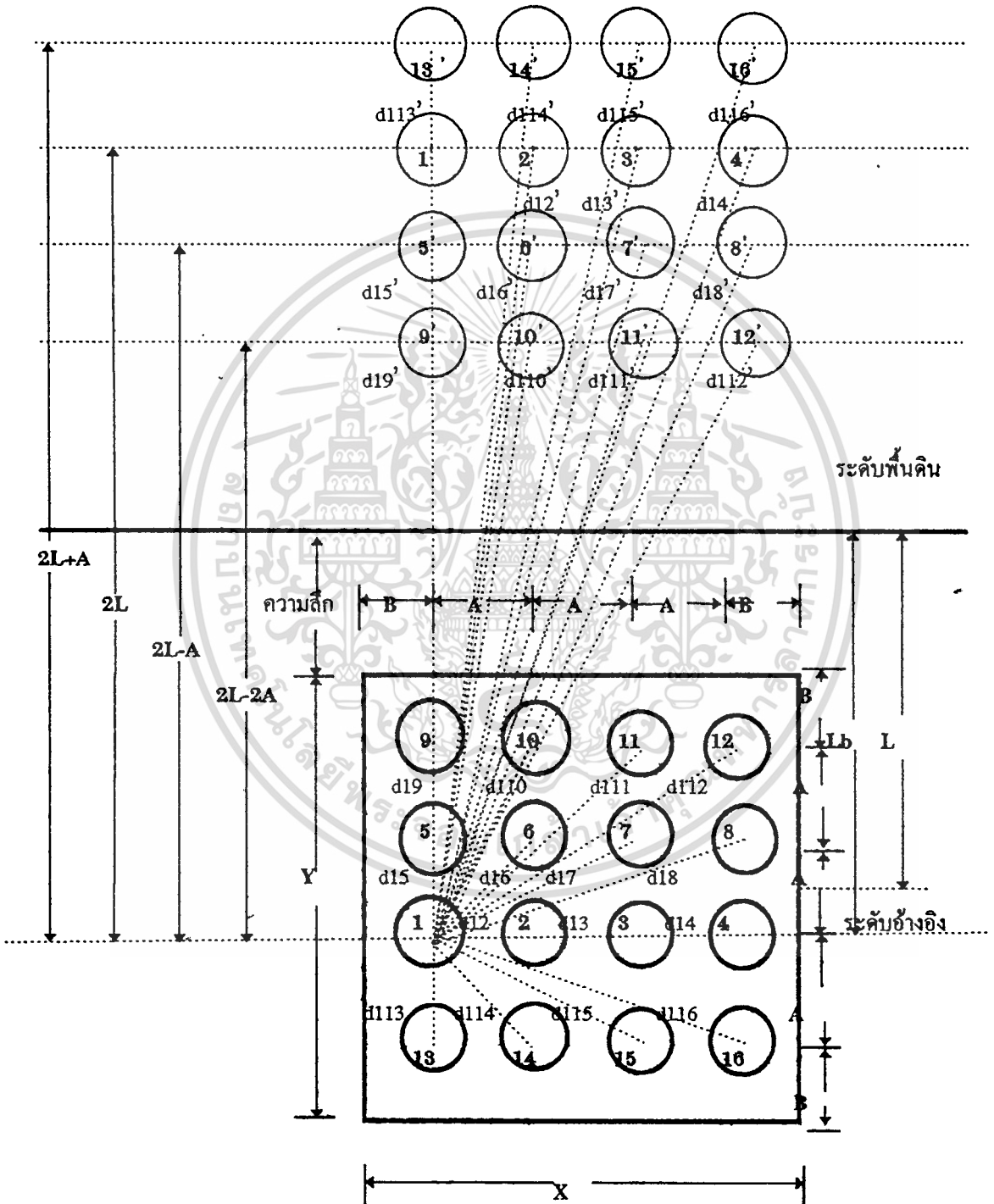
$$\frac{Y}{X} = \frac{4A + 2B}{2A + 2B}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{12A + 8B}$$

นำค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ G_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. DUCT BANK มิติ 4 x 4 จำนวน 16 วงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้ว่า

$$L = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 1.5 A + B$$

$$L_b = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 2A + B$$

$$F = (F_1)(F_2)(F_3)(F_4)(F_5)$$

$$F_1 = \left(\frac{d_{12}}{d_{12}}\right)\left(\frac{d_{13}}{d_{13}}\right)\left(\frac{d_{14}}{d_{14}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)}}{A}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L)^2 + 4A^2}}{2A}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L)^2 + 9A^2}}{3A}\right)$$

$$F_2 = \left(\frac{d_{15}}{d_{15}}\right)\left(\frac{d_{16}}{d_{16}}\right)\left(\frac{d_{17}}{d_{17}}\right) = \left(\frac{(2L - A)}{A}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + 4A}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}}\right)$$

$$F_3 = \left(\frac{d_{18}}{d_{18}}\right)\left(\frac{d_{19}}{d_{19}}\right)\left(\frac{d_{110}}{d_{110}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + 9A^2}}{\sqrt{(9A^2 + A^2)}}\right)\left(\frac{(2L - 2A)}{2A}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}}\right)$$

$$F_4 = \left(\frac{d_{111}}{d_{111}}\right)\left(\frac{d_{112}}{d_{112}}\right)\left(\frac{d_{113}}{d_{113}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{8A^2}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + 9A^2}}{\sqrt{(9A^2 + 4A^2)}}\right)\left(\frac{2L + A}{A}\right)$$

$$F_5 = \left(\frac{d_{114}}{d_{114}}\right)\left(\frac{d_{115}}{d_{115}}\right)\left(\frac{d_{116}}{d_{116}}\right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}}\right)\left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 9A^2}}{\sqrt{9A^2 + A^2}}\right)$$

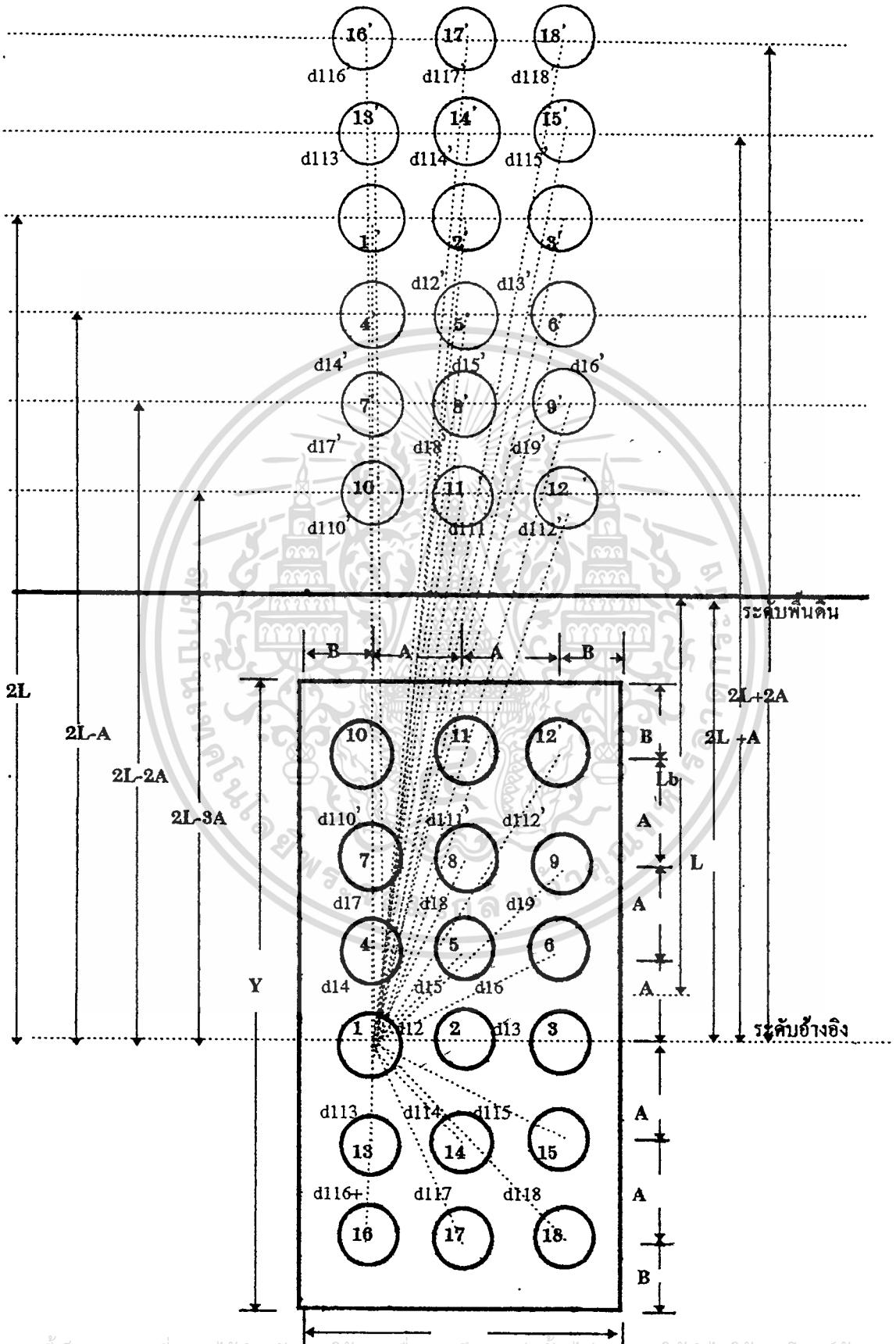
$$\frac{Y}{X} = I$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{12A + 8B}$$

นำค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ G_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. DUCT BANK มิติ 3 x 6 จำนวน 18วงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้ว่า

$$L = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 2.5 A + B$$

$$L_b = \text{ความลึกของการฝั่ง} + 8A + B$$

$$F = (F_1)(F_2)(F_3)(F_4)(F_5)(F_6)$$

$$F_1 = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14'}}{d_{14}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)}}{A} \right) \left(\frac{\sqrt{4L^2 + 4A^2}}{2A} \right) \left(\frac{2L - A}{A} \right)$$

$$F_2 = \left(\frac{d_{15'}}{d_{15}} \right) \left(\frac{d_{16'}}{d_{16}} \right) \left(\frac{d_{17'}}{d_{17}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{4A^2 + A^2}} \right) \left(\frac{2L - 2A}{2A} \right)$$

$$F_3 = \left(\frac{d_{18'}}{d_{18}} \right) \left(\frac{d_{19'}}{d_{19}} \right) \left(\frac{d_{110'}}{d_{110}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{4A^2 + 4A^2}} \right) \left(\frac{2L - 3A}{3A} \right)$$

$$F_4 = \left(\frac{d_{111'}}{d_{111}} \right) \left(\frac{d_{112'}}{d_{112}} \right) \left(\frac{d_{113'}}{d_{113}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - 3A)^2 + A^2}}{\sqrt{(9A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - 3A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(9A^2 + 4A^2)}} \right) \left(\frac{2L + A}{2A} \right)$$

$$F_5 = \left(\frac{d_{114'}}{d_{114}} \right) \left(\frac{d_{115'}}{d_{115}} \right) \left(\frac{d_{116'}}{d_{116}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{2L + 2A}{2A} \right)$$

$$F_6 = \left(\frac{d_{117'}}{d_{117}} \right) \left(\frac{d_{118'}}{d_{118}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + 4A^2)}} \right)$$

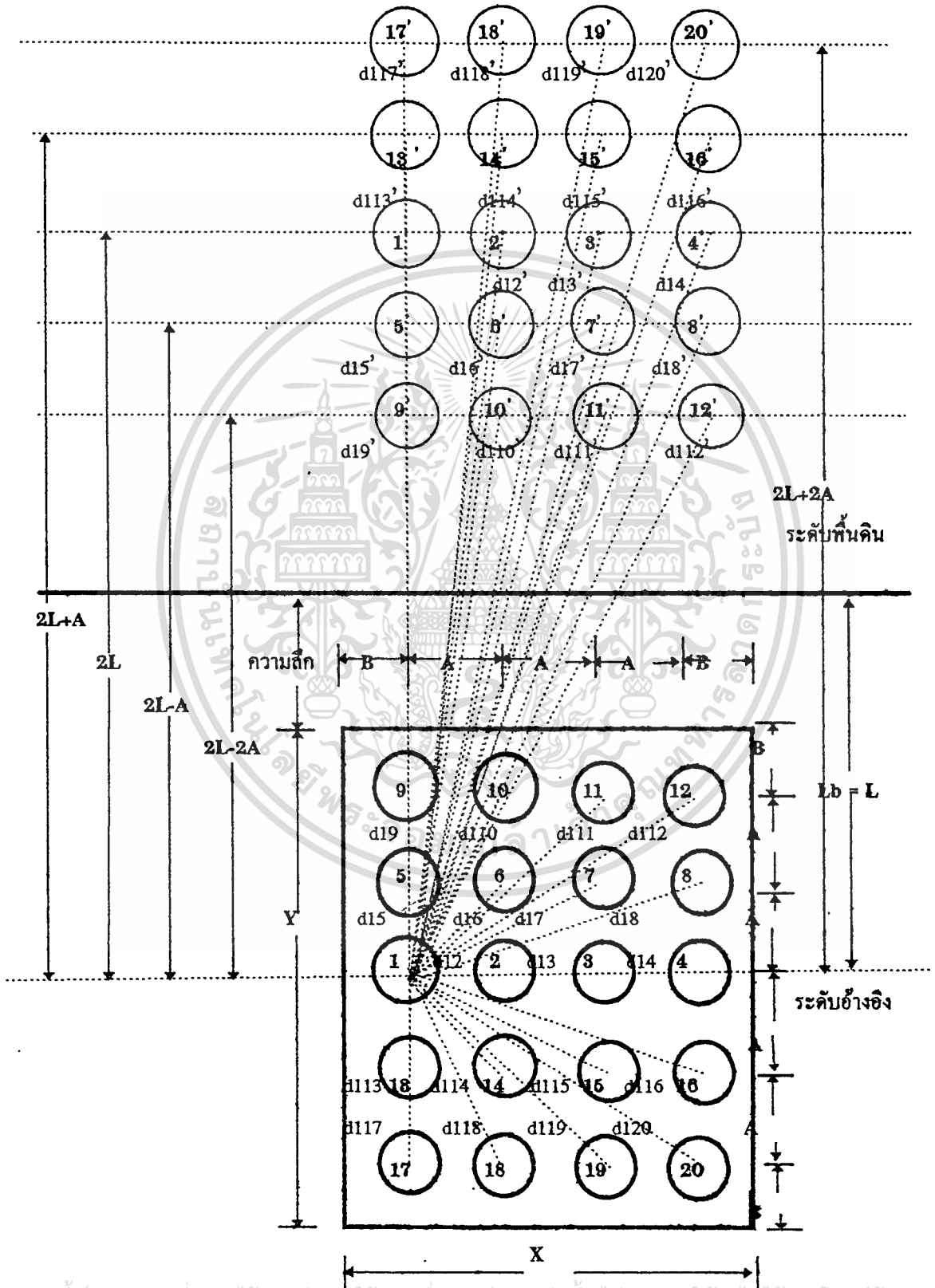
$$\frac{Y}{X} = \frac{5A + 2B}{2A + 2B}$$

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{14A + 8B}$$

นำค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ G_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. DUCT BANK มิติ 4 x 4 จำนวน 16 วงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้ว่า

$$L = Lb = \text{ความลึกของการฝัง} + 2A + B$$

$$F = (F_1)(F_2)(F_3)(F_4)(F_5)(F_6)(F_7)$$

$$F_1 = \left(\frac{d_{12}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13}}{d_{13}} \right) \left(\frac{d_{14}}{d_{14}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + A^2)}}{A} \right) \left(\frac{\sqrt{4L^2 + 4A^2}}{2A} \right) \left(\frac{\sqrt{(4L^2 + 9A^2)}}{3A} \right)$$

$$F_2 = \left(\frac{d_{15}}{d_{15}} \right) \left(\frac{d_{16}}{d_{16}} \right) \left(\frac{d_{17}}{d_{17}} \right) = \left(\frac{(2L - A)}{A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right)$$

$$F_3 = \left(\frac{d_{18}}{d_{18}} \right) \left(\frac{d_{19}}{d_{19}} \right) \left(\frac{d_{110}}{d_{110}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - A)^2 + 9A^2}}{\sqrt{(9A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{2L - 2A}{2A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right)$$

$$F_4 = \left(\frac{d_{111}}{d_{111}} \right) \left(\frac{d_{112}}{d_{112}} \right) \left(\frac{d_{113}}{d_{113}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{8A^2}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L - 2A)^2 + 9A^2}}{\sqrt{13A^2}} \right) \left(\frac{2L + A}{A} \right)$$

$$F_5 = \left(\frac{d_{114}}{d_{114}} \right) \left(\frac{d_{115}}{d_{115}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + A^2}}{\sqrt{2A}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right)$$

$$F_6 = \left(\frac{d_{116}}{d_{116}} \right) \left(\frac{d_{117}}{d_{117}} \right) \left(\frac{d_{118}}{d_{118}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + A)^2 + 9A^2}}{\sqrt{(9A^2 + A^2)}} \right) \left(\frac{2L + 2A}{2A} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + A^2}}{\sqrt{(4A^2 + A^2)}} \right)$$

$$F_7 = \left(\frac{d_{119}}{d_{119}} \right) \left(\frac{d_{120}}{d_{120}} \right) = \left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + 4A^2}}{\sqrt{(4A^2 + 4A^2)}} \right) \left(\frac{\sqrt{(2L + 2A)^2 + 9A^2}}{\sqrt{(9A^2 + 4A^2)}} \right)$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{4A + 2B}{3A + 2B}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{L_b}{P} = \frac{L_b}{14A + 8B}$$

นำค่า $\frac{Y}{X}$ และ $\frac{L_b}{P}$ ไปดูกราฟรูปที่ 5.2 จะได้ G_b

(6) กำหนดหาค่าอุณหภูมิที่ Dielectric

1. กรณีเดินลอยในอากาศ $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_e \right]$
2. กรณีเดินในท่อลอยในอากาศ $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_e \right]$
3. กรณีเดินฝังดินโดยตรง $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_{e'} \right]$
4. กรณีเดินในท่อฝังดิน $\Delta T_d = Wd \left[\frac{\bar{R}_i}{2} + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_{e'} \right]$

(7) กำหนดหาค่ากระแสของสายเคเบิล จากสมการ

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + \gamma_c) \bar{R}_{ca}}} \quad \text{kA}$$

(8) ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง 5.5. สายแกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อโลหะในอากาศ ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิลแบบ XLPE แบบมี shield เบอร์ 150
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 2400 Volts
- ตัวนำและ shield เป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20C° (R_{dc}) = 0.124 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (D_c) = 14.6 m.m. = 0.574802 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (D_j) = 34 m.m. = 1.33858 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 5.5 m.m. = 0.216535 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (t_j) = 2.0 m.m. = 0.07874 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (T_c) = 90C°
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (T_a) = 40C°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round

วิธีทำ

$$\begin{aligned} t_s &= 0.12 t_j = 0.12 \times 0.07874 = 0.0094488 \text{ นิ้ว} \\ D_i &= D_c + 2T = 0.574802 + 2(0.216535) = 1.007872 \text{ นิ้ว} \\ D_s &= D_i + 2t_s = 1.007872 + 2(0.0094488) = 1.0267696 \text{ นิ้ว} \\ D_{sm} &= D_s - t_s = 1.0267696 - 0.0094488 = 1.0171432 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 90^\circ\text{C} &= R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 20^\circ\text{C} \frac{[234.5 + T_c] [1000]}{[234.5 + 20^\circ] 3.28084} \\ &= \frac{0.124 [234.5 + 90^\circ] [1000]}{[234.5 + 20^\circ] 3.28084} \\ &= 48.190735 \text{ microhm per foot} \end{aligned}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

จะได้ $K_s = 1$, $K_p = 0.8$

$$\frac{R_{dc}}{K_s} = \frac{48.190735}{1} = 48.190735 \text{ นำไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1}$$

$$K_p = 0.8$$

จะได้ $F(x_s) = 0.005224$ ซึ่งจะเท่ากับ Y_{cs}

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{48.190735}{0.8} = 60.23841875 \text{ ไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'p) = 0.003679$$

$$K_p = 0.8$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.574802 + 2(0.216535 + 0.005224) = 1.018319$$

$$Y_{cp} = \frac{2(D_c)^2 F(X'p)}{S^2} = \frac{2(0.574802)^2 (0.003679)}{(1.018319)^2} = 0.002344383$$

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} = 1 + 0.005224 + 0.002344383 = 1.001724$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13.85640646 \text{ Volt}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho} \log \frac{\bar{D}_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho} \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ } ^\circ\text{C cm/watt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\bar{R}_i &= \frac{0.012 \times 390 \times \log [1.007872]}{0.574802} \\ &= 1.141391673 \text{ thermal ohm-foot}\end{aligned}$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times \epsilon_r \times (\text{pf}) \times E^2}{\log \frac{2T + D_c}{D_c}}$$

จาก ตาราง 5.5 ค่า ϵ_r ของ polyethylene = 2.3

ค่า pf ของฉนวน = 0.005

$$\begin{aligned}W_d &= \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (13.85640646)^2}{\log [2(0.216535) + 0.574802]} \\ &= \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (13.85640646)^2}{0.574802} \\ &= 0.024987298 \text{ watt per conductor}\end{aligned}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'}{(D_j - t_j)}$$

n' คือจำนวนตัวนำในระบบ = 3

ค่า thermal resistivity ของ Jacket = 360 $^{\circ}\text{C cm/watt}$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.07874 \times 3}{(1.33858 - 0.07874)} = 0.702 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$R_s = \frac{\rho_s \times (234.5 + 50)}{4D_{smts} \times (234.5 + 20)}$$

จากตาราง 5.1 ค่า-electrical resistivity ของทองแดง = 10.371 circular mil ohm per foot

$$R_s = \frac{10.371 \times (234.5 + 50)}{4 \times 1.0171432 \times 0.0094488 \times (234.5 + 20)} = 301.5 \mu\Omega/\text{foot}$$

$$s = 1.155T + 0.58D_c = 1.155(0.216535) + 0.58(0.574802) = 0.583483$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อเป็นสายแกนเดี่ยว 3 เส้น } Y_{se} = Y_s &= \frac{3(2sf)^2}{R_s R_{dc} (5.2 D S m)^2} \\ &= \frac{3(2 \times 0.583483 \times 50)^2}{(301.5)(48.190735)(5.2 \times 1.0171432)^2} \\ &= 0.025127883\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_s = \frac{1 + Y_s}{1 + Y_c} = \frac{1 + 0.025127883}{1.007568} = 1.024$$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'A'}{D's+B'}$$

$$D's = 2.15 D_i = 2.15 \times 1.007878 = 2.1669377 \text{ นิ้ว}$$

จาก ตาราง 5.7 เมื่อท่อเป็นแบบโลหะจะได้ค่า $A' = 3.2$ ค่า $B' = 0.19$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{3 \times 3.2}{2.1669377 + 0.19} = 4.073081779$$

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \times \bar{\rho} \times n'}{(D_d - t_d)} \text{ (td)}$$

$$D_d = \text{outside diameter ของท่อ} = 4.5 \text{ นิ้ว}$$

$$t_d = \text{ความหนาของท่อ} = 0.225 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{ค่า thermal resistivity ของท่อโลหะ} = 30$$

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \times 30 \times 3 (0.225)}{(4.5 - 0.225)} = 0.049263157 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$Y_p = \frac{1.54s - 0.115D_p}{R_{dc}}$$

$$D_p = \text{inside diameter ของท่อ} = 4.05 \text{ นิ้ว}$$

$$Y_p = \frac{1.54(0.583483) - 0.115(4.05)}{48.190735} = 0.0089263157$$

$$q_e = \frac{1 + Y_s + Y_p}{1 + Y_c} = \frac{1 + 0.025127 + 0.008981266}{1.007568} = 1.033$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5x_n'}{1 + 1.7D_d(e + 0.41)}$$

$$\text{ค่า } e \text{ ของท่อ} = 0.95$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5 \times 3}{1 + 1.7 \times 4.5(0.95 + 0.41)} = 2.499123115 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{ca} &= \bar{R}_i + \bar{R}_j + q_s(\bar{R}_{sd} + \bar{R}_d) + q_e + \bar{R}_e \\ &= 1.141392 + 0.702 + 1.024(4.073104 + 0.049263) + (1.021436 \times 2.499) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 8.6522 \text{ thermal ohm-foot} \\
 \Delta T_d &= \frac{W_d [\bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_e]}{2} \\
 &= \frac{0.024987(1.141392 + 0.702 + 4.073104 + 0.049263 + 2.499)}{2} \\
 &= 0.197248952
 \end{aligned}$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c)R_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = \sqrt{\frac{90 - (40 + 0.197248952)}{48.190735 \times (1.007563) \times (8.6522)}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = 344.30673 \text{ Amp.}$$

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงได้ทึกักกระแส = 348 Amp.

ตัวอย่าง 5.6. สายเคเบิลเดี่ยว หนึ่งวงจรฝังดินโดยตรง ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิลแบบ XLPE แบบมี shield เบอร์ 150
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 2400 Volts
- ตัวนำและ shield เป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20°C (R_{dc}) = 0.124 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (D_c) = 14.6 m.m. = 0.574802 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (D_j) = 34 m.m. = 1.33858 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 5.5 m.m. = 0.216535 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (t_j) = 2.0 m.m. = 0.07874 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (T_c) = 90°C
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (T_a) = 30°C
- ความถี่ที่ใช้ (f) = 50 Hz
- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 t_s &= 0.12 t_j = 0.12 \times 0.07874 = 0.0094488 \text{ นิ้ว} \\
 D_i &= D_c + 2T = 0.574802 + 2(0.216535) = 1.007872 \text{ นิ้ว} \\
 D_s &= D_i + 2t_s = 1.007872 + 2(0.0094488) = 1.0267696 \text{ นิ้ว} \\
 D_{sm} &= D_s - t_s = 1.0267696 - 0.0094488 = 1.0171432 \text{ นิ้ว}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 90^\circ\text{C} &= R_{dc} \text{ ที่อุณหภูมิ } 20^\circ\text{C} \frac{[234.5 + T_c] [1000]}{[234.5 + 20^\circ]} 3.28084 \\
 &= \frac{0.124[234.5 + 90^\circ] [1000]}{[234.5 + 20^\circ]} 3.28084
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 48.190735 \text{ microhm per foot}
 \end{aligned}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

$$\text{จะได้ } K_s = 1, K_p = 0.8$$

$$\frac{R_{dc}}{K_s} = \frac{48.190735}{1} = 48.190735 \text{ นำไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1}$$

$$\text{จะได้ } F(x_s) = 0.005224 \text{ ซึ่งจะเท่ากับ } Y_{cs}$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{48.190735}{0.8} = 60.23841875 \text{ ไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'p) = 0.003679$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.574802 + 2(0.216535 + 0.005224) = 1.018319$$

$$Y_{cp} = \frac{2(D_c)^2 F(X'p)}{S^2} = \frac{2(0.574802)^2 (0.003679)}{(1.018319)^2} = 0.002344383$$

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} = 1 + 0.005224 + 0.002344383 = 1.007568383$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13.85640646 \text{ Volt}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log \frac{D_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho}_i \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ }^\circ\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \times 390 \times \log \left[\frac{1.007872}{0.574802} \right]$$

$$= 1.141391673 \text{ thermal ohm-foot}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Wd = \frac{0.00276 \times Er \times (pf) \times E^2}{\log \frac{2T+Dc}{Dc}}$$

จาก ตาราง 5.5 ค่า Er ของ polyethylene = 2.3

ค่า pf ของฉนวน = 0.005

$$Wd = \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (13.85640646)^2}{\log [2(0.216535) + 0.574802]}$$

$$= 0.024987298 \text{ watt per conductor}$$

$$R_j = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'}{(D_j - t_j)}$$

n' คือจำนวนตัวนำในระบบ = 1

ค่า thermal resistivity ของ Jacket = 360 C° cm/watt

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.07874 \times 1}{(1.33858 - 0.07874)} = 0.234 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$R_s = \frac{\bar{\rho}_s \times (234.5 + 50)}{4D_{smts} \times (234.5 + 20)}$$

จากตาราง 5.1 ค่า electrical resistivity ของทองแดง = 10.371 circular mil ohm per foot

$$R_s = \frac{10.371 \times (234.5 + 50)}{4 \times 1.0171432 \times 0.0094488 \times (234.5 + 20)} = 301.5 \mu\Omega/\text{foot}$$

$$s = 1.155T + 0.58Dc = 1.155(0.216535) + 0.58(0.574802) = 0.583483$$

$$\text{เมื่อเป็นสายแกนเคี้ยว } Y_s = \frac{3R_s/R_{dc}}{\frac{(5.2R_s)^2}{f^2} + \frac{1(2s)}{5(D_{sm})}} \times \frac{D_{sm}^2 [1 + 5(D_{sm})^2]}{(2s)^2 \cdot 12(2s)^2}$$

$$Y_s = \frac{3 \times 301.5 / 48.190735 \times (1.0171432)^2 [1 + 5(1.0171432)^2]}{\frac{(5.2 \times 301.5)^2}{50^2} + \frac{(2 \times 1.018319)}{(5 \times 1.0171432)} \cdot \frac{(2 \times 1.018319)^2}{12(2 \times 1.018319)^2}}$$

$$Y_s = 0.004761$$

$$q_e = q_s = \frac{1 + Y_s}{1 + Y_c} = \frac{1 + 0.004761}{1.001724} = 1.004725$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_{e'} = \frac{0.012 \bar{\rho}_{en'} [\log \frac{8.3}{D_e} + (LF) \log \frac{4LF}{8.3}]}{D_e}$$

$$D_e = D_j = 1.33858$$

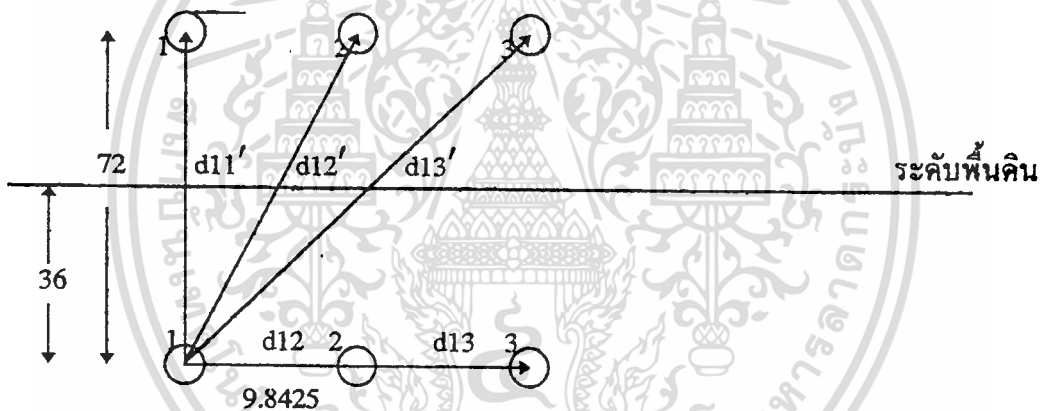
$$F = \frac{(d_{12}') (d_{13}')}{(d_{12}) (d_{13})} = \frac{\sqrt{(72^2 + 9.8425^2)}}{9.8425} \frac{\sqrt{(72^2 + 19.685^2)}}{19.685}$$

$$= 27.9961832$$

$$\bar{R}_{e'} = \frac{0.012 \times 180 \times 1 \times [\log \frac{8.3}{1.33858} + 0.8 \log (4 \times 36 \times 27.9961832)]}{8.3}$$

$$\bar{R}_{e'} = 4.2358 \text{ thermal ohm-foot}$$

การหาค่าของ F



$$\Delta T_d = \frac{W_d [\bar{R}_i + \bar{R}_j + q_s \bar{R}_{e'}]}{2}$$

$$= \frac{0.024 [1.141392 + 0.234 + (1.004725 \times 3.17688388)]}{2}$$

$$= 0.1259$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{e'}$$

$$= 1.141392 + 0.234 + 4.2358$$

$$= 5.6312 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc} (1 + Y_c) \bar{R}_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \sqrt{\frac{90-(30+0.1259)}{48.190735 \times (1.001724)(5.6312)}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = 467.9495 \text{ Amp.}$$

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงได้พิกัดกระแส = 460 Amp.

ตัวอย่าง 5.7. ท่อแกนเดี่ยวสามเส้นเดินในท่อโลหะฝังดิน ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิลแบบ XLPE แบบมี shield เบอร์ 150
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 2400 Volts
- ตัวนำและ shield เป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20C° (Rdc) = 0.124 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (Dc) = 14.6 m.m. = 0.574802 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (Dj) = 34 m.m. = 1.33858 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 5.5 m.m. = 0.216535 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (tj) = 2.0 m.m. = 0.07874 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (Tc) = 90C°
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (Ta) = 30C°
- ความถี่ที่ใช้ (f) = 50 Hz
- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round

วิธีทำ

$$\begin{aligned} ts &= 0.12 tj = 0.12 \times 0.07874 = 0.0094488 \text{ นิ้ว} \\ Di &= Dc + 2T = 0.574802 + 2(0.216535) = 1.007872 \text{ นิ้ว} \\ Ds &= Di + 2ts = 1.007872 + 2(0.0094488) = 1.0267696 \text{ นิ้ว} \\ Dsm &= Ds - ts = 1.0267696 - 0.0094488 = 1.0171432 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

$$Rdc \text{ ที่อุณหภูมิ } 90C^\circ = Rdc \text{ ที่อุณหภูมิ } 20C^\circ \frac{[234.5 + Tc]}{[234.5 + 20]} [1000]$$

$$= 0.124 \frac{[234.5 + 90]}{[234.5 + 20]} [1000] = 3.28084$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{0.124[234.5+90^\circ] [1000]}{[234.5+20^\circ] 3.28084}$$

$$= 48.190735 \text{ microhm per foot}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

$$\text{จะได้ } K_s = 1, K_p = 0.8$$

$$\frac{R_{dc}}{K_s} = \frac{48.190735}{1} = 48.190735 \text{ นำไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1}$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{48.190735}{0.8} = 60.23841875 \text{ ไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'p) = 0.003679$$

$$\text{จะได้ } F(x_s) = 0.005224 \text{ ซึ่งจะเท่ากับ } Y_{cs}$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{48.190735}{0.8} = 60.23841875 \text{ ไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'p) = 0.003679$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{48.190735}{0.8} = 60.23841875$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.574802 + 2(0.216535 + 0.005224) = 1.018319$$

$$Y_{cp} = \frac{2(D_c)^2 F(X'p)}{S^2} = \frac{2(0.574802)^2 (0.003679)}{(1.018319)^2} = 0.002344383$$

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} = 1 + 0.005224 + 0.002344383 = 1.007568383$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13.85640646 \text{ Volt}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log \frac{\bar{D}_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho}_i \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ } ^\circ\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \times 390 \times \log \left[\frac{1.007872}{0.574802} \right]$$

$$= 1.141391673 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times \epsilon_r \times (\text{pf}) \times E^2}{\log \frac{2T + D_c}{D_c}}$$

$$\text{จาก ตาราง 5.5 ค่า } \epsilon_r \text{ ของ polyethylene} = 2.3$$

$$\text{ค่า pf ของฉนวน} = 0.005$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (13.85640646)^2}{\log [2(0.216535) + 0.574802]}$$

$$0.574802$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.024987298 \text{ watt per conductor}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'}{(D_j - t_j)}$$

$$n' \text{ คือจำนวนตัวนำในระบบ} = 3$$

$$\text{ค่า thermal resistivity ของ Jacket} = 360 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}/\text{watt}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.07874 \times 3}{(1.33858 - 0.07874)} = 0.702 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$R_s = \frac{\bar{\rho}_s \times (234.5 + 50)}{4 D_{smts} \times (234.5 + 20)}$$

$$\text{จากตาราง 5.1 ค่า electrical resistivity ของทองแดง} = 10.371 \text{ circular mil ohm per foot}$$

$$R_s = \frac{10.371 \times (234.5 + 50)}{4 \times 1.0171432 \times 0.0094488 \times (234.5 + 20)} = 301.5 \text{ } \mu\Omega/\text{foot}$$

$$s = 1.155T + 0.58Dc = 1.155(0.216535) + 0.58(0.574802) = 0.583483$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อเป็นสายแกนเดี่ยว 3 เส้น } Y_{se} = Y_s &= \frac{3(2sf)^2}{R_s R_{dc} (5.2 D_{sm})^2} \\ &= \frac{3(2 \times 0.583483 \times 50)^2}{(301.5)(48.190735)(5.2 \times 1.0171432)^2} \\ &= 0.025127883 \end{aligned}$$

$$q_s = \frac{1 + Y_s}{1 + Y_c} = \frac{1 + 0.025127883}{1.007568} = 1.024939143$$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A'}{D'^s + B'}$$

$$D'^s = 2.15 D_i = 2.15 \times 1.007878 = 2.1669377 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{จาก ตาราง 5.7 เมื่อท่อเป็นแบบโลหะจะได้ค่า } A' = 3.2 \text{ ค่า } B' = 0.19$$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{3 \times 3.2}{2.1669377 + 0.19} = 4.073081779$$

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_d \times n'}{(D_d - t_d)} \text{ (td)}$$

$$D_d = \text{outside diameter ของท่อ} = 4.5 \text{ นิ้ว}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_d = \text{ความหนาของท่อ} = 0.225 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{ค่า thermal resistivity ของท่อโลหะ} = 30$$

$$\bar{R}_d = 0.0104 \times 30 \times 3 \frac{(0.225)}{(4.5 - 0.225)} = 0.049263157 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$Y_p = \frac{1.54s - 0.115D_p}{R_{dc}}$$

$$D_p = \text{inside diameter ของท่อ} = 4.05 \text{ นิ้ว}$$

$$Y_p = \frac{1.54(0.583483) - 0.115(4.05)}{48.190735} = 0.0089263157$$

$$q_e = \frac{1 + Y_s + Y_p}{1 + Y_c} = \frac{1 + 0.025127 + 0.008981266}{1.007568} = 1.03385$$

$$\bar{R}_e' = 0.012 \frac{\bar{R}_{en}'}{D_e} \left[\log \frac{8.3}{D_e} + (LF) \log \frac{4LF}{8.3} \right]$$

$$F = 1$$

$$\text{ค่า thermal resistance ของดิน} = 30$$

$$D_e = D_d = \text{Outside diameter ของท่อ} = 4.5 \text{ นิ้ว}$$

$$L \text{ (ความลึกของการฝังดิน)} = 36 \text{ นิ้ว}$$

$$\bar{R}_e' = 0.012 \times 30 \times 3 \times \left[\log \frac{8.3}{4.5} + 0.8 \log \frac{(4 \times 36 \times 1)}{8.3} \right]$$

$$\bar{R}_e' = 1.35787 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{ca} &= \bar{R}_i + \bar{R}_j + q_s(\bar{R}_{sd} + \bar{R}_d) + q_e \bar{R}_e' \\ &= 1.141392 + 0.702 + 1.024(4.073104 + 0.049263) + (1.03385 \times 1.35787) \\ &= 7.472354 \text{ thermal ohm-foot} \end{aligned}$$

$$\Delta T_d = W_d \frac{[\bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_e']}{2}$$

$$= 0.024987 \frac{(1.141392 + 0.702 + 4.073104 + 0.049263 + 1.35787)}{2}$$

$$= 0.168738 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c) \bar{R}_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \sqrt{\frac{90-(30+0.168738)}{48.190735 \times (1.001724)(7.47235)}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = 406.084 \text{ Amp.}$$

มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงไม่ได้กำหนดเอาไว้.

ตัวอย่าง 5.8. ท่อแกนเดี่ยวสามเส้นเดินในท่อโลหะฝังดิน ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง

ข้อมูลสายเคเบิล จากคู่มือของ THAI YAZAKI

- เป็นสายเคเบิลแบบ XLPE แบบมี shield เบอร์ 150
- ระดับแรงดันที่ใช้ (E) = 2400 Volts
- ตัวนำและ shield เป็นทองแดง
- ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20C° (Rdc) = 0.124 Ω/km
- diameter ของตัวนำ (Dc) = 14.6 m.m. = 0.574802 นิ้ว
- diameter ของ Jacket (Dj) = 34 m.m. = 1.33858 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (T) = 5.5 m.m. = 0.216535 นิ้ว
- ความหนาของ Jacket (tj) = 2.0 m.m. = 0.07874 นิ้ว
- อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ (Tc) = 90C°
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (Ta) = 30C°
- ความถี่ที่ใช้ (f) = 50 Hz
- โครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 ts &= 0.12 tj &= 0.12 \times 0.07874 &= 0.0094488 \text{ นิ้ว} \\
 Di &= Dc + 2T &= 0.574802 + 2(0.216535) &= 1.007872 \text{ นิ้ว} \\
 Ds &= Di + 2ts &= 1.007872 + 2(0.0094488) &= 1.0267696 \text{ นิ้ว} \\
 Dsm &= Ds - ts &= 1.0267696 - 0.0094488 &= 1.0171432 \text{ นิ้ว} \\
 Rdc \text{ ที่อุณหภูมิ } 90C^\circ &= Rdc \text{ ที่อุณหภูมิ } 20C^\circ \frac{[234.5 + Tc]}{[234.5 + 20^\circ]} [1000] \\
 &= \frac{0.124[234.5 + 90^\circ]}{[234.5 + 20^\circ]} [1000] \\
 &= 3.28084
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 48.190735 \text{ microhm per foot}$$

จากโครงสร้างของสายเป็นแบบ concentric round จากตารางที่ 5.2

$$\text{จะได้ } K_s = 1, \quad K_p = 0.8$$

$$\frac{R_{dc}}{K_s} = \frac{48.190735}{1} = 48.190735 \text{ นำไปดูกราฟจาก รูปที่ 5.1}$$

$$K_p = 0.8$$

$$\text{จะได้ } F(x_s) = 0.005224 \text{ ซึ่งจะเท่ากับ } Y_{cs}$$

$$\frac{R_{dc}}{K_p} = \frac{48.190735}{0.8} = 60.23841875 \text{ ไปดูกราฟจากรูปที่ 5.1 จะได้ } F(X'p) = 0.003679$$

$$K_p = 0.8$$

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) = 0.574802 + 2(0.216535 + 0.005224) = 1.018319$$

$$Y_{cp} = \frac{2(D_c)^2 F(X'p)}{S^2} = \frac{2(0.574802)^2 (0.003679)}{(1.018319)^2} = 0.002344383$$

$$1 + Y_c = 1 + Y_{cs} + Y_{cp} = 1 + 0.005224 + 0.002344383 = 1.001724$$

$$E_{L-N} = \frac{E_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13.85640646 \text{ Volt}$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log \frac{D_i}{D_c}$$

$$\text{ค่า } \bar{\rho}_i \text{ ของ XLPE} = 390 \text{ C}^\circ \text{ cm/watt}$$

$$\bar{R}_i = \frac{0.012 \times 390 \times \log [1.007872]}{0.574802}$$

$$= 1.141391673 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times \epsilon_r \times (\text{pf}) \times E^2}{\log \frac{2T + D_c}{D_c}}$$

$$\log \frac{2T + D_c}{D_c}$$

$$D_c$$

$$\text{จาก ตาราง 5.5 ค่า } \epsilon_r \text{ ของ polyethylene} = 2.3$$

$$\text{ค่า pf ของฉนวน} = 0.005$$

$$W_d = \frac{0.00276 \times 2.3 \times 0.005 \times (13.85640646)^2}{\log [2(0.216535) + 0.574802]}$$

$$\log [2(0.216535) + 0.574802]$$

$$0.574802$$

$$= 0.024987298 \text{ watt per conductor}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_j \times t_j \times n'}{(D_j - t_j)}$$

$$n' \text{ คือจำนวนตัวนำในระบบ} = 3$$

$$\text{ค่า thermal resistivity ของ Jacket} = 360 \text{ } ^\circ\text{C cm/watt}$$

$$\bar{R}_j = \frac{0.0104 \times 360 \times 0.07874 \times 3}{(1.33858 - 0.07874)} = 0.702 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$R_s = \frac{\bar{\rho}_s \times (234.5 + 50)}{4D_{smts} \times (234.5 + 20)}$$

จากตาราง 5.1 ค่า electrical resistivity ของทองแดง = 10.371 circular mil ohm per foot

$$R_s = \frac{10.371 \times (234.5 + 50)}{4 \times 1.0171432 \times 0.0094488 \times (234.5 + 20)} = 301.5 \text{ } \mu\Omega/\text{foot}$$

$$s = 1.155T + 0.58D_c = 1.155(0.216535) + 0.58(0.574802) = 0.583483$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อเป็นสายแกนเดี่ยว 3 เส้น } Y_{se} = Y_s &= \frac{3(2sf)^2}{R_s R_{dc} (5.2 D_{sm})^2} \\ &= \frac{3(2 \times 0.583483 \times 50)^2}{(301.5)(48.190735)(5.2 \times 1.0171432)^2} \\ &= 0.025127883 \end{aligned}$$

$$q_s = 1 + \frac{Y_s}{1 + Y_c} = 1 + \frac{0.025127883}{1.007568} = 1.024939143$$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'A'}{D's + B'}$$

$$D's = 2.15 D_i = 2.15 \times 1.007878 = 2.1669377 \text{ นิ้ว}$$

จาก ตาราง 5.7 เมื่อท่อเป็นแบบอลูมิเนียมจะได้ค่า $A' = 5.6$ ค่า $B' = 0.33$

$$\bar{R}_{sd} = \frac{3 \times 5.6}{2.1669377 + 0.33} = 6.72829 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_d = \frac{0.0104 \times \bar{\rho}_d \times n'}{(D_d - t_d)}$$

$$D_d = \text{outside diameter ของท่อ} = 5.563 \text{ นิ้ว}$$

$$t_d = \text{ความหนาของท่อ} = 0.245 \text{ นิ้ว}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า thermal resistivity ของท่อโลหะ = 30

$$\bar{R}_d = 0.0104 \times 30 \times 3 \times \frac{(0.429133)}{(5.5118 - 0.429133)} = 0.948325329 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\bar{R}_{e'} = 0.012 \bar{\rho}_{en'} \left[\log \frac{8.3}{D_e} + (LF) \log \frac{4LF}{8.3} \right]$$

$$F = 1$$

ค่า thermal resistance ของดิน = 30

$$D_e = D_d = \text{Outside diameter ของท่อ} = 5.563 \text{ นิ้ว}$$

$$L \text{ (ความลึกของการฝังดิน)} = 36 \text{ นิ้ว}$$

$$\bar{R}_{e'} = 0.012 \times 30 \times 3 \times \left[\log \frac{8.3}{5.5118} + 0.8 \log \frac{4 \times 36 \times 1}{8.3} \right]$$

$$\bar{R}_{e'} = 1.262749135 \text{ thermal ohm-foot}$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{ca} &= \bar{R}_i + \bar{R}_j + q_s(\bar{R}_{sd} + \bar{R}_d) + q_e \bar{R}_{e'} \\ &= 1.141392 + 0.702 + 1.024(6.728 + 0.04983) + (1.032 \times 1.262) \\ &= 11.015 \text{ thermal ohm-foot} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_d &= W_d \frac{[\bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_{sd} + \bar{R}_d + \bar{R}_{e'}]}{2} \\ &= 0.024987 \frac{(1.141392 + 0.702 + 6.728 + 0.948 + 1.262)}{2} \\ &= 0.255 \text{ C}^\circ \end{aligned}$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c)R_{ca}}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = \sqrt{\frac{90 - (30 + 0.255)}{48.190735 \times (1.001724)(11.015)}} \times 1000 \text{ Amp.}$$

$$I = 334.2 \text{ Amp.}$$

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงได้พิกัดกระแส = 341.0 Amp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างทั้งหมดที่กล่าวมาในระดับแรงดันต่ำจะใช้สายเคเบิลขนาดเดียวกันหมดคือ 70 square mm. ทั้งนี้เพื่อต้องการเปรียบเทียบให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อนำไปใช้ในรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกันแล้ว จะมีผลต่อพิกัดกระของสายอย่างไร ตัวอย่างในระดับแรงดันปานกลางจนถึงแรงดันสูงก็เช่นกัน จะยกมาแสดงเพียงขนาดเดียวคือ ขนาด 150 square mm. สำหรับพิกัดกระแสของสายที่ขนาดอื่นๆ ทั้งระดับแรงดันต่ำและแรงดันปานกลางจนถึงสูง แสดงเอาไว้ในบทที่ 6



บทที่ 6

การประยุกต์ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณหาค่ากระแส

6.1 การใช้งานโปรแกรม (Program manual)

การใช้โปรแกรมการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิล เริ่มโดยการ โหลด (LOAD) ไฟล์ (FILE) ที่ชื่อ PROJECT ลงในคอมพิวเตอร์ หน้าจอคอมพิวเตอร์จะปรากฏเมนูหลัก (MAIN MENU) ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะของ MAIN MENU

จากเมนูหลัก (MAIN MENU) จะแบ่งออกเป็น 2 ระดับให้เลือกคำนวณคือ

1. ระดับแรงดันต่ำ (LOWVOLT)
2. ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง (MEDIUM to HIGHVOLT)

การเลือกที่จะเข้าสู่เมนูย่อยต่างๆทำได้โดยกดคีย์ลูกศร ขึ้น-ลง ให้แถบแสงเลื่อนตามแล้วกดคีย์ ENTER เพื่อเข้าสู่ส่วนโปรแกรมย่อย (SUB MENU) ต่อไป และเมื่อกดคีย์ ESC จะเป็นการกลับเข้าสู่ DOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.1 ระดับแรงดันต่ำ (LOWVOLT)

จากเมนูหลัก เมื่อเลือกเข้าสู่เมนูย่อยของระดับแรงดันต่ำ ดังรูปที่ 6.2 จะสามารถเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณต่างๆโดยเลื่อนแถบแสงเหมือนกับเมนูหลัก



รูปที่ 6.2 แสดงเมนูย่อยของระดับแรงดันต่ำ

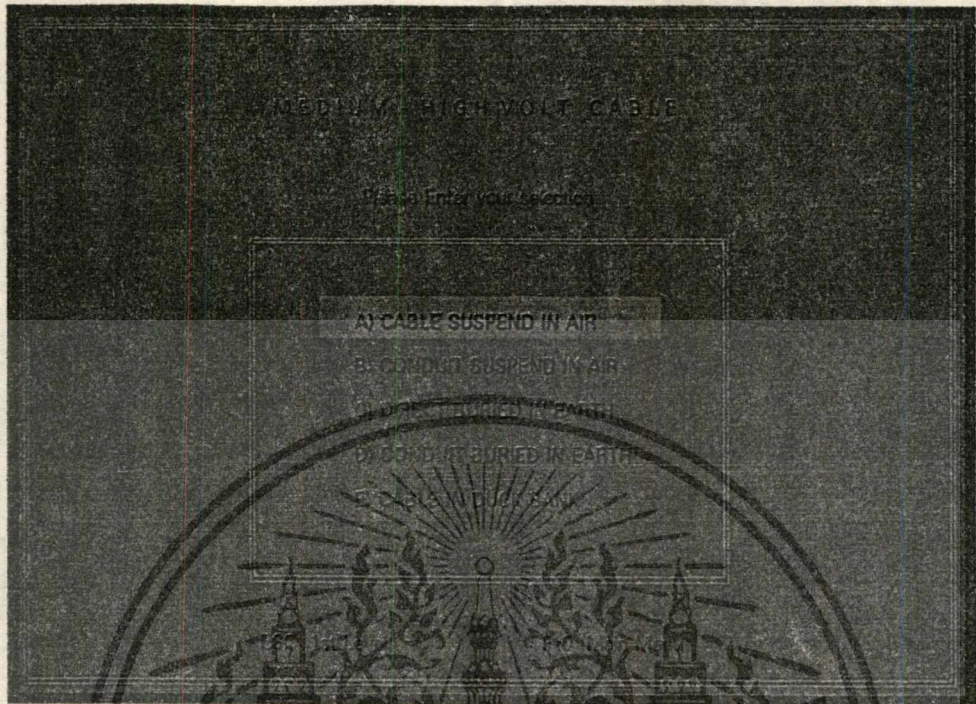
- กดคีย์ ESC เมื่อต้องการกลับไปสู่เมนูก่อนหน้านี้นั้นคือ เมนูหลัก
- กดคีย์ F10 เมื่อต้องการออกจากเมนูย่อยไปยังเมนูหลัก

6.1.2 ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง (MEDIUM to HIGHVOLT)

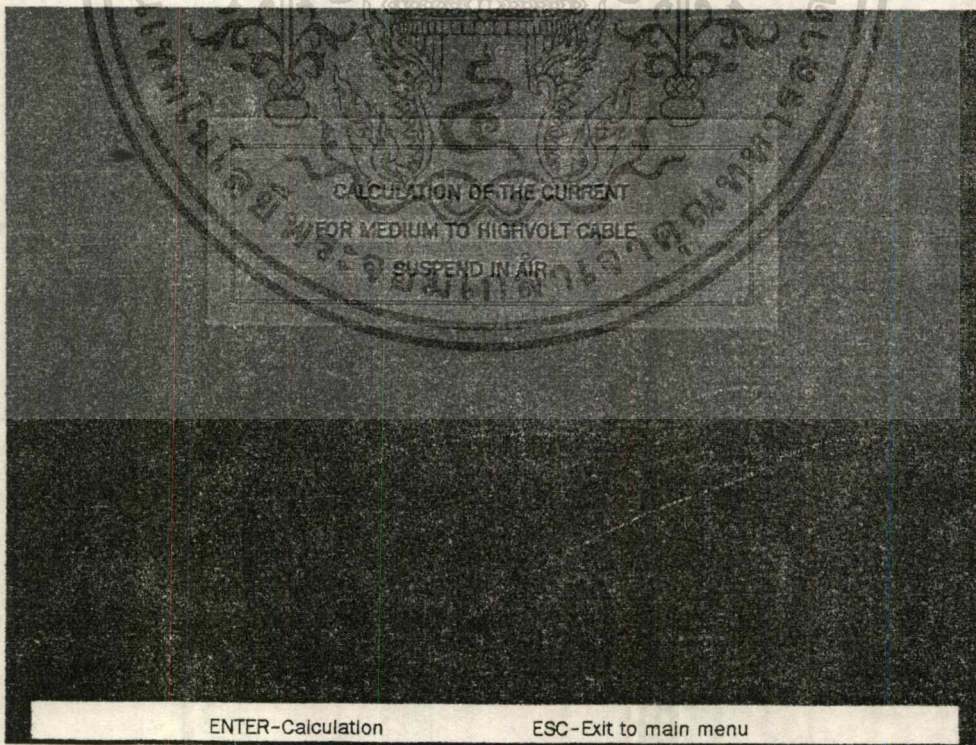
จากเมนูหลัก เมื่อเลือกเข้าสู่เมนูย่อยของระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง จอภาพจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 6.3 และสามารถเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณต่างๆโดยเลื่อนแถบแสงเหมือนกับเมนูหลัก

- กดคีย์ ESC เมื่อต้องการกลับไปสู่เมนูก่อนหน้านี้นั้นคือ เมนูหลัก
- กดคีย์ F10 เมื่อต้องการออกจากเมนูย่อยยังเมนูหลัก

จากรูปที่ 6.2 หรือ 6.3 เมื่อกดคีย์ ENTER ที่โปรแกรมใดโปรแกรมหนึ่ง จอภาพคอมพิวเตอร์จะปรากฏภาพโปรแกรมที่เลือก ดังเช่น ถ้าเลือกที่ระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง และเลือกใช้โปรแกรมคำนวณหากระแสที่ CABLE SUSPEND IN AIR ผู้ใช้ก็จะพบภาพดังรูปที่ 6.4 เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



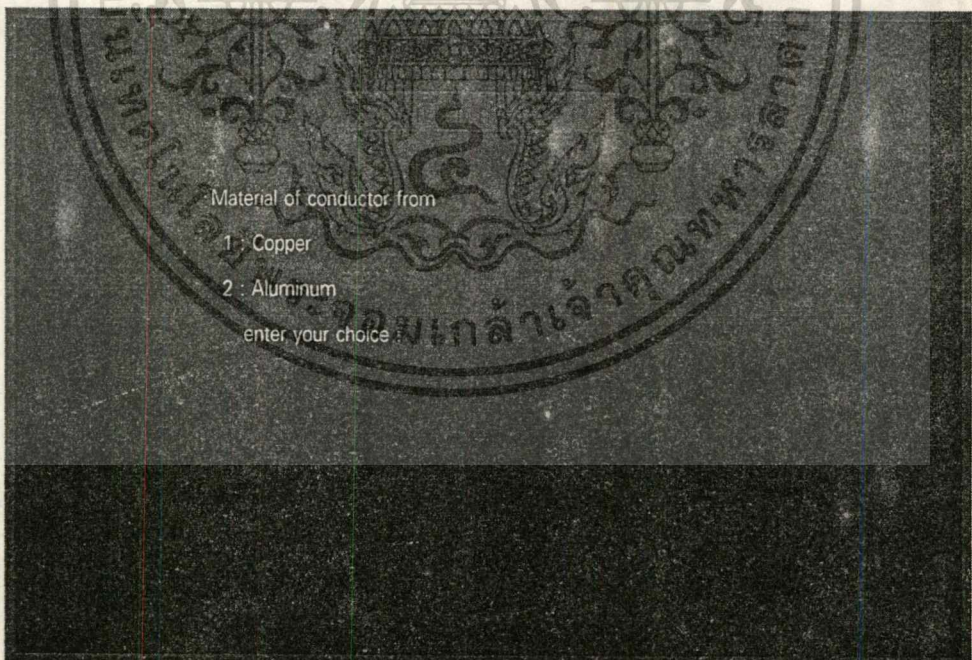
รูปที่ 6.3 แสดงเมนูย่อยของระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง



รูปที่ 6.4 โปรแกรมการคำนวณ

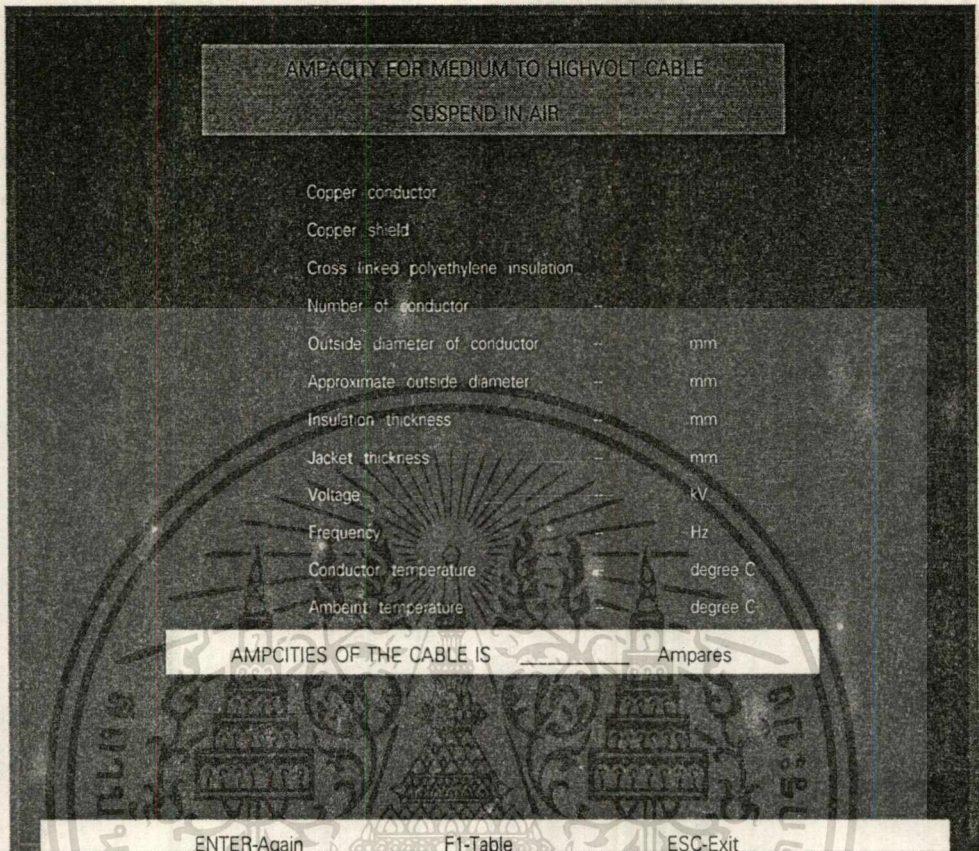
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.4 เมื่อกดคีย์ ENTER จะเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณ และเมื่อกดคีย์ ESC จะกลับไป MAIN MENU ดังรูปที่ 6.1 เพื่อใช้งานโปรแกรมอื่นต่อไป ในการคำนวณจะต้องป้อน INPUT DATA ตามลำดับที่ละตัวดังรูปที่ 6.5 โดยโปรแกรมจะเริ่มต้นถามชนิดของตัวนำก่อน และจะต้องกดเฉพาะคีย์ที่เป็นตัวเลขจำนวนเต็มเท่านั้น เพราะโปรแกรมไม่อาจจะรับข้อมูลที่เป็นตัวอักษรเข้าไปทำการคำนวณได้ และจะส่งผลทำให้โปรแกรมเกิดการผิดพลาดขึ้นได้ เมื่อเลือกชนิดของตัวนำแล้วต่อไปโปรแกรมจะถามข้อมูลของสายเคเบิล ซึ่งผู้ใช้โปรแกรมจะต้องมีคู่มือสายเคเบิลของบริษัทผลิตสายเคเบิลบริษัทใดก็ได้ (ในการเปรียบเทียบค่ากระแสกับกฟน. ทางกลุ่มได้ใช้ข้อมูลสายเคเบิลของ บริษัทไทยยธาภิ เป็นข้อมูลอ้างอิง) เมื่อป้อนข้อมูลหมดโปรแกรมจะแสดงเอาท์พุทออกมาทางจอภาพโดยทันทีดังรูปที่ 6.6 และสามารถที่จะเลือกทำการคำนวณอีกครั้งโดยการกดคีย์ ENTER หรือจะดูตารางเปรียบเทียบค่ากระแสโดยการกดคีย์ F1 หรือจะออกจากโปรแกรมโดยการกดคีย์ ESC เพื่อกลับไปยัง MAIN MENU ในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะของ INPUT DATA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะของเอาต์พุต

จากรูปที่ 6.6 เมื่อกดคีย์ ENTER จะเป็นการคำนวณหาอีกครั้งและสามารถคำนวณหาต่อไปได้อีกตามความต้องการของผู้ใช้ ถ้าต้องการที่จะออกจากโปรแกรมทำได้โดยกดคีย์ ESC เมื่อต้องการคำนวณต่อโปรแกรมก็จะทำการเก็บค่ากระแสเอาต์พุตไว้เมื่อมีการคำนวณหลายๆครั้ง และถ้ากดคีย์ F1 โปรแกรมจะแสดงค่ากระแสออกมาเป็นตารางดังรูปที่ 6.7 โดยแสดงค่ากระแสทุกค่าที่ทำการคำนวณไปแล้ว พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่ากระแสของกฟน.ด้วย (ในกรณีนอกเหนือจากรูปแบบการติดตั้งของ กฟน. ซึ่งไม่มีพิกัดกระแสกำหนดเอาไว้ ตรงช่องค่ากระแสของกฟน.จะแสดงค่าออกมาเป็นศูนย์) และจะแสดงขนาดของสายเคเบิลออกมาด้วย

จากรูปที่ 6.7 เมื่อกดคีย์ ENTER จะเป็นการคำนวณเพิ่มอีกเหมือนกันกับตอนที่ทำต่อจากเอาต์พุต และเมื่อกดคีย์ F2 โปรแกรมจะทำการลบข้อมูลเอาต์พุตทั้งหมดแล้วกลับไปเริ่มต้นคำนวณใหม่ดังรูปที่ 6.4 แต่ถ้าต้องการออกจากโปรแกรมการคำนวณ และกลับไปยัง MAIN MENU ทำได้โดยกดคีย์ ESC เพื่อที่จะได้เลือกใช้งานโปรแกรมอื่นๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMPACITY of COPPER CABLE ,Insulation,Shield at ____ kV

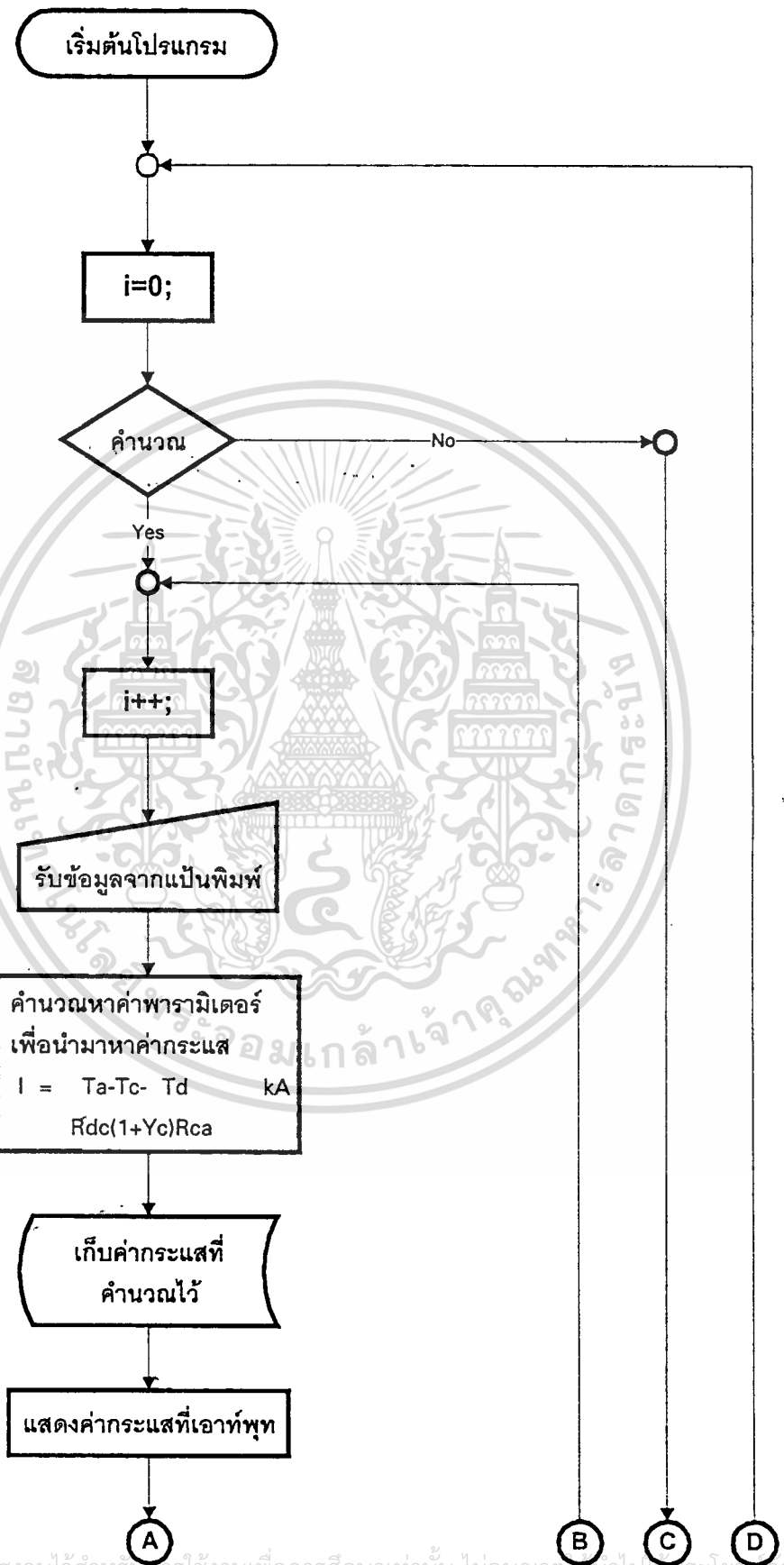
CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY (Ampares)	
	MEA.	PROGRAM
---	---	---
---	---	---
---	---	---
---	---	---

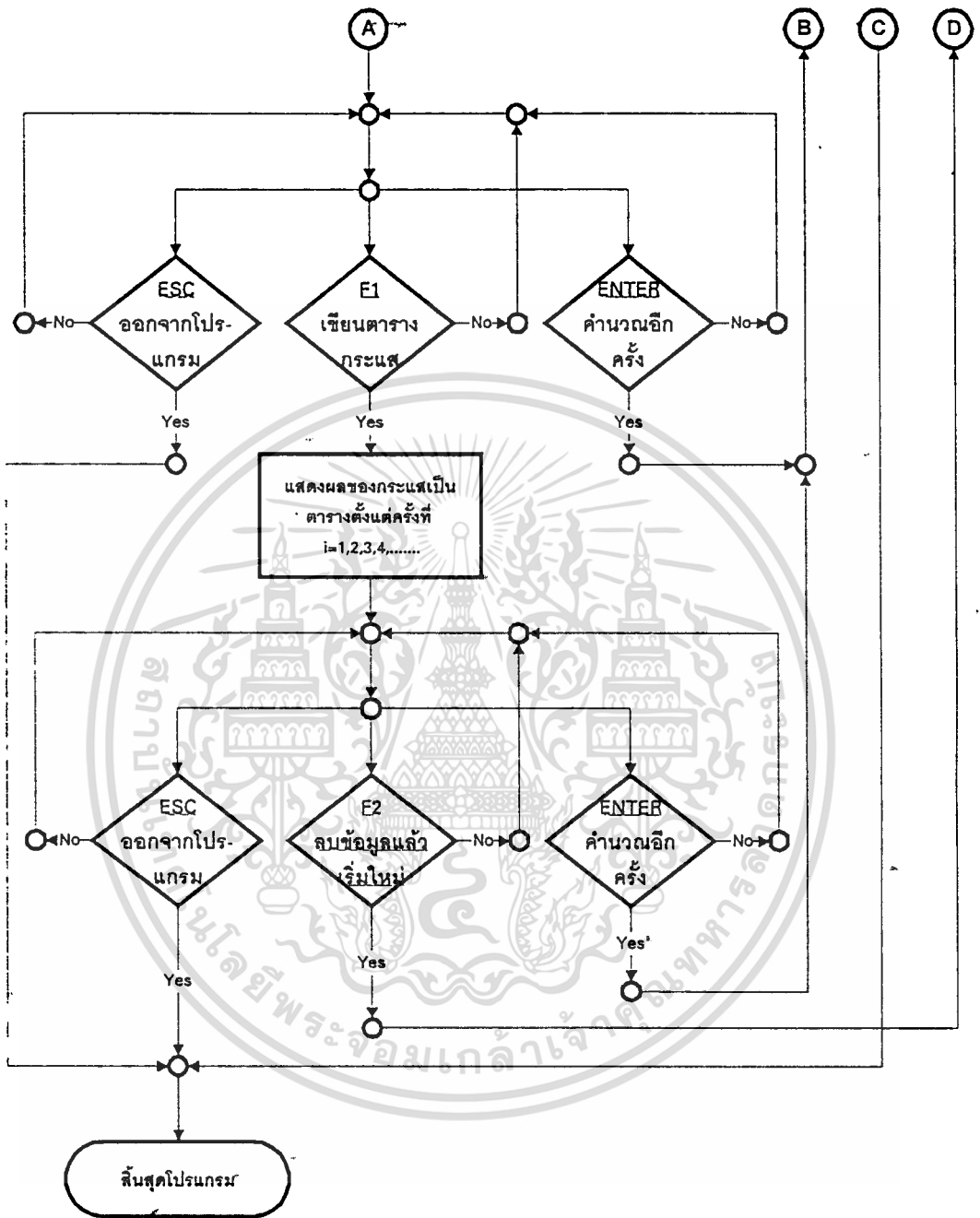
ENTER- Calculation again F2-Clear and Return ESC-Exit

รูปที่ 6.7 แสดงตารางเปรียบเทียบกระแสกับกัปน.

6.2 โฟลว์ชาร์จไดอะแกรมของโปรแกรมการคำนวณ (Flowchart diagram)

จากที่ได้ทำการศึกษาวิธีใช้โปรแกรมการคำนวณมาแล้ว เราสามารถนำมาเขียนเป็น flowchart แสดงระบบการคำนวณของแต่ละโปรแกรม ซึ่งโฟลว์ชาร์จนี้จะช่วยให้เข้าใจในระบบการคำนวณของโปรแกรมได้ง่ายยิ่งขึ้น โฟลว์ชาร์จการคำนวณของโปรแกรม แสดงดังรูปที่6.8





รูปที่ 6.8 แสดงโฟลว์ชาร์ตการคำนวณของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลการคำนวณหาค่ากระแสในสายเคเบิล

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
2.5	36	44.2
4.0	47	57.4
6.0	60	71.5
10.0	82	94.7
16.0	110	122.9
25.0	148	161.5
35.0	184	193.0
50.0	224	230.7
70.0	286	284.5
95.0	356	348.4
120.0	417	399.2
150.0	481	455.3
185.0	559	519.6
240.0	672	613.2
300.0	782	696.7
400.0	921	807.2

“LOWVOLT”
สายแกนเดี่ยวดินลอย
ในอากาศ
ที่อุณหภูมิ 40°C

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
2.5	25	23.1
4.0	33	31.1
6.0	42	39.2
10.0	56	52.8
16.0	76	71.5
25.0	100	94.7
35.0	123	118.4
50.0	153	143.7
70.0	191	185.9
95.0	239	233.6
120.0	275	270.8
150.0	322	318.0
185.0	368	366.6
240.0	440	442.8
300.0	510	507.0
400.0	604	598.2

“LOWVOLT”
สายแกนเดี่ยว 3 เส้นดิน
ในท่อโลหะลอยในอากาศ
ที่อุณหภูมิ 40°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
2.5	31	28.3
4.0	41	37.7
6.0	52	47.9
10.0	70	65.0
16.0	93	87.2
25.0	123	116.9
35.0	151	145.7
50.0	184	179.0
70.0	230	228.6
95.0	285	283.9
120.0	329	331.6
150.0	380	383.2
185.0	436	444.4
240.0	518	531.2
300.0	615	610.5
400.0	734	711.8

“LOWVOLT”
สายแกนเดี่ยว 3 เส้นดิน
ในท่อโลหะฝังดิน
ที่อุณหภูมิ 30°C

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
2.5	28	24.7
4.0	36	32.6
6.0	46	41.4
10.0	61	55.4
16.0	81	73.5
25.0	107	97.6
35.0	130	120.9
50.0	156	147.7
70.0	197	187.2
95.0	241	231.3
120.0	277	269.3
150.0	318	309.8
185.0	368	358.5
240.0	430	428.0
300.0	501	491.5
400.0	586	569.6

“LOWVOLT”
สายแกนเดี่ยว 3 เส้นดิน
ในท่อโลหะฝังดิน
ที่อุณหภูมิ 30°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
2.5	44	42.6
4.0	57	55.4
6.0	71	69.0
10.0	94	91.4
16.0	122	118.5
25.0	156	154.8
35.0	187	184.7
50.0	221	219.5
70.0	270	268.8
95.0	325	324.0
120.0	368	368.4
150.0	413	414.5
185.0	466	468.6
240.0	539	543.8
300.0	607	610.8
400.0	687	694.3

“LOWVOLT”
สายแกนเดี่ยวไม่เกิน 3 เส้น
หรือสายไม่เกิน 3 แกน
ฝังดินโดยตรง
ที่อุณหภูมิ 30°C

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
35.0	148	147.6
50.0	175	176.1
70.0	215	217.5
95.0	265	267.1
120.0	303	305.3
150.0	348	344.3
185.0	396	401.8
240.0	478	469.3
300.0	551	530.1
400.0	636	615.8

“HIGHVOLT”
สายแกนเดี่ยว 3 เส้นเดิน
ในท่อโลหะลอยในอากาศ
ที่อุณหภูมิ 40°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
35.0	176	172.6
50.0	209	206.8
70.0	258	256.6
95.0	315	313.0
120.0	361	359.0
150.0	413	406.1
185.0	469	465.5
240.0	563	545.8
300.0	650	618.8
400.0	751	709.3

“HIGHVOLT”
สายแกนเดี่ยว 3 เส้นดิน
ในท่อโลหะฝังดิน
ที่อุณหภูมิ 30°C

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
35.0	149	143.2
50.0	178	171.8
70.0	218	212.4
95.0	265	257.4
120.0	303	294.6
150.0	341	334.2
185.0	386	379.6
240.0	454	443.7
300.0	521	504.3
400.0	607	571.9

“HIGHVOLT”
สายแกนเดี่ยว 3 เส้นดิน
ในท่อโลหะฝังดิน
ที่อุณหภูมิ 30°C

CABLE SIZE (square mm)	AMPACITY(Ampares)	
	MEA	PROGRAM
35.0	209	210.9
50.0	247	249.9
70.0	302	305.8
95.0	361	367.4
120.0	410	417.7
150.0	460	467.9
185.0	519	527.9
240.0	601	610.7
300.0	679	687.7
400.0	772	776.4

“HIGHVOLT”
สายแกนเดี่ยว 1 วงจร
ฝังดินโดยตรง
ที่อุณหภูมิ 30°C

6.4 บทสรุปและวิจารณ์

ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ยึดหลักของ AIEE Trans. Powere App. Syst. ปีค.ศ.1957 ที่ชื่อ “The calculation of the temperature rise and load capability of cable system” เขียนและเรียบเรียงโดย J. H. NEHER และ M. H. McGRATH เป็นทฤษฎีที่มีการนำมาพัฒนาและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหมู่วิศวกร ดังจะเห็นได้ว่า NEC (National Electric Code) ก็ได้นำเอาทฤษฎีนี้บรรจุไว้เป็นมาตรฐานในการคำนวณหาค่ากระแสของสายเคเบิล

ในส่วนของตัวโปรแกรมนั้น ได้เขียนขึ้นจากภาษาซีซึ่งมีความเหมาะสมกับโปรแกรมที่มีการคำนวณยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งได้มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการเขียนโปรแกรม เนื่องจากผู้จัดทำยังขาดทักษะที่ดีในการเขียนโปรแกรม จึงทำให้โปรแกรมบางส่วนยังคงมีจุดบกพร่องอยู่บ้าง จึงควรได้รับการพัฒนาต่อไปในภายหน้า เพื่อความสมบูรณ์ในทุกส่วนของโปรแกรมให้มากยิ่งขึ้น

จากเนื้อหาในบทต้นๆที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าโปรแกรมการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลเป็นโปรแกรมที่ช่วยลดภาระของวิศวกรในการพิจารณาหาขนาดของสายเคเบิล ให้เหมาะสมกับพิกัดกระแสของโหลด ช่วยลดเวลาในการคำนวณ แต่โปรแกรมการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลนี้ยังคงต้องพึ่งพาวิศวกรอยู่มาก คือ ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องเป็นผู้ที่มีความรู้ในด้านวิศวกรรมพอสมควร โดยเฉพาะข้อมูลของสายเคเบิลจะต้องป้อนให้ถูกต้องจากคู่มือสายเคเบิลของบริษัทผู้ผลิต และเป็นขนาดสายที่ผู้ใช้โปรแกรมต้องการใช้เท่านั้น ซึ่งถ้านำเอาข้อมูลของสายที่มีอยู่ป้อนลงโปรแกรม แต่ไม่ได้ใช้สายนั้นจริงแล้วเอาสายอื่นที่ข้อมูลไม่ตรงกันก็จะทำให้ได้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสนี้ไม่ถูกต้องไปใช้งาน และอาจเป็นอันตรายต่อสายเคเบิลนั้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้อง
ใช้สายที่มีข้อมูลเป็นชุดเดียวกัน จึงจะได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับความเป็นจริงมากที่สุด และเนื่อง
จากโปรแกรมการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิล ไม่มีฐานข้อมูลเพียงพอในการให้ข้อมูล
ทั้งหมดของการคำนวณได้ จึงจำเป็นต้องพึ่งพาความสามารถของผู้ใช้โปรแกรมประกอบด้วย

สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ จะไม่สมบูรณ์ขึ้นมาได้ถ้าขาดความเอาใจใส่ของอาจารย์ที่
ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในด้านของข้อมูลและคำปรึกษา ส่งผลให้ปริญญาโทเสร็จลุล่วงไปด้วยดี
แต่อย่างไรก็ตามยังมีจุดบกพร่องอยู่บ้าง ดังนั้นจึงควรได้รับการพัฒนาต่อไปสำหรับผู้สนใจศึกษา
ปริญญาโทฉบับนี้ แนวทางที่จะพัฒนานั้นมีมากพอสมควร ดังเช่น การทำให้โปรแกรม
สามารถที่จะหาค่ากระแสของสายเคเบิลที่วางอยู่ร่วมกันหลายเส้นแต่มีขนาดสายต่างกัน หรือ หา
ค่ากระแสของสายเคเบิลที่วางอยู่บนเคเบิลเทรย์(cable trays) และอื่นๆ ในกรณีสายเคเบิลเป็นชนิด
แรงดันสูงพิเศษ วิธีการคำนวณจะต้องมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

ภาคผนวก

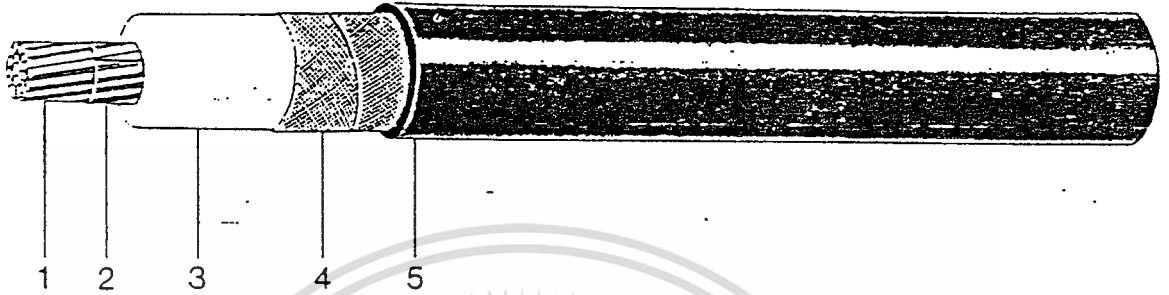


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.6/1 KV CV

IEC 502

XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
SINGLE-CORE



REFERENCES

- 1. Copper Conductor
- 2. Separator Tape
- 3. XLPE Insulation
- 4. Separator Tape
- 5. PVC Jacket

APPLICATION

For general purpose power distribution in wet or dry locations, installed in air, in conduit or duct, or directly buried.

No. of Cores	Conductor			Nominal Thickness		Approx. OD mm
	Size mm ²	Strands	Approx. OD mm	Insulation mm	Jacket mm	
1	2.5	7/0.67	2.0	0.7	1.4	7.0
	4	7/0.85	2.6	0.7	1.4	7.5
	6	7/1.04	3.1	0.7	1.4	8.0
	10	7	3.8	0.7	1.4	8.6
	16	7	4.8	0.7	1.4	9.6
	25	7	6.0	0.7	1.4	11.5
	35	7	7.0	0.9	1.4	12.5
	50	19	8.3	1.0	1.4	14.0
	70	19	9.9	1.1	1.4	15.5
	95	19	11.7	1.1	1.5	18.0
	120	37	13.2	1.2	1.5	19.5
	150	37	14.6	1.4	1.6	22
	185	37	16.3	1.6	1.6	24
	240	61	18.7	1.7	1.7	27
	300	61	20.9	1.8	1.8	29
400	61	23.6	2.0	1.9	33	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data subject to change without notice.

XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE SINGLE-CORE

CONSTRUCTION

- Conductor . : Stranded copper
- Insulation : Cross-linked polyethylene [XLPE]
- Jacket . . . : Polyvinyl chloride [PVC]

FEATURES

Provides excellent thermal and physical properties, outstanding resistance to moisture and chemicals.

CONDUCTOR TEMPERATURE: 90°C

No. of Cores	Conductor		Test Voltage kV	Approx. Net Weight kg/km
	Size mm ²	Resistance at 20°C Maximum Ω/km		
1	2.5	7.41	3.5	65
	4	4.61	3.5	80
	6	3.08	3.5	100
	10	1.83	3.5	140
	16	1.15	3.5	200
	25	0.727	3.5	300
	35	0.524	3.5	400
	50	0.387	3.5	500
	70	0.268	3.5	750
	95	0.193	3.5	1000
	120	0.153	3.5	1200
	150	0.124	3.5	1500
	185	0.0991	3.5	1900
	240	0.0754	3.5	2500
	300	0.0601	3.5	3100
400	0.0470	3.5	3900	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ
Data subject to change without notice. โปรดแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
3-CORE.



REFERENCES

- 1. Copper Conductor
- 2. Circuit Identification Tape
- 3. Separator Tape
- 4. XLPE Insulation
- 5. Fillers
- 6. Binding Tape
- 7. PVC Jacket

APPLICATION

For general purpose power distribution in wet or dry locations, installed in air, in conduit or duct, or directly buried.

No. of Cores	Conductor			Nominal Thickness		Approx. OD mm
	Size mm ²	Strands	Approx. OD mm	Insulation mm	Jacket mm	
	3	2.5	7/0.67	2.0	0.7	
	4	7/0.85	2.6	0.7	1.8	13.5
	6	7/1.04	3.1	0.7	1.8	14.5
	10	7	3.8	0.7	1.8	16.0
	16	7	4.8	0.7	1.8	18.0
	25	7	6.0	0.9	1.8	22
	35	7	7.0	0.9	1.8	24
	50	19	8.3	1.0	1.8	27
	70	19	9.9	1.1	1.9	31
	95	19	11.7	1.1	2.0	35
	120	37	13.2	1.2	2.1	39
	150	37	14.6	1.4	2.3	44
	185	37	16.3	1.6	2.4	49
	240	61	18.7	1.7	2.6	55
	300	61	20.9	1.8	2.8	60
	400	61	23.6	2.0	3.1	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้ใช้บวาระอื่นที่นอกเหนือจากนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลข้างต้นโดยผู้รับเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data subject to change without notice.

**XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
3-CORE**

CONSTRUCTION

Conductor : Stranded copper
 Insulation : Cross-linked polyethylene [XLPE]
 Jacket : Polyvinyl chloride [PVC]

FEATURES

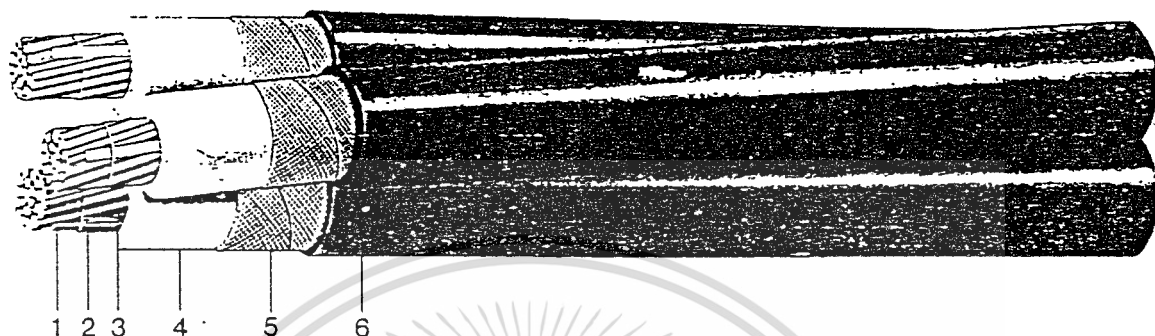
Provides excellent thermal and physical properties, outstanding resistance to moisture and chemicals.

CONDUCTOR TEMPERATURE: 90°C

No. of Cores	Conductor		Test Voltage kV	Approx. Net Weight kg/km
	Size mm ²	Resistance at 20°C Maximum Ω /km		
3	2.5	7.41	3.5	190
	4	4.61	3.5	250
	6	3.08	3.5	320
	10	1.83	3.5	440
	16	1.15	3.5	650
	25	0.727	3.5	950
	35	0.524	3.5	1300
	50	0.387	3.5	1700
	70	0.268	3.5	2300
	95	0.193	3.5	3100
	120	0.153	3.5	3900
	150	0.124	3.5	4900
	185	0.0991	3.5	6000
	240	0.0754	3.5	8000
	300	0.0601	3.5	9500
	400	0.0470	3.5	12500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 Data subject to change without notice.

XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
TRIPLEX TYPE

REFERENCES

1. Conductor
2. Circuit Identification Tape
3. Separator Tape
4. XLPE Insulation
5. Separator Tape
6. PVC Jacket

APPLICATION

For general purpose power distribution in wet or dry locations, installed in air, in conduit or duct, or directly buried.

No. of Cores	Conductor			Insulation Nominal Thickness mm	Jacket		Approx. OD mm
	Size mm ²	Strands	Approx. OD mm		Nominal Thickness mm	Approx. OD mm	
3	2.5	7/0.67	2.0	0.7	1.4	6.5	14.5
	4	7/0.85	2.6	0.7	1.4	7.0	15.5
	6	7/1.04	3.1	0.7	1.4	7.5	16.5
	10	7	3.8	0.7	1.4	8.1	18.0
	16	7	4.8	0.7	1.4	9.1	20
	25	7	6.0	0.9	1.4	11.0	24
	35	7	7.0	0.9	1.4	12.0	26
	50	19	8.3	1.0	1.4	13.5	29
	70	19	9.9	1.1	1.4	15.0	33
	95	19	11.7	1.1	1.5	17.5	38
	120	37	13.2	1.2	1.5	19.0	41
	150	37	14.6	1.4	1.6	21	46
	185	37	16.3	1.6	1.6	23	51
	240	61	18.7	1.7	1.7	26	57
	300	61	20.9	1.8	1.8	29	62
	400	61	23.6	2.0	1.9	32	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data subject to change without notices.

0.6/1 KV CVT

IEC 502

**XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
TRIPLEX TYPE.**

CONSTRUCTION

- Conductor : Stranded copper
- Insulation : Cross-linked polyethylene [XLPE]
- Jacket : Polyvinyl chloride [PVC]

FEATURES

Provides excellent thermal and physical properties, outstanding resistance to moisture and chemicals.

CONDUCTOR TEMPERATURE: 90°C

No. of Cores	Conductor		Test Voltage kV	Approx. Net Weight kg/km
	Size mm ²	Resistance at 20°C Maximum Ω/km		
3	2.5	7.41	3.5	190
	4	4.61	3.5	240
	6	3.08	3.5	310
	10	1.83	3.5	430
	16	1.15	3.5	600
	25	0.727	3.5	900
	35	0.524	3.5	1200
	50	0.387	3.5	1600
	70	0.268	3.5	2200
	95	0.193	3.5	3000
	120	0.153	3.5	3800
	150	0.124	3.5	4600
	185	0.0991	3.5	5500
	240	0.0754	3.5	7500
	300	0.0601	3.5	9000*

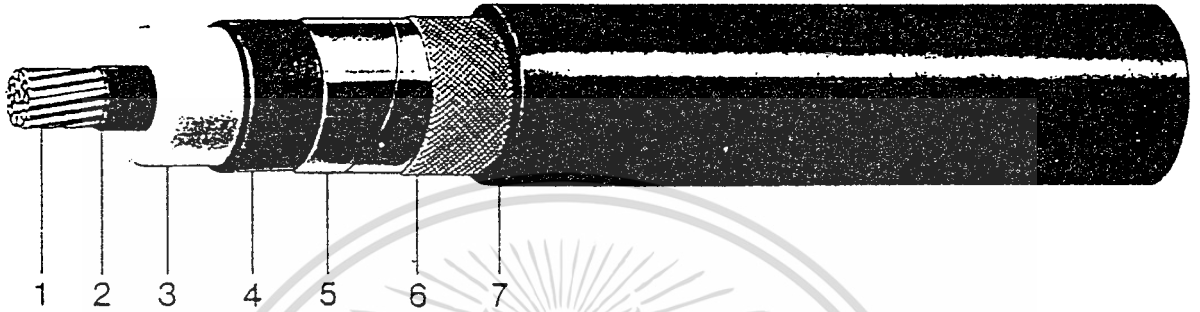
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ออกพิมพ์ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
Data subject to change without notice.

12/20(24) KV CV

IEC 502

XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
SINGLE-CORE



REFERENCES

- | | |
|--|-----------------------|
| 1. Conductor | 5. Copper Shield Tape |
| 2. Extruded Conductor Shield | 6. Separator Tape |
| 3. XLPE Insulation | 7. PVC Jacket |
| 4. Extruded Insulation Shield
(Free Stripping Type) | |

APPLICATION

For general purpose power distribution and transmission in wet or dry locations, installed in air, in conduit or duct, or directly buried.

No. of Cores	Conductor			Nominal Thickness		Approx. OD mm
	Size mm ²	No. of Strands	Approx. OD mm	Insulation mm	Jacket mm	
1	35	7	7.0	5.5	1.8	26
	50	19	8.3	5.5	1.8	27
	70	19	9.9	5.5	1.8	28
	95	19	11.7	5.5	1.9	31
	120	37	13.2	5.5	2.0	33
	150	37	14.6	5.5	2.0	34
	185	37	16.3	5.5	2.1	36
	240	61	18.7	5.5	2.1	38
	300	61	20.9	5.5	2.2	41
	400	61	23.6	5.5	2.3	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data subject to change without notice.

**XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
SINGLE-CORE**

CONSTRUCTION

Conductor	: Stranded copper	Insulation Shield	: Extruded semiconducting material
Conductor Shield	: Extruded semiconducting material	Metal Shield	: Helically applied copper tape
Insulation	: Cross-linked polyethylene [XLPE]	Jacket	: Polyvinyl chloride [PVC]

FEATURES

Provides excellent thermal and physical properties, outstanding chemical and moisture resistance, high dielectric and impulse strength, low power factor and SIC, high corona extinction voltages for long service life.

CONDUCTOR TEMPERATURE: 90°C

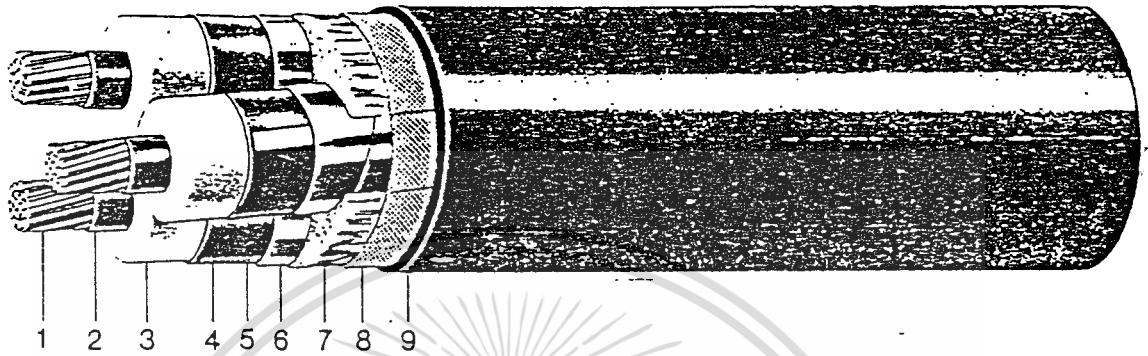
No. of Cores	Conductor		Test Voltage kV	Approx. Net Weight kg/km
	Size mm ²	Resistance at 20°C Maximum Ω/km		
1	35	0.524	30.0	850
	50	0.387	30.0	1000
	70	0.268	30.0	1300
	95	0.193	30.0	1600
	120	0.153	30.0	1900
	150	0.124	30.0	2200
	185	0.0991	30.0	2600
	240	0.0754	30.0	3200
	300	0.0601	30.0	3800
	400	0.0470	30.0	4700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับลูกค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข หรือทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากบริษัทฯ ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และขอสงวนข้อมูลไว้โดยไม่ต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data subject to change without notice.

**XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
3-CORE**


REFERENCES

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. Conductor | 5. Circuit Identification Tape |
| 2. Extruded Conductor Shield | 6. Copper Shield Tape |
| 3. XLPE Insulation | 7. Fillers |
| 4. Extruded Insulation Shield
(Free Stripping Type) | 8. Binding Tape |
| | 9. PVC Jacket |

APPLICATION

For general purpose power distribution and transmission in wet or dry locations, installed in air, in conduit or duct, or directly buried.

No. of Cores	Conductor			Nominal Thickness		Approx. OD mm
	Size	No. of Strands	Approx. OD	Insulation	Jacket	
	mm ²		mm	mm	mm	
3	35	7	7.0	5.5	2.7	52
	50	19	8.3	5.5	2.8	55
	70	19	9.9	5.5	2.9	59
	95	19	11.7	5.5	3.0	63
	120	37	13.2	5.5	3.1	67
	150	37	14.6	5.5	3.2	71
	185	37	16.3	5.5	3.3	75
	240	61	18.7	5.5	3.5	80
	300	61	20.9	5.5	3.7	85
	400	61	23.6	5.5	3.9	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก, แก้ไข, และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
Data subject to change without notice.

XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE 3-CORE

CONSTRUCTION

Conductor	: Stranded copper	Insulation Shield	: Extruded semiconducting material
Conductor Shield	: Extruded semiconducting material	Metal Shield	: Helically applied copper tape
Insulation	: Cross-linked polyethylene [XLPE]	Jacket	: Polyvinyl chloride [PVC]

FEATURES

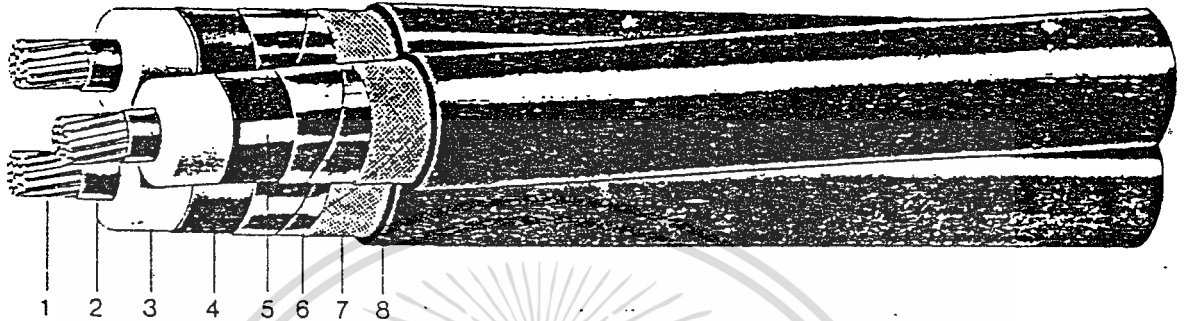
Provides excellent thermal and physical properties, outstanding chemical and moisture resistance, high dielectric and impulse strength, low power factor and SIC, high corona extinction voltages for long service life.

CONDUCTOR TEMPERATURE: 90°C

No. of Cores	Conductor		Test Voltage kV	Aprox. Net Weight kg/km
	Size mm ²	Resistance at 20°C Maximum Ω/km		
3	35	0.524	30.0	3000
	50	0.387	30.0	3500
	70	0.268	30.0	4300
	95	0.193	30.0	5500
	120	0.153	30.0	6500
	150	0.124	30.0	7500
	185	0.0991	30.0	8500
	240	0.0754	30.0	10500
	300	0.0601	30.0	12500
	400	0.0470	30.0	15500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลไปยังผู้อื่นโดยเด็ดขาด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
Data subject to change without notice.

XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
TRIPLEX TYPE



REFERENCES

- 1. Conductor
- 2. Extruded Conductor Shield
- 3. XLPE Insulation
- 4. Extruded Insulation Shield (Free Stripping Type)
- 5. Circuit Identification Tape
- 6. Copper Shield Tape
- 7. Separator Tape
- 8. PVC Jacket

APPLICATION

For general purpose power distribution and transmission in wet or dry locations, installed in air, in conduit or duct, or directly buried.

No. of Cores	Conductor			Insulation Nominal Thickness mm	Jacket		Approx. OD mm
	Size mm ²	No. of Strands	Approx. OD mm		Nominal Thickness mm	Approx. OD mm	
3	35	7	7.0	5.5	1.8	26	55
	50	19	8.3	5.5	1.8	27	58
	70	19	9.9	5.5	1.8	28	62
	95	19	11.7	5.5	1.9	31	66
	120	37	13.2	5.5	2.0	33	71
	150	37	14.6	5.5	2.0	34	74
	185	37	16.3	5.5	2.1	36	78
	240	61	18.7	5.5	2.1	38	83
	300	61	20.9	5.5	2.2	41	88
400	61	23.6	5.5	2.3	44	95	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการให้บริการใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงข้อมูลนี้ หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data subject to change without notice.

**XLPE INSULATED PVC JACKETED POWER CABLE
TRIPLEX TYPE**

CONSTRUCTION

Conductor	: Stranded copper	Insulation	: Extruded semiconducting material
Shield		Shield	
Conductor Shield	: Extruded semiconducting material	Metal Shield	: Helically applied copper tape
Insulation	: Cross-linked polyethylene [XLPE]	Jacket	: Polyvinyl chloride [PVC]

FEATURES

Provides excellent thermal and physical properties, outstanding chemical and moisture resistance, high dielectric and impulse strength, low power factor and SIC, high corona extinction voltages for long service life.

CONDUCTOR TEMPERATURE: 90°C

No. of Cores	Conductor		Test Voltage kV	Approx. Net Weight kg/km
	Size mm ²	Resistance at 20°C Maximum Ω/km		
3	35	0.524	30.0	2600
	50	0.387	30.0	3100
	70	0.268	30.0	3800
	95	0.193	30.0	4700
	120	0.153	30.0	5500
	150	0.124	30.0	6500
	185	0.0991	30.0	8000
	240	0.0754	30.0	9500
	300	0.0501	30.0	11500
	400	0.0470	30.0	14000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
Data subject to change without notice.

ตารางข้อมูลของท่อโกละ

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและความหนาของท่อที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

ชื่อขนาด	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก		ค่าเฉลี่ยความหนาของท่อ		ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	
	มิลลิเมตร	นิ้ว	มิลลิเมตร	นิ้ว	มิลลิเมตร	นิ้ว
15(3/8)	18±0.15	0.70866	1.5±0.15	0.059035	15.0	0.59055
18(1/2)	22±0.15	0.86614	1.8±0.20	0.070866	18.4	0.724408
20(3/4)	26±0.15	1.02362	2.1±0.20	0.082677	21.8	0.858266
25(1)	32±0.15	1.25984	2.6±0.20	0.102362	26.8	1.055116
35(1 1/4)	42±0.15	1.65354	3.4±0.25	0.133858	35.2	1.385824
40(1 1/2)	48±0.15	1.88976	3.8±0.25	0.149606	40.4	1.590548
55(2)	60±0.15	2.3622	4.7±0.30	0.185039	50.6	1.992122
65(2 1/2)	76±0.20	2.99212	6.0±0.40	0.23622	64.0	2.51968
80(3)	89±0.20	3.50393	7.0±0.40	0.27559	75.0	2.95275
100(4)	114±0.30	4.48818	8.9±0.50	0.350393	96.2	3.787394
125(5)	140±0.30	5.5118	10.9±0.60	0.429133	118.2	4.653534
150(6)	165±0.40	6.49605	12.8±0.70	0.503936	139.4	5.488178
200(8)	216±0.50	8.50392	16.7±0.90	0.657479	182.6	7.188962
240(10)	267±0.70	10.51179	20.6±1.10	0.811022	225.8	8.889746
300(12)	313±0.80	12.51966	24.5±1.25	0.964565	269.0	10.59053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONDUIT

ANSI C 80.1 (RIGID CONDUIT) HOT-DIP GALVANIZED RIGID STEEL CONDUIT

- Made to ANSI Specification C 80.1-1977
- Taper-threaded and Coupled to ANSI B2.1

Nominal Size	Nominal Inside Diameter		Outside Diameter		Nominal Wall Thickness		Length without Coupling		Minimum Weight of 10 Unit Lengths with Coupling Attached		Calculated Weight with Coupling Attached			Price (Baht)
	in	mm	in	mm	in	mm	ft-in	mm	lb	kg	lb/ft	kg/ft	kg/m	
1/2	0.632	16.0	0.840	21.34	0.104	2.64	9-11 1/4	3029	79.0	35.85	0.85	0.376	1.24	151
3/4	0.836	21.3	1.050	26.67	0.107	2.72	9-11 1/4	3029	105.0	47.63	1.10	0.499	1.64	194
1	1.063	27.0	1.315	33.40	0.126	3.20	9-11	3023	153.0	69.40	1.63	0.739	2.43	285
1 1/4	1.394	35.4	1.660	42.16	0.133	3.38	9-11	3023	201.0	91.17	2.21	1.00	3.29	358
1 1/2	1.624	41.3	1.900	48.26	0.138	3.51	9-11	3023	249.0	112.95	2.65	1.20	3.94	437
2	2.083	52.9	2.375	60.32	0.146	3.71	9-11	3023	332.0	150.60	3.54	1.61	5.27	585
2 1/2	2.489	63.2	2.875	73.02	0.193	4.90	9-10 1/2	3010	527.0	239.05	5.70	2.59	8.48	899
3	3.090	78.5	3.500	88.90	0.205	5.21	9-10 1/2	3010	682.6	309.63	7.42	3.37	11.0	1,155
3 1/2	3.570	90.7	4.000	101.6	0.215	5.46	9-10 1/4	3004	831.0	376.94	9.03	4.10	13.4	1,699
4	4.050	102.9	4.500	114.3	0.225	5.72	9-10 1/4	3004	972.3	441.04	10.56	4.79	15.7	2,453
5	5.073	128.9	5.563	141.3	0.245	6.22	9-10	2997	1313.6	595.85	14.36	6.51	21.4	3,100
6	6.093	154.8	6.625	168.3	0.266	6.76	9-10	2997	1745.3	791.67	18.79	8.52	28.0	-

- FEATURES :**
- Made of hot-rolled steel strip and hot-dip galvanized for maximum corrosion resistance.
 - Outside zinc surface coated with resin-base white rust retardant.
 - Inside weld bead removed or held to a minimum for easier wire pulling.
 - Taper threaded on each end to ANSI B2.1 and one galvanized coupling attached.
 - Packed in bare bundles, but the uncoupled ends protected with plastic caps. Bundle ends wrapped with hessian (burlap) cloth for further protection.
 - Easier to cut, easier to thread, easier to bend, easier to pull. Dimensionally accurate. Uniform quality all around.

- TOLERANCE :**
- Outside Diameter : ± 0.38 mm (For 1/2"-2"), ± 0.64 mm (For 2 1/2"-4")
 - Wall Thickness : - 12.5%
 - Length : ± 6.4 mm

Thermal Conductivities of Common Materials at about 30°C

Material	$\sigma_p W/m \cdot ^\circ C$
Copper	200
Graphite	60
Soil	1.7-0.8(2.5-0.33) extremes
Concrete	1.2
Somastic	1
Glass	0.9
Transite	0.5
Polyethylene	0.22-0.3, cross linked 0.26
Polyvinylchloride	0.28
Fiber duct	0.21
Rubber	0.2
Jute and textiles	0.2
Paper	0.2-0.12
Water	0.25
Air	0.015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATERIAL	DENSITY (Mg/m ³) (= g/cm ³)	THERMAL CONDUCTIVITY, $\left(\frac{\text{watts}}{\text{mm}^2}\right) / \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{mm}}\right)^\dagger$	LINEAR EXPAN- SION, ° C ⁻¹ ‡	ELECTRICAL RESISTIVITY, ρ ohm·m§	AVERAGE MODULUS OF ELASTICITY, E	
					GPa	psi
Metals (Annealed)						
Aluminum (99.9+)	2.7	0.22	22.5×10^{-6}	29×10^{-9}	70	10×10^6
Aluminum alloys	2.7(+)	0.16	22×10^{-6}	$\sim 45 \times 10^{-9}$	70	10×10^6
Brass (70 Cu–30 Zn)	8.5	0.12	20×10^{-6}	62×10^{-9}	110	16×10^6
Bronze (95 Cu–5 Sn)	8.8	0.08	18×10^{-6}	$\sim 130 \times 10^{-9}$	110	16×10^6
Cast iron (gray)	7.15	—	10×10^{-6}	—	140(±)	$20 \times 10^6 \pm$
Cast iron (white)	7.7	—	9×10^{-6}	660×10^{-9}	205	30×10^6
Copper (99.9+)	8.9	0.40	17×10^{-6}	17×10^{-9}	110	16×10^6
Iron (99.9+)	7.88	0.072	11.7×10^{-6}	98×10^{-9}	205	30×10^6
Lead (99+)	11.34	0.033	29×10^{-6}	206×10^{-9}	14	2×10^6
Magnesium (99+)	1.74	0.16	25×10^{-6}	45×10^{-9}	45	6.5×10^6
Monel (70 Ni–30 Cu)	8.8	0.025	15×10^{-6}	482×10^{-9}	180	26×10^6
Silver (sterling)	10.4	0.41	18×10^{-6}	18×10^{-9}	75	11×10^6
Steel (1020)	7.86	0.050	11.7×10^{-6}	169×10^{-9}	205	30×10^6
Steel (1040)	7.85	0.048	11.3×10^{-6}	171×10^{-9}	205	30×10^6
Steel (1080)	7.84	0.046	10.8×10^{-6}	180×10^{-9}	205	30×10^6
Steel (18 Cr–8 Ni stainless)	7.93	0.015	9×10^{-6}	700×10^{-9}	205	30×10^6
Ceramics						
Al ₂ O ₃	3.8	0.029	9×10^{-6}	$> 10^{12}$	350	50×10^6
Brick						
building	2.3(±)	0.0006	9×10^{-6}	—	—	—
fireclay	2.1	0.0008	4.5×10^{-6}	1.4×10^6	—	—
graphite	1.5	—	5×10^{-6}	—	—	—
paving	2.5	—	4×10^{-6}	—	—	—
silica	1.75	0.0008	—	1.2×10^6	—	—
Concrete	2.4(±)	0.0010	13×10^{-6}	—	14	2×10^6
Glass						
plate	2.5	0.00075	9×10^{-6}	10^{12}	70	10×10^6
borosilicate	2.4	0.0010	2.7×10^{-6}	$> 10^{15}$	70	10×10^6
silica	2.2	0.0012	0.5×10^{-6}	10^{18}	70	10×10^6
vycor	2.2	0.0012	0.6×10^{-6}	—	—	—
wool	0.05	0.00025	—	—	—	—
Graphite (bulk)	1.9	—	5×10^{-6}	10^{-5}	7	1×10^6
MgO	3.6	—	9×10^{-6}	10^3 (1100° C)	205	30×10^6
Quartz (SiO ₂)	2.65	0.012	—	10^{12}	310	45×10^6
SiC	3.17	0.012	4.5×10^{-6}	0.025 (1100° C)	—	—
TiC	4.5	0.030	7×10^{-6}	50×10^{-8}	350	50×10^6
Polymers						
Melamine-formaldehyde	1.5	0.00030	27×10^{-6}	10^{11}	9	1.3×10^6
Phenol-formaldehyde	1.3	0.00016	72×10^{-6}	10^{10}	3.5	0.5×10^6
Urea-formaldehyde	1.5	0.00030	27×10^{-6}	10^{10}	10.3	1.5×10^6
Rubbers (synthetic)	1.5	0.00012	—	—	~ 0.05	600–11,000
Rubber (vulcanized)	1.2	0.00012	81×10^{-6}	10^{12}	3.5	0.5×10^6
Polyethylene (L.D.)	0.92	0.00034	180×10^{-6}	10^{13} – 10^{16}	0.1–0.35	14,000–50,000
Polyethylene (H.D.)	0.96	0.00052	120×10^{-6}	10^{12} – 10^{16}	0.35–1.25	50,000–180,000
Polystyrene	1.05	0.00008	63×10^{-6}	10^{16}	2.8	0.4×10^6
Polyvinylidene chloride	1.7	0.00012	190×10^{-6}	10^{11}	0.35	0.05×10^6
Polytetrafluoroethylene	2.2	0.00020	100×10^{-6}	10^{14}	0.35–0.7	50,000–100,000
Polymethyl methacrylate	1.2	0.00020	90×10^{-6}	10^{14}	3.5	0.5×10^6
Nylon	1.15	0.00025	100×10^{-6}	10^{12}	2.8	0.4×10^6

† Data in this table were taken from numerous sources.

‡ Alternatively, W/mm·K. Multiply by 1.92 to get Btu/(ft²·s)/(° F/in.).

§ Or, K⁻¹; divide by 1.8 to get ° F⁻¹.

¶ Multiply ohm·m by 39 to get ohm·in.

เนื้อนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้ฟรี ไม่อนุญาตให้มีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ศุภี บรรจงจิตร และอาจารย์ชาย ชมภูอินไหว ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำ โครงการครั้งนี้ ขอคุณ คุณ สุมิตร ที่กรุณาให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อข้อมูลเพิ่มเติม และที่ขาดเสียมิได้คือบุคลากรที่ทำให้มีวันนี้ขึ้นมาได้ นอกจากนี้ยังมีอีกหลายท่านที่ไม่สามารถจะกล่าวถึงได้หมดในที่นี้ คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่มีอุปการะคุณ ทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. EWP. Jones, "Power cable installation practices", Butter worth heinemann lpd., pp.1-14,1993
2. J.H. Neher and M.H McGrath, "The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems", AIEE Trans., part III, vol.76, pp.752-772, Oct.1957
3. Julius Hegyi and Alex Y.Klestoff, "Current-carrying capability for Industrial underground cable installations" IEEE Trans., vol.24, pp.99-105, Jan./Feb.1988
4. NFPA, "NFPA 1984 National Electrical Code", Tables 310-69 through 310-84
5. Peter Pollak, "Neher-McGrath calculations for insulated power cables" IEEE Trans., vol. IA-21, pp.1319-1323 ,Sep./Oct.1985
6. Thai Yazaki, "Technical information and specification for electric wires and cables", Thai Yazaki publication, Oct.1991
7. Thai Yazaki, "Technical information and specification for XLPE power cable", Thai Yazaki publication, Oct.1991
8. W.F. (Buddy) Powers Jr, "The basic of power cables", IEEE Trans., vol.30, May./Jun.,1994
9. การไฟฟ้านครหลวง, "กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ. 2538", พิมพ์ครั้งที่ 1 : กรุงเทพฯ, 2538
10. วิบูล เขมรังษฤษฎ์, "อุปกรณ์ส่งจ่ายไฟฟ้า การออกแบบและระบบป้องกันเล่ม 1", สำนักพิมพ์ ซีเอ็ดฯ : กรุงเทพฯ, 2517, น.145-208
11. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, "ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง เล่ม 2" , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : กรุงเทพฯ, น.6-12, 2535

คณะผู้จัดทำ



นายสุพัต ผาพันธุ์ (พัต)

ที่อยู่ 173/13 หมู่ 1 ถนนสวัสดิโสภกา ตำบลบ้านไต้

อำเภอพระยืน จังหวัดขอนแก่น 40320

Easy Call : 1500-810773



นายปรีชานนท์ คุ่มกระติก (นนท์)

ที่อยู่ เลขที่ 5 หมู่ 3 ตำบลศาลาษา อำเภอพุทธมณฑล

จังหวัดนครปฐม 73170



นายสรายุทธ แสนสุวรรณ (นัท)

ที่อยู่ เลขที่ 145/32 หมู่บ้านศุภฤกษ์ หมู่ 4

ตำบลดอนแก้ว อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ 50180

โทร. (053) 890-262

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้