



การศึกษาการเกิดวอเตอร์ทรีในสายตัวนำ
ชนิดครอสลิงคโพลีเอททีลีน

STUDYING IN PHENOMENA OF WATER TREE
IN CROSS-LINKED POLYETHYLENE CABLE

โดย
นายจจร พิพัฒน์สุภรณ์
นายคทา อภัยวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2535

ปริญญาโทบริหารการศึกษา 2535

ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการเกิดวอเตอร์รีในสายส่งนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอททีลิน

ผู้จัดทำ

1. นายขจร พิพัฒน์สุภรณ์ รหัสประจำตัว 32-1037
2. นายกทา อภัยวงศ์ รหัสประจำตัว 32-1042

จอร์จ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์จรงค์ บุญเส็ง)



สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อ	
Abstract	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความหมายของวอเตอร์ทรี	1
1.2 การค้นพบวอเตอร์ทรี	1
บทที่ 2 การเกิดของวอเตอร์ทรี	3
2.1 สาเหตุการเกิดของวอเตอร์ทรี	3
2.2 รูปแบบของวอเตอร์ทรี	5
2.3 การเกิดขึ้นของวอเตอร์ทรี	7
2.4 การวิเคราะห์แบบจำลองการเติบโตของวอเตอร์ทรีที่ใช้สนามไฟฟ้า	9
2.4.1 การทดสอบ	9
2.4.2 สมการแสดงอัตราการเติบโตของทรี	10
2.4.3 การวิเคราะห์การเติบโตของทรีที่สังเกตเห็น	16
2.4.4 การพินิจพิจารณา	22
2.4.5 ข้อเสนอ	25
บทที่ 3 การผลิตสายตัวนำที่ใช้ฉนวนครอสลิงค์โพลีเอทิลีน	26
3.1 การพัฒนาของสายตัวแรงสูงฉนวนแบบฉีดยุติ	26
3.2 คุณสมบัติของสายครอสลิงค์โพลีเอทิลีน	28
3.3 องค์ประกอบของสายตัวนำครอสลิงค์โพลีเอทิลีน	29
3.4 ขั้นตอนการผลิต	30
3.5 ขั้นตอนการทำครอสลิงค์โพลีเอทิลีน	34
3.6 การปรับปรุงขั้นตอนการผลิตเพื่อลดการเกิดวอเตอร์ทรี	35
3.7 ประวัติการผลิตสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอทิลีน	40
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	42
4.1 แนวคิดในการทดลอง	42
4.2 ทฤษฎีการทดลองในการจำลองการเกิดวอเตอร์ทรีโดยใช้วอเตอร์ทรีชนิดเล็ก	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลอง	45
4.3.1 การทดลองที่ 1	45
4.3.2 การทดลองที่ 2	48
4.3.3 การทดลองที่ 3	52
4.4 การทดสอบหาวอเตอร์รี่	53
4.5 ผลการทดลอง	57
4.5.1 ผลการทดลองที่ 1	57
4.5.2 ผลการทดลองที่ 2	
4.5.3 ผลการทดลองที่ 3	
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	59
ภาคผนวก	
ก. การคำนวณสนามไฟฟ้าในฉนวนแข็ง	61
ข. Specification ของสายตัวนำครอสลิงค์โพลีเอทิลีน ขนาด 5-46 กิโลโวลต์	74
กิตติกรรมประกาศ	108
เอกสารอ้างอิง	109

สารบัญรูปภาพ

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
รูปที่ 1.1 แสดงวอเตอรฺทรีในส่วนต่างๆ ในฉนวนของตัวนำครอสลิงค์โพลีเอททีลีน	1
บทที่ 2 การเกิดของวอเตอรฺทรี	
รูปที่ 2.1 แสดงข้อบกพร่องในฉนวนของสายตัวนำ	3
รูปที่ 2.2 รูปแบบต่างๆ ของวอเตอรฺทรีในสายตัวนำโพลีเอททีลีน	6
รูปที่ 2.4.1 รูปแสดงรูปเรขาคณิตซึ่งแสดงวอเตอรฺทรีความยาว L	13
รูปที่ 2.4.2 รูปแสดงค่าของ F_{ω} สำหรับอัตราส่วนของ σ_p/σ_T และ ϵ_p/ϵ_T	13
รูปที่ 2.4.3 รูปแสดงข้อมูลที่ปรากฏพบทรีสามทรี ที่ $R = 90$ ไมโครเมตร	17
รูปที่ 2.4.4 รูปแสดงอัตราการเติบโตของทรี	18
รูปที่ 2.4.5 รูปแสดงข้อมูลที่ปรากฏพบทรีสามทรี ที่ $R = 3$ ไมโครเมตร	18
รูปที่ 2.4.6 รูปแสดงข้อมูลที่ปรากฏพบทรีสองทรี และหนึ่งทรี ที่ R ต่างๆ	19
รูปที่ 2.4.7 รูปแสดงข้อมูลที่ปรากฏพบทรีหนึ่งทรีที่ R ต่างๆ	20
รูปที่ 2.4.8 รูปแสดงค่าความชื้นกับค่าความถี่ของ C/ω	21
รูปที่ 2.4.9 รูปแสดงค่าความชื้นกับค่าความถี่ของ B/ω	21
รูปที่ 2.4.10 รูปแสดงค่าความชื้นกับค่าความถี่ของ A	22
รูปที่ 2.4.11 รูปแสดงทรีที่เกิดจากความเค้น	23
รูปที่ 2.4.12 รูปแสดงองค์ประกอบการสูญเสียของ J ในวัสดุที่เกิดทรีและไม่เกิดทรี	24
บทที่ 3 การผลิตสายตัวนำที่ใช้ในฉนวนครอสลิงค์โพลีเอททีลีน	
รูปที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอททีลีน	29
รูปที่ 3.2 แสดงขบวนการผลิตหลัก	30
รูปที่ 3.3 แสดงการผลิตแบบการทำวัลคาไนซ์ต่อกันในแนวเส้นโค้ง(CCV)	30
รูปที่ 3.4 แสดงการผลิตแบบการทำวัลคาไนซ์ในแนวตั้ง(VCV)	32
รูปที่ 3.5 แสดงการผลิตแบบฉีดวัสดุเข้าไปในแบบพิมพ์	33
รูปที่ 3.6 แสดงปฏิกิริยาการทำครอสลิงค์	35
รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบช่องว่างที่ผิวของฉนวน	37
รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องตรวจสอบการกระโดดหรือความขรุขระของผิว	38
รูปที่ 3.9 แสดงระบบที่ปราศจากสิ่งแปลกปลอม	39
รูปแสดงประวัติการผลิตสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอททีลีน	40

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

รูปที่ 4.1. แสดงการเกิดเบรคควานีในเนื้อฉนวน	42
รูปที่ 4.2 แสดงวัสดุทดสอบสำหรับการสังเกตเห็นการเติบโตของวอเทอร์รี่	43
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรถอดสอบ	44
รูปที่ 4.4 แสดงตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	45
รูปที่ 4.5 แสดงส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	46
รูปที่ 4.6 แสดงกล่องที่ใช้ในการทดลองที่ 1	46
รูปที่ 4.7 แสดงการต่ออุปกรณ์ในการทดลองที่ 1	47
รูปที่ 4.8 แสดงการจัดอุปกรณ์จริงที่ใช้ในห้องทดลอง	48
รูปที่ 4.9 แสดงสายตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองที่ 2	49
รูปที่ 4.10 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2	49
รูปที่ 4.11 แสดงการจัดอุปกรณ์จริงที่ใช้ในห้องทดลอง	50
รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างสายที่ใช้ในการทดลองที่ 3	51
รูปที่ 4.13 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3	51
รูปที่ 4.14 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาวอเทอร์รี่	52
รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างของแผ่นฉนวนก่อนและหลังการทำการทดสอบหริ	53
รูปที่ 4.16 แสดงการเตรียมฉนวนเพื่อทำการทดสอบ	53
รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างฉนวนที่ตัดมาจากสายตัวนำก่อนและหลังการทดสอบหริ	54
รูปที่ 4.18 แสดงการทดสอบหริ	55
รูปที่ 4.20 แสดงกล่องที่ใช้ในการตรวจสอบวอเทอร์รี่	56
รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองที่ 2	57
รูปที่ 4.22 แสดงร่องรอยการเกิดเบรคควานีในเนื้อฉนวนที่ได้จากการทดลอง	58

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์

รูปที่ 5.1 แสดงวอเทอร์รี่ที่เกิดขึ้นจริงในสายตัวนำที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว	75
--	----

การศึกษาการเกิดวอเตอร์รีในสายตัวนำชนิด ครอสลิงค์โพลีเอททีลิน

ชจร พัทธเสฎรณ รหัศ 32-1037
คทา อภัยวงศ รหัศ 32-1042
จรงค์ บุญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2535

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์วอเตอร์รีต่างๆ ในสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอททีลิน ไม่ว่าจะเป็นการเกิดขึ้นของวอเตอร์รี, ปัจจัยต่างๆ ที่มีเป็นสาเหตุในการเกิดวอเตอร์รี, การผลิตสายตัวนำ, การพัฒนาการผลิตสายตัวนำชนิดนี้ และการแก้ไขจุดบกพร่องในการผลิตเพื่อลดการเกิดของวอเตอร์รี โดยสุดท้ายจะกล่าวถึงการทดลองที่พยายามจำลองการเกิดของวอเตอร์รีในสายตัวนำชนิดนี้

Studying in phenomena of water tree in cross-linked polyethylene cable

Kajorn Phipatnasuphom 32-1037

Kata Apaiwongse 32-1042

jongrak Boonseng Advisor

1992

Abstract

This thesis mentions about phenomeana of water tree in cross-linked polyethylene cable(XLPE) that is the initial growth of water tree, parameters and factors which cause the initial growth of water tree, manufacturing of XLPE cable, the development of manufacturing process and improvement of defection in manufacturing process for decreasing initial growth of water tree. Finally it mentions about experiment of initial growth model of water tree in XLPE cable

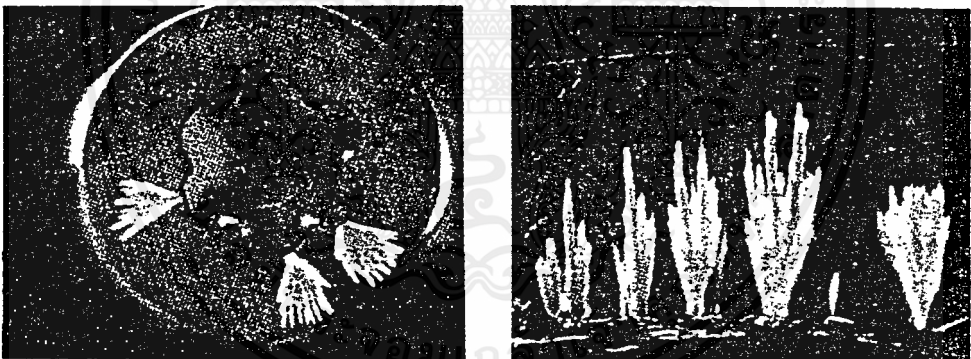
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความหมายของวอเตอร์ทรี (water tree)

วอเตอร์ทรีที่เกิดขึ้นในฉนวนของสายตัวนำ ซึ่งไม่ว่าจะเป็นโพลีเอททีลีน(Polyethylene), ยางเอททีลีน โพรพิลีน(ethelene-propylene rubber) และครอสลิงค์โพลีเอททีลีน(Cross-linked polyethylene, XLPE) วอเตอร์ทรีนั้นเป็นทรี(tree) ประเภทหนึ่งที่เกิดในฉนวนไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยวอเตอร์ทรีหรืออิเล็กโตรเคมีคอล (electrochemical tree) และอิเล็กทริกอลทรี(electrical tree) ซึ่งการเกิดทรีทั้งหมดนี้ยังเป็นต้นเหตุอย่างหนึ่งของความเสียหายก่อนเกิดการเบรคดาวน์ทางไฟฟ้า(electrical pre-breakdown damage)

ซึ่งผลของวอเตอร์ทรีนั้นจะสามารถสังเกตเห็นได้ มีรูปร่างคล้ายๆ ต้นไม้ โดยจะมีลักษณะต่างๆ กันไป และเกิดในบริเวณต่างๆ เกินไปของฉนวนของสายตัวนำ โดยภายในของวอเตอร์ทรีนั้นจะมีน้ำ(หรืออาจจะเป็นของเหลวชนิดอื่น โดยเฉพาะของเหลวชนิดมีขั้ว(polar liquid) บรรจุอยู่ภายใน



รูปที่ 1.1 แสดงวอเตอร์ทรีในส่วนต่างๆ ในฉนวนของตัวนำครอสลิงค์โพลีเอททีลีน(XLPE)

1.2 การค้นพบวอเตอร์ทรี

การพบว่าการอิเล็กทริกอลดีสชาร์จ(electrical discharge) นั้นสามารถสร้างความเสียหายให้กับฉนวนนั้นถูกค้นพบมานานแล้ว โดยการค้นพบแรกๆ นั้นจะพบในการเกิดดีสชาร์จแบบฟ้าผ่า(lightning discharge) นั้นสามารถจะเจาะทะลุฉนวนที่หนาในทิศทางไปทางกราวด์(ground) และการเกิดแบบในรูปแบบของลิชเทินเบอร์ก(Lichtenberg type figure) หรืออิเล็กทริกอลทรี ซึ่งสามารถมองเห็นได้จากฉนวนที่เป็นของแข็งและเป็นสารอินทรีย์และโปร่งแสง

โดยในระหว่างทศวรรษที่ 20 ได้มีการตีพิมพ์เกี่ยวกับความเสียหายที่เกิดโคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) และระหว่างทศวรรษที่ 20 และทศวรรษที่ 30 ได้มีการตีพิมพ์เกี่ยวกับเรื่องทริหรือร่องรอยที่เกิดขึ้นภายใน(internal tracking) ที่เกิดขึ้นในสายที่ใช้กระดาษชุบน้ำมันเป็นฉนวน

จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1971 โดยนายวาลท์สตรอมและนายลอว์สัน(Vahlstrom and lawson) ได้กล่าวในที่ประชุมของ IEEE ว่า โพลีเอทิลีนที่ใช้เป็นฉนวนของสายตัวนำที่ใช้ฝังลงดินโดยตรงและ ได้ผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่งจะพบว่ามีทริอยู่ในสายดังกล่าว โดยสามารถพบได้หลายรูปแบบของการเกิด โดยขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมต่างๆ และได้แบ่งแยกออกเป็นหลายๆ ลักษณะ โดยแบ่งแยกระหว่างอิเล็กทริคอลทริและวอเตอร์ทริออกจากกันโดยใช้ความแตกต่างระหว่างความสามารถหายไปและคงอยู่ของทริดังกล่าว



บทที่ 2

การเกิดของวอเตอร์ทรี

2.1 สาเหตุการเกิดของวอเตอร์ทรี

สาเหตุการเกิดของวอเตอร์ทรีนั้นเกิดจากสภาวะแวดล้อม และคุณภาพของฉนวนของสายตัวนำนั้นๆ ซึ่งการเกิดวอเตอร์ทรีนั้นจะต้องใช้เวลานานมาก โดยอายุการใช้งานของสายตัวนำนั้นจะต้องมีประมาณ 6-7 ปีขึ้นไป จึงจะเกิดวอเตอร์ทรีขึ้น

สภาวะแวดล้อมที่เอื้อประโยชน์ต่อการเกิดวอเตอร์ทรีนั้น จะอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าและมีความชื้นอยู่ในสายตัวนำนั้นๆ ได้แก่ การฝังลงดินโดยตรง, การฉีกขาดของเปลือกหุ้มภายนอก

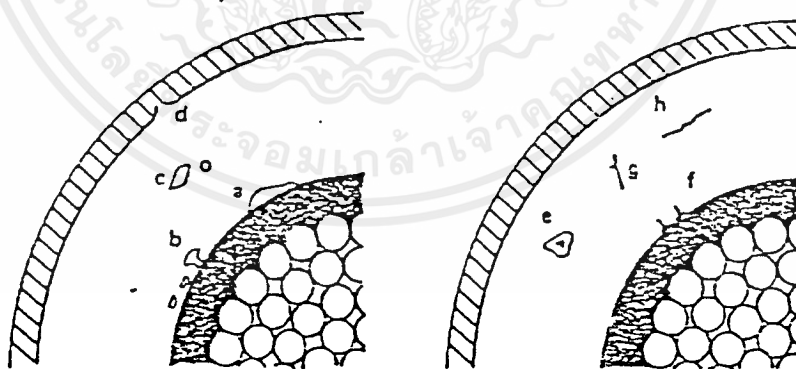
ส่วนคุณภาพของฉนวนของสายตัวนำนั้น ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดในการผลิตในขั้นตอนต่างๆ และเทคโนโลยีในการผลิต ซึ่งได้แก่

2.1.1 ช่องว่างในเนื้อฉนวน (Voids or Micro-voids)

2.1.2 ส่วนบุรุษระของส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำ (Protrusion from the semiconducting layer)

2.1.3 สิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวน (Contaminants)

โดยตัวอย่างของข้อผิดพลาดในฉนวนได้แสดงตามรูป



รูปที่ 2.1 แสดงข้อบกพร่องในฉนวนของสายตัวนำ

- ช่องว่างที่ผิวของชั้นสารกึ่งตัวนำ
- พองอากาศที่เกิดจากก๊าซที่บริเวณตัวนำ
- ช่องว่างที่เกิดจากการก๊าซในฉนวน
- ตำแหน่งที่ผิวของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- f) ส่วนที่ยื่นออกมาจากชั้นสารกึ่งตัวนำ
- g) เศษผง
- h) เส้นใย

2.1.1 ช่องว่างในเนื้อฉนวน

โดยทั่วไปแล้วช่องว่างที่เกิดจะมีขนาดเล็กประมาณ 10-80 ไมโครเมตร โดยจะเกิดอยู่ทั่วไปในเนื้อฉนวนซึ่งอาจจะได้แก่

- 2.1.1.1 ฟองอากาศหรือฟองก๊าซ
- 2.1.1.2 ช่องว่างที่เกิดจากการมีก๊าซเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน
- 2.1.1.3 ช่องว่างที่มีความชื้นอยู่ภายใน
- 2.1.1.4 ช่องว่างที่เกิดจากความผิดพลาดของรอยต่อระหว่างชั้น

โดยในช่องว่างเหล่านั้นจะเกิดการดีสชาร์จภายใน(internal discharge) ซึ่งจะสร้างความเสียหายแก่ตัวฉนวน และยังเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดวอเตอร์ทรี

2.1.2 ส่วนขรุขระของส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำ

ซึ่งจะสามารถเกิดได้ทั้งชั้นสารกึ่งตัวนำภายในหรือคอนดักเตอร์ชีลด์ (conductor shield) และชั้นสารกึ่งตัวนำภายนอก หรืออินซูเลชันชีลด์(insulation shield) โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้สนามไฟฟ้าจะกระจายไม่สม่ำเสมอ และจุดนั้นๆ จะมีความเครียดทางไฟฟ้าสูงกว่าปกติ จึงอาจจะสร้างความเสียหายแก่เนื้อฉนวน และเป็นจุดเริ่มต้นของวอเตอร์ทรี

2.1.3 สิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวน

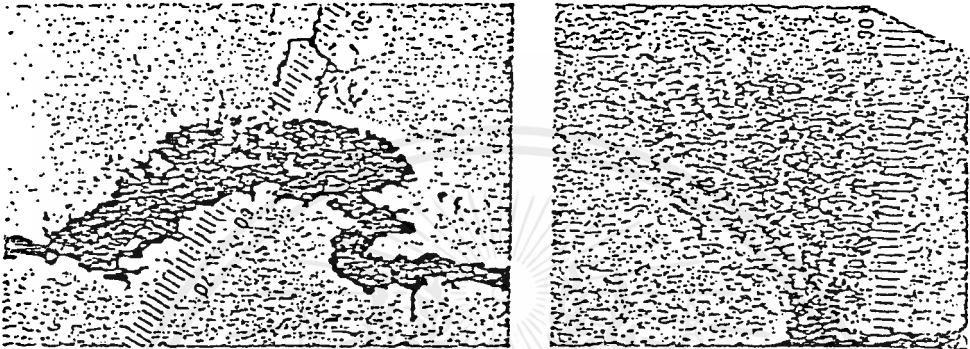
โดยสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้จะเข้าไปอยู่ในเนื้อฉนวน ในระหว่างขั้นตอนการผลิต เช่น

- 2.1.3.1 ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ ได้แก่ ขั้นตอนการผลิตเม็ดพลาสติก
- 2.1.3.2 ขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบ
- 2.1.3.3 ขั้นตอนการผสมวัตถุดิบ
- 2.1.3.4 ขั้นตอนการอัด, รีดฉนวน

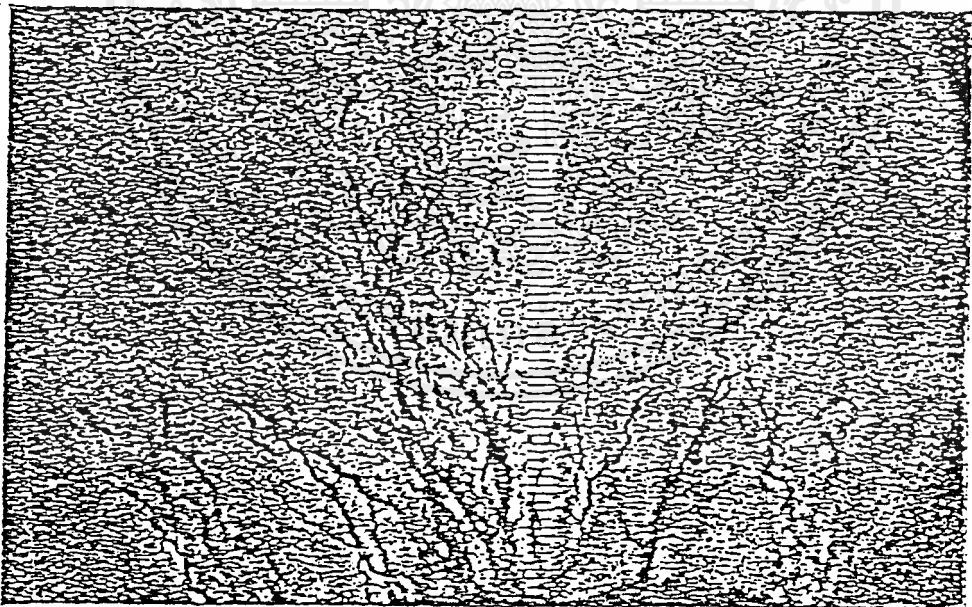
ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้้อาจจะเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ โดยสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้้อาจจะมีส่วนประกอบของน้ำและความชื้นอยู่ เมื่อนำไปใช้งานจะเกิดการแยกตัวของน้ำหรือการทำปฏิกิริยากับเนื้อฉนวน และเป็นจุดเริ่มต้นของวอเตอร์ทรี

2.2 รูปแบบของวอเตอร์ทรี

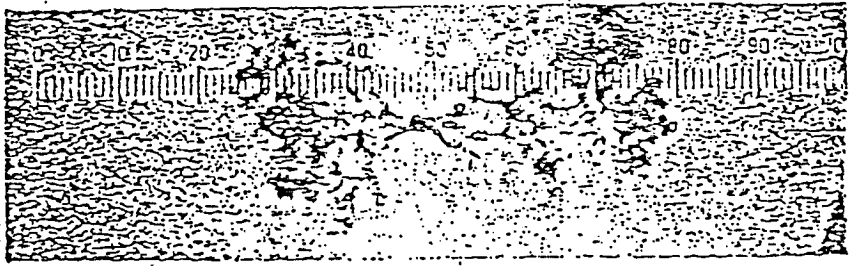
จากการศึกษาถึงความเสียหายที่เกิดในสายตัวนำโพลีเอททีลีน และครอสลิงค์โพลีเอททีลีนที่ใช้ในระดับแรงดันขนาดกลางจากการใช้ไมโครสโคป (Micro scope) สังเกตที่ฉนวนของสายตัวนำชนิดโพลีเอททีลีนและครอสลิงค์โพลีเอททีลีนที่นำมาจากการใช้งานประมาณ 20 ปี ได้พบรูปแบบต่าง ๆ ของวอเตอร์ทรี จากตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ดังรูป



รูป (A) และ (B)



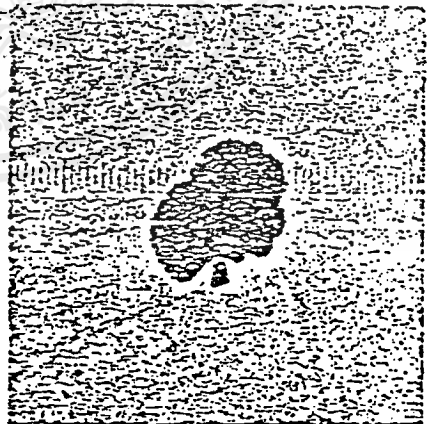
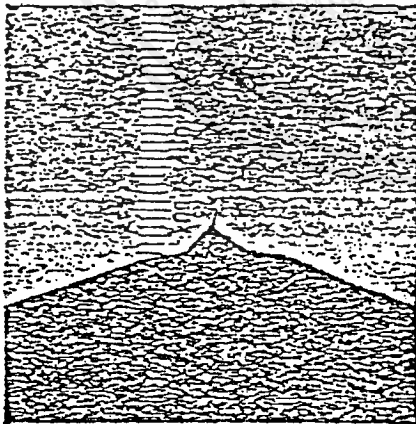
รูป (C)



รูป (D)



รูป (E) และ (F)



รูป (G) และ (H)

รูปที่ 2.2 รูปแบบต่างๆ ของวอเตอร์ทรินในโพลีเอททิลินเคเบิล: (A) บล็อกเคอร์รี่(Broccoli), (B) สตริง(strings), (C) เดลต้า(delta), (D) โบว์ไทร์(bow-tie), (E) พุ่ม(plume), (F) เดนไดรท์(dendrite), (G) สไปร์ค(spike), and (H) ฟัด(fans)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. บล๊อคเคอร์จะเกิดในสายตัวนำที่ใช้คอนดักเตอร์ชีลด์แบบเทป(Tape conductor shield) ความยาวของทรีจะประมาณ 250 ไมโครเมตร

B. สตรีง(สตรีมเมอร์) ส่วนมากจะเกิดสายตัวนำที่ใช้คอนดักเตอร์ชีลด์แบบเทป และมีโอกาสเกิดในสายตัวนำที่ใช้คอนดักเตอร์ชีลด์แบบฉีดยา(Extrusion conductor shield) โดยความยาวของทรีจะขึ้นอยู่กับการโปรเจกชันผ่านฉนวน

C. เดลต้าจะพบที่คอนดักเตอร์ชีลด์และอินซูลเลเตอร์ชีลด์โดยความยาวของทรี จะขึ้นอยู่กับการโปรเจกชันผ่านฉนวน

D. โบว์ไทร์จะเกิดในฉนวนที่มีสิ่งเจือปนโดยมากแล้วจะมีความยาวของทรีน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร ชนิดแต่อาจจะมีพบว่ามีขนาดยาวถึง 3 มิลลิเมตร ชนิดของทรีประเภทนี้ปัจจุบันจะพบบ่อยในสายเคเบิลแบบฉีดยา

E. พุ่มจะเกิดในฉนวนที่มีสิ่งเจือปนบริเวณคอนดักเตอร์ชีลด์ มีความยาวของทรีประมาณ 500 ไมโครเมตร

F. เดนไดรที่โอกาสที่จะพบน้อยมาก จะเกิดในบริเวณรอบ ๆ ของความเสียหายโดยเริ่มต้นได้พบจากคอนดักเตอร์ชีลด์หรืออินซูลเลเตอร์ชีลด์โดยอาจเรียกว่าอิเล็กทริคอลลทรี (electrical tree)

G. สไปร์คจะเกิดที่คอนดักเตอร์ชีลด์แบบฉีดยาโดยจะมีความยาวประมาณ 120 ไมโครเมตร

H. แบบพัตจะเกิดขึ้นจากสิ่งแปลกปลอมในฉนวน จะมีความยาวของทรีน้อยกว่า 120 ไมโครเมตร แนวทางการเจริญของทรีของรูปแบบ a ถึง f จะมีทิศทางขนานกับแนวของสนามไฟฟ้าในขณะที่ g และ h จะมีทิศทางไม่แน่นอน และการเกิดของสไปร์คและทรีจะอธิบายจากขั้นตอนการผลิตของสายตัวนำและจากสิ่งแปลกปลอมในสารฉนวน ในรูป 2 และ 3 แสดงรูปร่างของทรีที่เกิดในสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอทิลีน

2.3 การเกิดขึ้นของวอเทอร์ทรี

กลไกการเกิดขึ้นของวอเทอร์ทรีที่แท้จริงนั้นจากการศึกษาของหลายสถาบันจนกระทั่งปัจจุบัน ยังหาข้อสรุปที่ชัดเจนไม่ได้

ดังนั้นจึงมีเพียงข้อสังเกตของผู้ที่ทำการทดลองวิจัยในด้านนี้ไว้ดังนี้

- จากการทดลองของมัตสึบะและยามานouchi(Matsubura and Yamanouchi) ได้กล่าวไว้ว่า ไม่มีอะไรที่สามารถบอกได้ว่าเกิดวอเทอร์ทรี และเมื่อทำให้ชิ้นทดสอบแห้ง วอเทอร์ทรีจะหายไป และเมื่อต้องการให้ปรากฏขึ้นมาอีกจะทำได้โดยการนำชิ้นทดสอบนั้นๆ ไปต้ม

- จากการทดลองของเคตส์(Ketz), ฟูกุดะ(Fukuda) และทานากะ(Tanaka) ได้กล่าวว่า สารที่เจืออยู่ในน้ำ เช่นพวกเกลือจะมีอิทธิพลต่อการเติบโตของวอเทอร์ทรีและความหนาแน่นของวอเทอร์ทรี

- จากการทดลองของบัทเตอร์และเคตส์(Bahder and Kete) ได้กล่าวว่าอิทธิพลของระดับแรงดันไฟฟ้าต่อรูปร่างและการเติบโตของวอเทอร์ทรี คือระดับแรงดันเริ่มแรกจะมีระดับต่ำ และการเติบโตของวอเทอร์ทรีจะมีระดับต่ำ โดยในการใช้งานจริงการเติบโตของวอเทอร์ทรีก็จะมีระดับที่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้เวลานานมากกว่าวอเทอร์ทรีจะเจาะเข้าไปในเนื้อฉนวน

- จากการทดลองของฟูคุดะ(Fukuda) ได้กล่าวไว้ว่า จะไม่สามารถทำให้เกิดวอเตอร์ทรีชนิดโบว์-ไคด์ขึ้นได้โดยวิธีการเร่งความเครียดทางไฟฟ้าต่างๆ เพราะวอเตอร์ทรีชนิดนี้เกิดจากน้ำที่เข้าไปในฉนวนตั้งแต่ขั้นตอนในการผลิต และจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเกิน

ดังนั้นจึงเกิดคำถามที่เกี่ยวกับวอเตอร์ทรีขึ้นมากมาย เช่น

- การเข้าไปของน้ำที่เข้าไปสู่ฉนวน จะเข้าไปในรูปของของเหลวหรือไอ
- กลไกของการเข้าไปในฉนวนเป็นอย่างไร
- ความเกี่ยวข้องระหว่างความเครียดทางไฟฟ้ากับการเข้าไปของน้ำเป็นอย่างไร
- ความแตกต่างของการเริ่มต้นของวอเตอร์ทรีและการเติบโตของวอเตอร์ทรี
- ทำไมความบกพร่องของสายตัวนำ (สิ่งแปลกปลอม, ช่องว่าง) จึงได้มาเป็นจุดเริ่มต้นของวอเตอร์ทรี
- "วอเตอร์ทรีเกิดขึ้นได้ในระดับความชื้นที่ไม่อิ่มตัว" จะหาข้ออธิบายได้อย่างไร
- น้ำเกลือดูจะให้ผลดีในการเกิดวอเตอร์ทรีมากกว่าน้ำบริสุทธิ์ อะไรคือความเกี่ยวข้องของพวกอิออนต่อการเกิดวอเตอร์ทรี
- วอเตอร์ทรีจะเกิดขึ้นภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า ดังนั้นการดิสชาร์จบางส่วนจะมีความเกี่ยวข้องด้วยหรือไม่
- อะไรเป็นการทดลองที่ดีที่สุดในการเร่งให้เกิดวอเตอร์ทรี หรือจะเป็นการใช้เข็ม, ความเครียดไฟฟ้าสูง, และความถี่ไฟฟ้าสูง
- อะไรจะเป็นการวิจัยที่จะทำให้เข้าใจปรากฏการณ์นี้ได้ดียิ่งขึ้น จึงได้มีการประชุมของคณะกรรมการของสถาบันวิจัยทางไฟฟ้ากำลัง(Electric Power Research Institute, EPRI) เพื่อหาความกระจ่างชัดเกี่ยวกับการเกิดวอเตอร์ทรีจากคำถามข้างต้นแต่บางคำถามก็ยังไม่หาคำตอบไม่ได้ จึงได้เพียงข้อสรุปบางประการ
- อิทธิพลของอิออนและผลของอิออนบนปรากฏการณ์ดังกล่าวสรุปได้ว่ามีผลอย่างมาก
- การเริ่มต้นและการเติบโตของวอเตอร์ทรีชนิดโบว์-ไคด์ และเวนท์ทรี(vented tree) เป็นวอเตอร์ทรีที่เกิดในแนวของสนามไฟฟ้าโดยเริ่มจากผิวนอกจะต่างกันโดยสิ้นเชิง เพราะชนิดโบว์-ไคด์นั้นเกิดขึ้นภายในไม่มีการเข้าไปของน้ำจากภายนอก ส่วนเวนท์ทรีนั้นเกิดจากน้ำภายนอกเข้าไปในเนื้อฉนวน
- มีการสรุปว่าในระหว่างการเกิดวอเตอร์ทรีนั้นจะเกิดการออกซิเดชัน(Oxidation) ขึ้นด้วย แต่ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าจะเกิดขึ้นในตอนใด ก่อนการเริ่มเกิดของวอเตอร์ทรีหรือหลังจากที่เกิดวอเตอร์ทรีแล้ว ซึ่งยังต้องการความกระจ่างในจุดนี้ต่อไป
- สิ่งที่ได้ทำได้ออนนี้คือการลดขนาดและความหนาแน่นของวอเตอร์ทรีที่จะเกิดขึ้น มากกว่าการที่จะหาทางป้องกันไม่ให้เกิดวอเตอร์ทรีขึ้น
- การเริ่มต้นของวอเตอร์ทรีนั้นอาจจะเกี่ยวกับรอยแตกเล็กๆเป็นสาเหตุหรือเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีซึ่งเกิดขึ้นในเนื้อฉนวนนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.4 การวิเคราะห์แบบจำลองการเติบโตของวอเตอร์ทรีที่ใช้สนามไฟฟ้า

การเติบโตของวอเตอร์ทรีที่สังเกตเห็นได้โดยตรงนี้เคยถูกทดสอบการปฏิบัติแบบจำลองการเติบโตที่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า อิเล็กโตรดที่มีรัศมีความโค้งต่อกันจะถูกใช้ตรวจสอบอิทธิพลทางเรขาคณิตที่มีผลกับการเติบโตของทรี การวัดอัตราการเติบโตของทรีถูกจำกัดด้วยขนาดของความถี่และความคงที่ของอัตรา ซึ่งถูกเปรียบเทียบด้วยเหตุผลทางไดอิเล็กตริก(dielectric) และผลตอบสนองทางกลเพื่อที่จะพยายามอธิบายองค์ประกอบทางวัสดุที่เกี่ยวข้องกับทรีอื่น

โดยอาศัยเทคนิควอเตอร์ทรีชนิดเดี่ยว(Single water tree) สามารถสังเกตเห็นได้โดยตรงในขณะที่มันเติบโตขึ้น ซึ่งทำสำเร็จเป็นครั้งแรกโดยนายฟิลิปปีนี เอท แอล(Phillippini et al) โดยได้ลงมือทดสอบวอเตอร์ทรีในโพลีเมอร์แข็งบนสภาพเดียวกับอิเล็กตริกอลทรีในของเหลว ดังนั้นการเติบโตที่แท้จริงของทรีสามารถที่จะสังเกตเห็นได้โดยปราศจากการเกี่ยวข้องของตัวอย่างที่ไม่รู้จักและการเปลี่ยนแปลงของวัสดุตัวอย่าง เนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรดสามารถจะวัดได้โดยตรง ความสัมพันธ์ของมันกับการเติบโตของวอเตอร์ทรีที่ตามมาสามารถถูกทดสอบได้ ตามแนวทางนี้การประเมินสามารถทำจากอิทธิพลที่ขึ้นกับการเติบโตของทรีของการเพิ่มขึ้นของการกระตุ้นการเริ่มต้นซึ่งถูกเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของอิเล็กโตรดซึ่งมีเหตุมาจากทรีของมันเอง จากสถานะที่ไม่เหมือนกันในอิเล็กตริกอลทรีการทดลองซ้ำๆ หลายๆ ครั้งที่ใช้อิเล็กโตรดเดียวกันไม่สามารถทำให้สำเร็จได้ ดังนั้นหลักฐานที่ว่า การเริ่มต้นของทรีถูกควบคุมโดยรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดมากกว่ารูปแบบของพื้นที่นั้นยังไม่เป็นที่ยอมรับได้

ในการตรวจสอบเราได้ใช้เทคนิคการสังเกตโดยตรงซึ่งตรวจสอบความสามารถของฟังก์ชันของอัตราการเติบโตที่ขึ้นกับสนามไฟฟ้าต่างๆ กัน เพื่อที่จะอธิบายการเติบโตของวอเตอร์ทรี โดยการปรับค่ารัศมีความโค้งของอิเล็กโตรดเริ่มต้น สมการต่างๆ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าถูกนำมาใช้เพื่อที่จะได้เห็น ถ้าสมการเหล่านี้สามารถทำให้เห็นเด่นชัดขึ้นได้ด้วยการทดลอง ในจำนวนกรณีต่างๆ สมการอัตราการเติบโตที่เป็นที่ยอมรับถูกใช้เพื่อที่จะทำนายการเติบโตในครั้งต่อไปของทรีเดิม การขึ้นอยู่กับอัตราคงที่ที่กำหนดขึ้นโดยนายแอสคราฟ(Ashcraft) ซึ่งพิจารณาเหมือนกับฟังก์ชันความถี่ของสนามไฟฟ้าที่มีค่าระหว่าง 50 ถึง 7500 เฮิร์ตซ์ เหตุผลเช่นนี้เป็นที่ยอมรับและเป็นรูปแบบหนึ่งที่ถูกเปรียบเทียบกับสมการทางทฤษฎีและโดยเฉพาะอย่างยิ่งเราได้พูดถึงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ระหว่างไดอิเล็กตริกกับการตอบสนองทางกลของวัสดุที่เกิดทรี

2.4.1 การทดสอบ

ผลที่รายงานนี้เป็นที่ยอมรับซึ่งได้ใช้เทคนิคการสังเกตโดยตรงในการทดลองสองการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 2 ระดับที่ต่างกัน ซึ่งจะใช้วอเตอร์ทรีชนิดเดี่ยวใช้ในการทดลองทั้งสอง

กลุ่ม CNRS Grenoble ได้ใช้วัสดุทดสอบที่ผ่านการอัดและอัดกับวอเตอร์ทรีชนิดเดี่ยวที่ทราบค่ารัศมีความโค้ง เนื่องจากรูปร่างของวัสดุและรูที่สามารถมองเห็นวัสดุ การเติบโตของทรีสามารถมองเห็นได้อย่างต่อเนื่องในสนามไฟฟ้าโดยใช้กล้องไมโครสโคป, ระบบวิดีโอ, และโทรทัศน์ ส่วนขบวนการทดสอบที่ใช้ที่ S.T.L., Harlow จะแตกต่างกัน โดยโพลีเอทิลีนจะถูกพิมพ์บนเข็มโลหะเพื่อที่จะทำเป็นบล็อด 10 บล็อดรูปกรวย ซึ่งถูกใช้สำหรับ

อิเล็กโทรดเพื่อเติมด้วยอิเล็กโทรไลต์(electrolyte) การสังเกตวอเตอร์รี่จะเริ่มที่เข็มแต่ละอันด้วยการดูจาก กล้องจุลทรรศน์และรูปถ่ายเมื่อต้องการ

การทดสอบทั้งหมดที่ประสบความสำเร็จที่อุณหภูมิห้องที่ค่าแรงดันเฉลี่ย 7.07 กิโลโวลต์ ซึ่งจ่ายผ่านสาย แพล็ตตินัมที่มีสารอิเล็กโทรไลต์ ที่ CNRS สารอิเล็กโทรไลต์จะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 N และค่าของ รัศมีเข็มที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 3, 6, 10, 13, 40 และ 90 ไมโครเมตร และขนาดของความถี่จะเท่ากับ 50, 500, 1500, 2000 และ 7500 เฮิรตซ์ ที่ S.T.L. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 N ถูกเลือกมาใช้ในการจ่ายไฟผ่านสายทองแดงโดยใช้เข็มที่มีรัศมี 5, 9, 12 ไมโครเมตร และความถี่ใช้ที่ 50 เฮิรตซ์

2.4.2 อัตราการเติบโตของทรี

2.4.2.1 การขึ้นกับสนามไฟฟ้าเฉพาะที่

เนื่องจากวอเตอร์รี่เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ซึ่งต้องการสนามไฟฟ้าสำหรับการเกิดขึ้นและการเติบโตของมัน, อัตราการเติบโตของทรีสามารถดูจาก

$$\frac{dL}{dt} = F[E(L, t)] \quad (1)$$

โดย L จะเป็นความยาวของทรี และ $F[E(L, t)]$ เป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ $E(L, t)$ ซึ่งถูกจ่ายที่ปลายเข็มทรีซึ่งต้องมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ขณะที่ $E(L, t)$ เข้าใกล้ศูนย์

แบบจำลองทางทฤษฎีส่วนใหญ่จะทำนายสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นกำลังสองของการขึ้นกับสนามไฟฟ้าโดย

$$F[E(L, t)] = CE^2(L, t) \quad (2)$$

ซึ่ง C เป็นองค์ประกอบการขึ้นกับสนามไฟฟ้าโดยอยู่ในรูปค่าคงที่ ความแตกต่างทั้งหมดที่เกี่ยวข้องมาจากการเกิดขึ้นของแบบจำลองต่างๆ นั้นจะเป็นองค์ประกอบของ C ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ, ความถี่ของสนามไฟฟ้า และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

การเติบโตของทรีสามารถเกี่ยวข้องกับข้อมูลที่ดีขึ้นของแนวพลังงานอิสระต่ำ(lower free Energy phase) ในโพลีเมอร์ ในกรณีนี้กลไกการเติบโตแสดงให้เห็นว่าการเติบโตถูกควบคุมอย่างช้าๆ โดยขบวนการที่สำคัญ 2 ขบวนการ ดังนั้นทั้งการเคลื่อนย้ายและการรวมตัวของอิเล็กโทรไลต์เพื่อการขยายตัวของแกนกลางทรีเป็นตัวที่ใช้พิจารณาอัตราการเติบโตของทรี และ $F(E)$ เป็นปฏิภาคกับ E^2 หรืออัตรานิวเคลียส(nucleation) เป็นอัตราที่จำกัด ในกรณีถัดมานี้ $F(E)$ จะเป็นฟังก์ชันเอกโปเนนเชียลของสนามไฟฟ้า และจะสมมติรูปแบบความสัมพันธ์อย่างง่าย ถ้าแนวของวอเตอร์รี่มีโครงสร้างที่เป็นโพลาร์(Polar)

$$F[E(L, t)] = B \exp \left[-\frac{A}{E(L, t)} \right] \quad (3)$$

สมการนี้มีรูปแบบเหมือนขององค์ประกอบที่เป็นเอกโปเนนเชียลที่ได้มาจากทฤษฎีการยิงอิเล็กตรอน แต่แตกต่างกันองค์ประกอบเอกโปเนนเชียล B ซึ่งเป็นองค์ประกอบสนามไฟฟ้ามากกว่าเป็นปฏิภาคกับสนามไฟฟ้า และความแตกต่างทั้งหมดจะเกี่ยวข้องกับจุดกำเนิดของแบบจำลองที่มีอยู่ใน A และ B แม้ว่าไม่มีหลักฐานสำหรับโครงสร้างของวอเตอร์รีแบบโพล่าที่ยังคงเหลืออยู่ มันเป็นที่น่าสนใจที่จะบันทึกว่าข้อสรุปที่คล้ายๆ กันมีความก้าวหน้าที่จะอธิบายการดูดซึมของน้ำบนโปรตีนในเนื้อเยื่อเซลล์ ผลของโครงสร้างนี้ที่ว่ามันง่ายที่จะมีการเคลื่อนย้ายของประจุขั้วบวกที่ขับเคลื่อนด้วยขบวนการเคลื่อนย้ายพลังงานที่ต่ำที่สุดของขบวนการไฮเดรชัน (hydration) ซึ่งรูปแบบนี้เป็นที่รู้จักว่าเป็นเหตุทำให้เกิดวอเตอร์รี

ภายใต้สภาวะของการทดลองโดยการสังเกตโดยตรง ฟังก์ชันทางทฤษฎีที่พัฒนาสำหรับ $F(E)$ สามารถนำมาทดสอบโดยการจ่ายไฟแก่ที่ระหว่งการเติบโตถ้าสมการสามารถนำมาพิจารณาสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ $E(L, t)$ ได้อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ไม่ใช่ปัญหาที่สำคัญและสมการที่แท้จริงควรจะต้องการการแก้ปัญหาเฉพาะที่ของสมการไดอิเล็กตริกของแมกเวลล์ (Maxwell's dielectric equation) ในรูปของการเก็บประจุและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในวอเตอร์รี และความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกของโพลิเมอร์

ความเป็นไปได้อันหนึ่งเป็นการสมมติฐานว่าวอเตอร์รีไม่ได้มีผลมาจากไดอิเล็กตริกที่มันเกิดขึ้น ในกรณีนี้สนามไฟฟ้าที่อยู่ในที่ที่เกิดวอเตอร์รีที่มีความยาว L จะเท่ากับ

$$E_m(L(t)) = \frac{2Vd}{(Rd - L^2 + 2Ld) \ln(4d/R)} \quad (4)$$

โดยที่ V เป็นค่าแรงดันเฉลี่ยที่จ่าย, R เป็นรัศมีความโค้งของจุดเริ่มต้น และ d เป็นจุดที่ขั้วลงที่แผ่นระนาบ

หรือควรจะถูกคิดเป็นรูปธรรมที่เป็นตัวนำ ด้วยเหตุผลจากการขยายตัวของอิเล็กโตรด ในกรณีนี้สนามไฟฟ้าเฉพาะที่ซึ่งควบคุมการเติบโตของทรีโดยให้เท่ากับ

$$E_a(L(t)) = \frac{V(1+r/D)^{1/2}}{r \tanh^{-1}[1/(1+r/D)^{1/2}]} \quad (5)$$

โดย $r = R + L$ และ $D = d - L$

การขึ้นอยู่กับเวลาของสนามไฟฟ้าเฉพาะที่จะถูกกำหนดโดยความยาวการเติบโตของทรี(L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ 2 สมการนี้จะเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดทางอุดมคติเพราะไม่เพียงต้องปรับปรุงไดอิเล็กตริก แต่จะต้องรวบรวมหลักฐานที่สามารถพิจารณาได้ด้วย ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่ามันไม่สามารถคิดเป็นตัวนำโลหะ คลินเจอร์ (Klinger) ได้พยายามแก้ไขสภาวะนี้โดยการคำนวณการลดลงของพลังงานศักย์จากส่วนที่เกิดที่บริเวณอิเล็กโตรดแบบแบบราบบนพื้นฐานของแบบจำลองการรวมจรรยาของโพลิเมอร์ที่เกิดที่และไม่เกิดที่ องค์ประกอบทางเรขาคณิตของสมการที่ 5 นำมาประยุกต์ได้เป็น

$$E_k^2[L(t)] = F_\omega^{-1} E_a^2[L(t)] \quad (6)$$

โดย

$$F_\omega = \frac{(\sigma_{2T} + \sigma_p L/R)^2 + \omega^2 \epsilon_0^2 (\epsilon_T + \epsilon_p L/R)^2}{\sigma_T^2 + \omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_T^2} \quad (7)$$

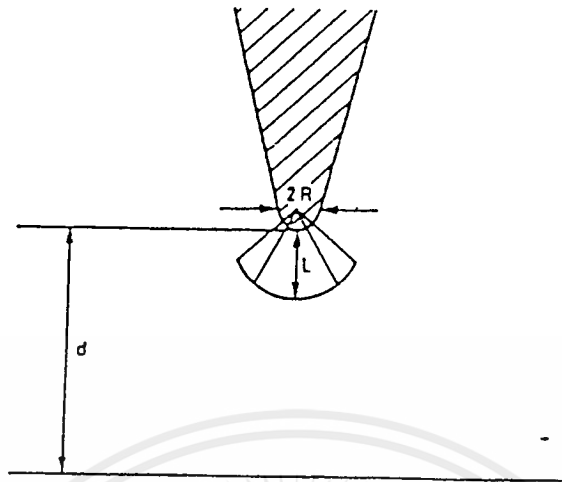
ซึ่ง σ_T และ σ_p เป็นทริและตัวนำโพลิเมอร์, ϵ_T และ ϵ_p เป็นค่าคอนดักติวิตี (conductivity), ϵ_0 เป็นค่าเพอร์มิติวิตี (Permittivity) ของช่องว่างและ ω เป็นความถี่ของสนามไฟฟ้าในหน่วยเรเดียนต่อวินาที แบบจำลองสนามไฟฟ้านำสมการที่ 5 มาใช้อีกเมื่อ $L < R$ และ F_ω มีค่าเข้าใกล้หนึ่งหลังจากการเติบโตเริ่มขึ้น แต่สำหรับอัตราการเติบโตของทริที่มีขนาดใหญ่กว่า สนามไฟฟ้าจะกลายมาเป็นค่าขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าโดย

$$F_\omega \approx [1 + (\sigma_p / \sigma_T) L/R]^2 \quad \omega \rightarrow 0 \quad (8)$$

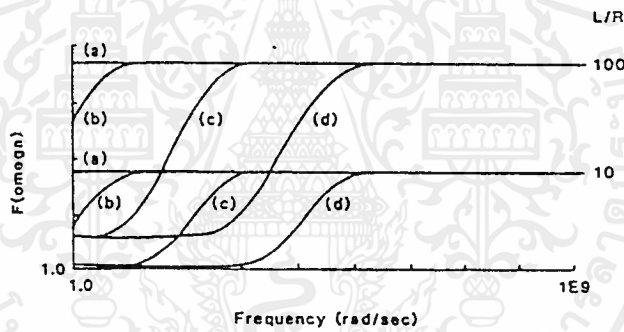
$$F_\omega \approx [1 + (\epsilon_p / \epsilon_T) L/R]^2 \quad \omega \rightarrow \infty \quad (9)$$

เมื่อ (σ_p / σ_T) มีค่าน้อยกว่า $(\epsilon_p / \epsilon_T)$ แล้วเศษส่วนที่มากกว่าของแรงดันที่จ่ายจะลดลงผ่านทริในขณะที่มีความถี่เพิ่มขึ้น ดังนั้น F_ω จะเพิ่มขึ้นและสนามไฟฟ้าเฉพาะที่แท้จริง $E_k[L(t)]$ จะลดลงด้วยความถี่ที่เพิ่มขึ้นสำหรับค่าของ L/R ผลกระทบของความถี่นี้สามารถเห็นได้โดยแทนสมการที่ 6 ลงในสมการที่ 2 และแทนค่า C ด้วยค่าของความถี่ ภายใต้สภาพแวดล้อมเหล่านี้ผลกระทบของความถี่ที่พิสูจน์โดยคลินเจอร์จะสามารถลดอัตราการเติบโตโดยการเพิ่มความถี่สำหรับค่า L/R ข้อสรุปที่แย้งกันในสมการที่ 4 เป็นผลของสมการที่ยอมรับให้ค่า C มาจากค่าความยาว L ที่สังเกตเห็นที่เวลา t เหมือนเป็นการกำหนดอัตราการเติบโตของทริ ในที่นี้ค่าของ L ที่วัดได้จะมีค่าของความถี่มาเกี่ยวข้องด้วย มันควรจะพูดว่าการขึ้นกับความถี่ของ ϵ_T และ ϵ_p ที่ถูกตัดทิ้งโดยคลินเจอร์จะนำไปสู่การลดลงของค่า F_ω ที่ความถี่สูงตลอดจนการลดลงของค่า ϵ_p / ϵ_T

สมการที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้าในแบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับค่าคอนดักติวิตีและค่าเพอร์มิติวิตีที่ถูกกำหนดแก่อเตอร์ทริและโพลิเมอร์ ยกตัวอย่างสมการที่ 13 ของเดนสเลย์ เอท แอล (Densley et al) เกือบจะไม่ใช้ค่าการขึ้นกับความถี่ใน F_ω เพราะเขาพบว่าค่า $\epsilon_p / \epsilon_T \approx \sigma_p / \sigma_T$ ยิ่งไปกว่านั้นมันเป็นค่าที่ไม่จำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4.1 รูปแสดงรูปเรขาคณิตซึ่งแสดงวอเตอร์ที่มีความยาว L



รูปที่ 2.4.2 รูปแสดงค่าของ F_{ω} สำหรับอัตราส่วนของ σ_p/σ_T และ ϵ_p/ϵ_T โดยกำหนดให้ (a) 10^{-14} S/m, (b) 10^{-12} S/m, (c) 10^{-10} S/m, (d) 10^{-8} S/m

คอนดักติวิตีของโพลีเมอร์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้มากทำให้การพิจารณาเลือกค่าความถี่ที่เปลี่ยนค่า F_{ω} ได้ ในรูปที่ 2.4.2 เราแสดงให้เห็นว่าด้วยค่า $\sigma_p/\sigma_T = 0.02$ ค่าคอนดักติวิตีของโพลีเมอร์จะเพิ่มขึ้นเป็น 10^{-8} s/m ก่อนการเปลี่ยนค่า F_{ω} ที่เกิดขึ้นในค่าความถี่ที่วัดได้เท่ากับ 50 - 8000 เฮิรตซ์

เนื่องจากอัตราการเติบโตของวอเตอร์ทรีเป็นความถี่ที่ถูกเร่งระหว่างการเติบโตที่เพิ่มขึ้น มันพบว่าการขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้าเฉพาะที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกที่แสดงในสมการที่ 4 จะไม่รับประกันสำหรับการขึ้นกับความถี่ที่สังเกตได้

2.4.2.2 สมการวิเคราะห์สำหรับการเติบโตของทรี

ความยาวของทรีสามารถทราบได้จากฟังก์ชันของเวลาโดยสมการที่ 1 หลังจากการแทนสมการของสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ลงในฟังก์ชันของสนามไฟฟ้า $F(E(L,t))$ แม้ว่าฟังก์ชันวิเคราะห์จริงไม่สามารถเป็นที่ยอมรับได้เพราะเงื่อนไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระรูปแบบที่เทอะทะของสมการสนามไฟฟ้า โครงสร้างที่สำคัญสามารถแสดงได้โดยวิธีการประเมิน สิ่งเหล่านี้สามารถยอมรับจากสมการสนามไฟฟ้าที่ 4, 5, 6 เมื่อความยาวทรี L มีค่าน้อยกว่า d มากๆ

$$E_a(L) \propto E_m(L) \propto \frac{V}{(R+L)} \quad (10)$$

$$E_k^2(L) \propto \frac{V^2}{(R+L)^2} [1 + G(L/R)^2]^{-1} \quad (11)$$

เมื่อค่า G เป็นค่าคงที่ของการขึ้นกับความถี่ ค่าคงที่เป็นปฏิกิริยาของสมการที่ 10 และ 11 ขึ้นกับค่าของ L และสามารถเอาไปใช้เป็นองค์ประกอบ A , B และ C ของแบบจำลองการเติบโต ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการหาค่าอัตราการเติบโตของทรี

2.4.2.3 สมการกฎกำลังของการเติบโตของทรี

ตอนแรกเราพิจารณาอัตราการเติบโตที่ถูกควบคุมด้วยค่ากำลังที่เกิดขึ้นโดยสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นกรณีทั่วไปของสมการที่ 2 คือ

$$\frac{dL}{dt} = CE^P(L) \quad (12)$$

โดย $L/R > 1$, ทั้ง $E_a(L)$ และ $E_m(L)$ กำหนดให้

$$L^{P+1} \approx (P+1)V^P Ct \quad (13)$$

และ $E_k(L)$ กำหนดเป็น

$$L^{2P+1} \approx (2P+1) \left[\frac{VR}{\sqrt{G}} \right]^P Ct \quad (14)$$

การแทนค่าของสมการเหล่านี้ลงในสมการที่ 12 จะกำหนดให้อัตราการเติบโตอะซิมโทติกสำหรับ $L > R$ เป็น

$$\frac{dL}{dt} \approx \left[\frac{CV^P}{(P+1)^P} \right]^{1/(P+1)} t^{-P/(P+1)} \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ $E_a(L)$ และ $E_m(L)$ และ

$$\frac{dL}{dt} \approx \left[\frac{CV^P R^P}{G^{P/2} (2P+1)^{2P}} \right]^{1/(2P+1)} t^{-2P/(2P+1)} \quad (16)$$

สำหรับ $E_k(L)$ อย่างไรก็ตามการตรวจพินิจของสมการที่ 10 และ 11 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเติบโตเริ่มต้น Q ที่ $(t = 0, L = 0)$ ถูกกำหนดโดย

$$Q = \frac{CV^P}{R^P} \quad (17)$$

เนื่องจากอัตราการเติบโตจะเร็วที่สุดที่เวลาสั้นๆ อัตราการเริ่มต้นที่กำหนดในสมการที่ 11 จะต้องนำมา รวมลงในสมการที่ 15 และ 16 คือ

$$\frac{dL}{dt} \approx Q[1 + Q(P+1)t/R]^{-P/(P+1)} \quad (18)$$

สำหรับ $E_a(L)$ และ $E_k(L)$ และ

$$\frac{dL}{dt} \approx Q[1 + Q(2P+1)G^{1/4}t/R]^{-2P/(P+1)} \quad (19)$$

สำหรับ $E_k(L)$

สมการที่ 18 และ 19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสมการอัตราเป็นสมการกำลังของสนามไฟฟ้า อัตราการเติบโต จะเข้าใกล้กฎกำลังโดยตัวดัชนีเศษส่วนซึ่งเป็นฟังก์ชันกำลังของสนามไฟฟ้า P ดังนั้นสำหรับตัวอย่างแบบจำลอง สนามไฟฟ้าด้วยสมการสนามไฟฟ้า $E_a(L)$ และ $E_m(L)$ จะกำหนดอัตราการเติบโตเป็นปฏิภาคกับ $t^{-2/3}$ ในทาง กลับกันสมการสนามไฟฟ้า $E_k(L)$ อัตราการเติบโตจะเข้าใกล้ $t^{-4/5}$ สำหรับแบบจำลองเดียวกัน

มาตราเวลาของกฎกำลังถูกจัดหาโดยเวลาที่ต้องการสำหรับการประมาณ $L/R > 1$ เพื่อที่จะทำให้มองเห็นและมันเป็นการกำหนดอัตราการเติบโตเริ่มต้น วิธีนี้ที่ใช้ผลการทดลองที่ทดสอบการขึ้นกับค่าคงที่ที่ถูกควบคุมด้วยค่าต่างๆ ซึ่งต้องการการประเมินของอัตราการเติบโตและการวิเคราะห์ในรูปแบบของแบบจำลองการเติบโตที่สมมติขึ้นซึ่งจะกำหนดค่าเพื่อที่ใช้สำหรับ P ในสมการที่ 15 และ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.4 สมการเอกโปเนนเชียลสำหรับการเติบโตของทรี

ถ้าอัตราการเติบโตถูกควบคุมโดยสมการนิวคลิเอชัน(สมการที่ 3) กฎอัตราสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบง่ายๆ เมื่อสมการสนามไฟฟ้ามีรูปแบบการประเมินของสมการที่ 10 ในกรณีนี้การอินทิเกรตจะนำไปสู่รูปแบบของลอการิทึมสำหรับการเติบโตของทรี

$$L = (V / A) \ln[(tAQ / V) + 1] \quad (20)$$

โดยอัตราการเติบโตจะเท่ากับ

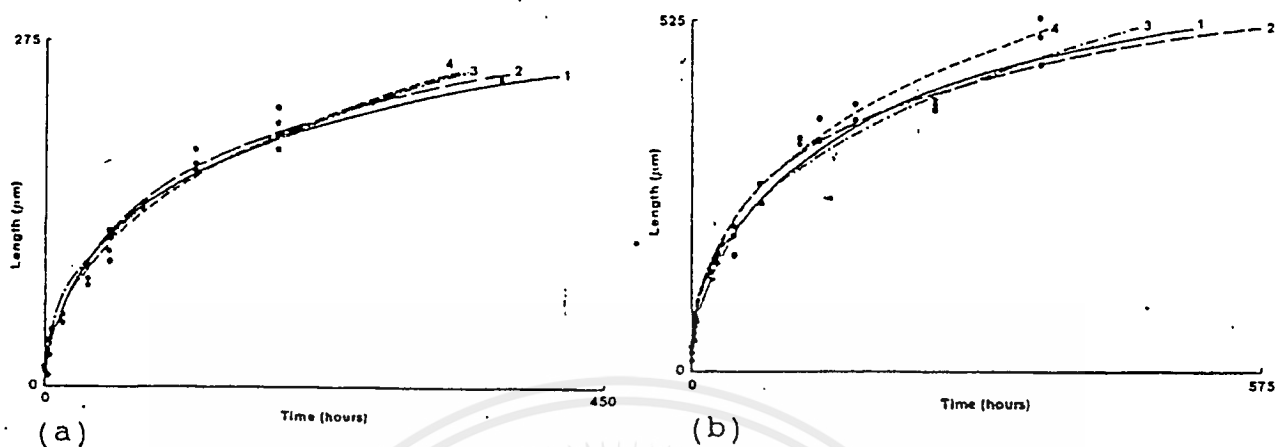
$$\frac{dL}{dt} = Q[(tAQ / V) + 1]^{-1} \quad (21)$$

ณ ที่นี้องค์ประกอบที่มีผลกับอัตราการเติบโตจะถูกแทนที่เวลาโดยองค์ประกอบเหล่านั้นที่ควบคุมองค์ประกอบ A. ไม่มีสมการอย่างง่ายที่จะสามารถพิสูจน์ได้ ถ้า $E_K(L)$ สมการที่ 11 ถูกใช้แทนสมการที่ 10 ในแบบจำลองการเติบโตแบบนิวคลิเอชัน

2.4.3 การวิเคราะห์การเติบโตของทรีที่สังเกตเห็น

การอินทิเกรตของอัตราการเติบโตสมการที่ 2, 3 ซึ่งเป็นการแทนค่าในสมการที่ 4 และ 5 ถูกใช้ในการสังเกตการเติบโตโดยวิธีขององค์ประกอบ A, B และ C ที่สามารถปรับค่าได้ เราได้ใช้สมการสนามไฟฟ้าในสมการที่ 2 เพราะทฤษฎีส่วนใหญ่อนุญาตให้เราสมมติฐานแต่ละกฎการเติบโต แม้ว่าการเป็นเส้นตรงและการขึ้นกับองค์ประกอบอื่นๆ จะถูกรายงาน ยิ่งกว่านั้นการวัดฟังก์ชันของแรงดันแสดงสิ่งนี้เป็นส่วนใหญ่เช่นกัน มันเป็นสิ่งสำคัญที่จะกล่าวว่าเนื่องจากแรงดันที่จ่ายมีค่าคงที่ในการทดลองหรืออื่น การวิเคราะห์จะพิจารณาการขึ้นกับความยาวของการเติบโตของทรีมากกว่าสนามไฟฟ้า เพราะมีองค์ประกอบ C ที่สามารถปรับค่าได้เพียงองค์ประกอบเดียวในแบบจำลองแบบสนามไฟฟ้า สมการที่ 15 และ 16 แสดงให้เห็นว่าการทำให้ดีขึ้นเพื่อที่จะให้เกิดกำลังในทิศทางข้ามของ L จะป้องกันไม่ให้เกิดกำลังอื่นๆ ดังนั้นการเพิ่มกำลังของ E สมการที่ 2 ควรจะทำการประชุมตกลงกันด้วยกฎกำลังในทิศทางข้าม L^{-2}

ก่อนการอธิบายผลลัพธ์ของเราจะกล่าวไว้ 2 ประเด็นเกี่ยวกับวิธีการเติบโตของทรี สิ่งแรกจะว่าด้วยการตีต่างๆ ที่วอเตอร์ทรีเล็กๆ ที่เติบโตอย่างรวดเร็วที่ปรากฏในบางเวลาหลังจากการเติบโตหลักๆ เริ่มต้นขึ้น ในเวลาต่อมาทรีดังกล่าวจะรวมตัวกับการเติบโตหลักและเพิ่มขึ้นที่อัตราเดียวกัน แม้ว่ามันเป็นไปได้ว่าการเติบโตที่กล่าวมานี้ควรจะเริ่มเกิดบนอิลเลคโตรดในเวลาเดียวกันขณะการเติบโตหลักอัตราการเริ่มเติบโตที่รวดเร็วของมันจะปรากฏเพื่อตัดสิ่งนี้ออก ดังนั้นมันสามารถที่จะอ้างได้ว่าการเริ่มเกิดของวอเตอร์ทรีสามารถควบคุมได้โดยโครงสร้างเฉพาะที่ของพื้นที่ของโพลีเมอร์อิลเลคโตรดเหมือนเป็นดังกรณีของอิลเลคทริคอลลทรี แม้ว่าที่นี้อิลเลคโตรดจะไม่



รูปที่ 2.4.3 รูป (a) แสดงข้อมูลเมื่อ $R = 40$ ไมโครเมตร, $\omega = 500$ เฮิรตซ์, ทริสามทรี โดยสมการที่ 4: $A = 0.02093$, $B = 10.3$, $C = 11000$; สมการที่ 5: $A = 0.062$, $B = 13$, $C = 1400$; รูป (b) แสดงข้อมูลเมื่อ $R = 40$ ไมโครเมตร, $\omega = 2000$ เฮิรตซ์, ทริสามทรี โดยสมการที่ 4: $A = 0.0108$, $B = 15$, $C = 57500$, สมการที่ 5: $A = 0.046$, $B = 25$, $C = 5700$ ผลกราฟทางทฤษฎีได้แสดงในรูปที่ 3, 5, 6 และ 7

เป็นโลหะแต่เป็นอิเล็กโตรไลท์ ยิ่งไปกว่านั้นการเริ่มเกิดการเวลาจำกัดแม้ว่าภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้าแรงสูง โครงสร้างที่สำคัญอันดับสองที่ว่าการเติบโตที่สังเกตเห็นจะแสดงให้เห็นความไม่สม่ำเสมอและต่อเนื่องของอัตราการเติบโต

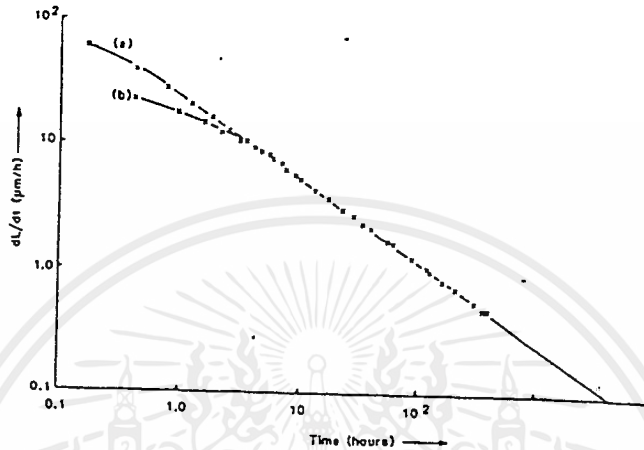
ในการทำแบบจำลองการเติบโตเราเลือกทรีที่มีขอบเขตการเติบโตค่าหนึ่ง ซึ่งมันไม่มีประโยชน์ที่จะดูความไม่สม่ำเสมอของทรีที่เกิดขึ้นหรืออัตราการเติบโต ดังนั้นการอธิบายที่มีอยู่ควรจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติโดยรวมของทรี ตัวอย่างของการทำนี้แสดงในรูปที่ 2.4.3(a) และ 2.4.3(b) เป็นข้อมูลที่รายงานก่อนหน้านี้ และเราได้กล่าวว่าการจำลองทั้งหมดได้แสดงข้อมูลทางการทดลองอย่างเพียงพอ รูปเหล่านี้จะแสดงประกอบการขยายตัวของความยาวของทรีที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เหมือนกันทุกอย่าง แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกสังเกตเห็นที่เติบโตขึ้นที่ความถี่ $\omega = 1500$ เฮิรตซ์ และ 7500 เฮิรตซ์ โดยรัศมีของเข็มที่มีขนาดใหญ่ ($R = 90$ ไมโครเมตร) เราพบว่า

- ก) มีสมการนิวคลีเอชันและสมการสนามไฟฟ้าเป็นที่เพียงพอโดยเท่ากัน
- ข) มันเป็นไปได้ที่จะแยกให้เห็นความแตกต่างระหว่างสมการที่ 4 และ 5 เพราะค่าการวัดของ L จะไม่เข้าใกล้ d
- ค) อะซิมโทดที่เข้าใกล้อัตราเติบโตของกฎกำลังในสมการที่ 18 ได้ตรวจสอบแล้ว ซึ่งแสดงประกอบในรูป

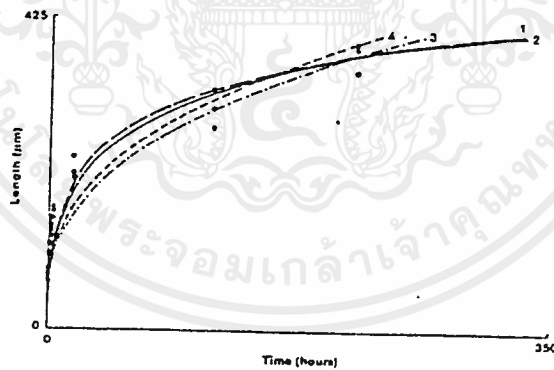
ที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน 2 กรณี แบบจำลองนิวคลีเอชันพบว่าให้ความเหมาะสมดีกว่าแบบจำลองสนามไฟฟ้า ข้อยกเว้นเหล่านี้ จะกำหนดให้ $R = 3$ ไมโครเมตร และตัวอย่างจะแสดงในรูปที่ 2.4.5 เนื่องจากความถี่และความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์เดียวกันได้กำหนดพฤติกรรมด้วยรัศมีของอิเล็กโตรดอื่น ๆ ณะที่ให้ $R = 3$ ไมโครเมตรเช่นเดิม รูปร่างของ



รูปที่ 2.4.4 แสดงอัตราการเติบโตเมื่อ $R = 90$ ไมโครเมตร, $\omega = 2000$ เฮิรตซ์ โดย (a) เป็นสมการที่ 4 (b) เป็นสมการที่ 5

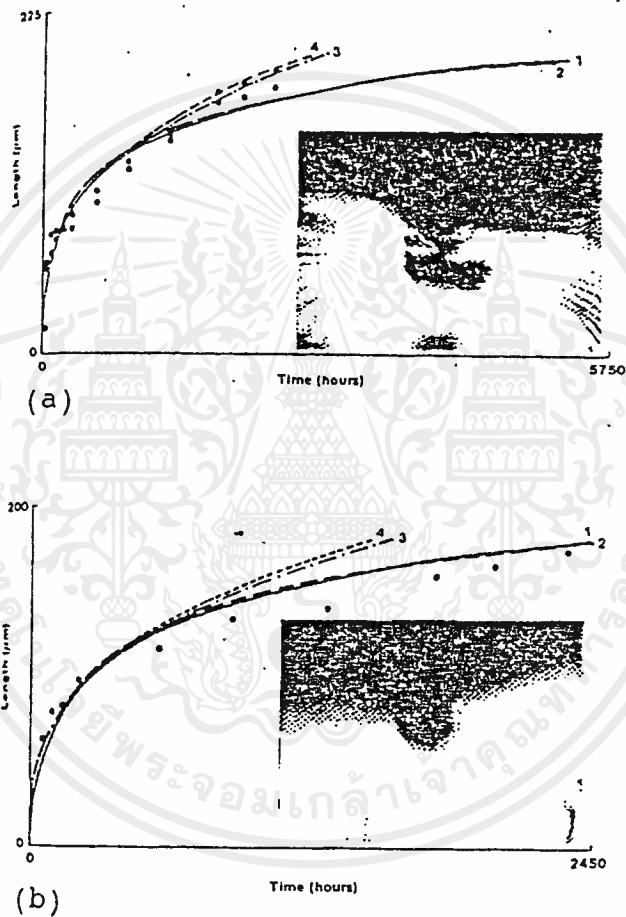


รูปที่ 2.4.5 แสดงข้อมูลเมื่อ $R = 3$ ไมโครเมตร, $\omega = 2000$ เฮิรตซ์, ทรีสามทรี โดย ในสมการที่ 4: $A = 0.013$, $B = 60$, $C = 99000$
สมการที่ 5: $A = 0.065$, $B = 65$, $C = 4500$

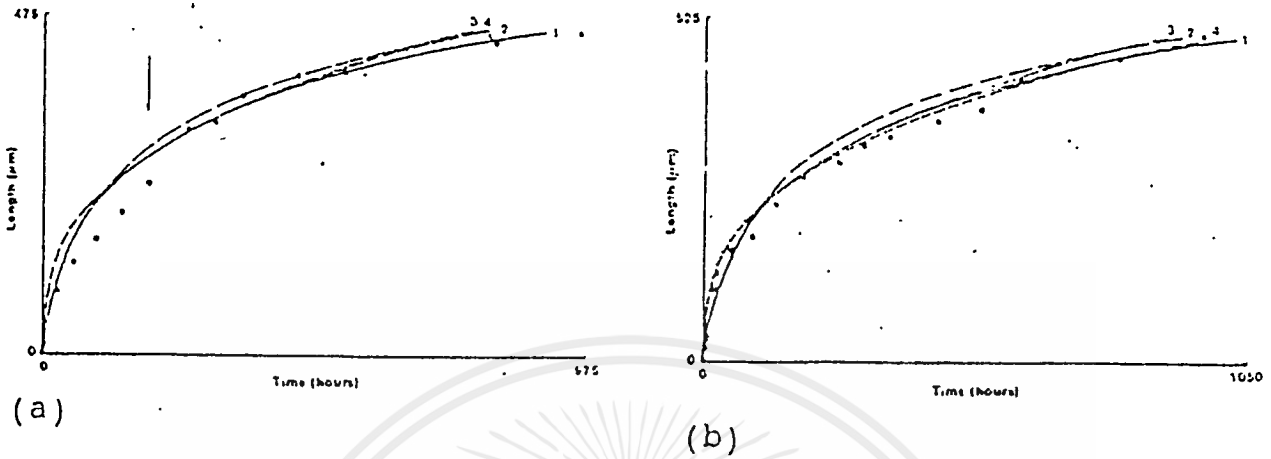
อิเล็กโตรดที่ความถี่ต่างกัน มันดูเหมือนว่าเหตุผลเหล่านี้เหมือนจะรวมกันความเค้นทางกลด้วย อาจกล่าวได้ว่าแบบของพฤติกรรมการเติบโตนี้ได้รายงานในกรณีก่อนหน้านี้แล้ว ทั้งโดยการสังเกตเห็นโดยตรงและการวัดคอเตอร์รี่ในโพสิเอทที่ลีนที่อบเหนียว ดังนั้นมันเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนรูปร่างจะมีอิทธิพลต่อนิวคลีเอชันซึ่งเป็นอัตราที่จะพิจารณาขั้นตอนในบางกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะทำการทดสอบอย่างละเอียดมากกว่านี้เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่ดีขึ้น เรามี 2 กรณีที่จะพิจารณาค่า A, B และ C จากข้อมูลทำการทดลองใน 800 ชั่วโมง และใช้ค่าเหล่านี้ในการทำนายความยาวของทรีเดียวกัน สำหรับการทดลองที่ใช้เวลาทดลองถึง 2500 ชั่วโมง ผลในรูปที่ 2.4.6 แสดงถึงพฤติกรรมที่ขัดแย้งกันกับกรณีแรก รูปที่ 2.4.6(a) แบบจำลองสนามไฟฟ้า(L-2) แสดงให้เห็นได้ดีกว่าแบบจำลองนิวคลีเอชัน สำหรับกรณีที่สอง รูปที่ 2.4.6(b) ตรงข้าม



รูปที่ 2.4.6 รูป (a) แสดงข้อมูลเมื่อ $R = 10$ ไมโครเมตร, $\omega = 50$ เฮิรตซ์ใช้เวลา 2500 ชั่วโมง พบทรีสองทรี จากสมการที่ 4: $A = 0.025$, $B = 1.6$, $C = 900$ สมการที่ 5: $A = 0.105$, $B = 2.2$, $C = 80$ รูป (b) แสดงข้อมูลเมื่อ $R = 12$, $\omega = 50$ เฮิรตซ์ ปรากฏทรีหนึ่งทรี จากสมการที่ 4: $A = 0.025$, $B = 1.9$, $C = 1150$, สมการที่ 5: $A = 0.1$, $B = 2.7$, $C = 115$ แบบจำลองนี้ใช้เวลาทดสอบ 800 ชั่วโมง



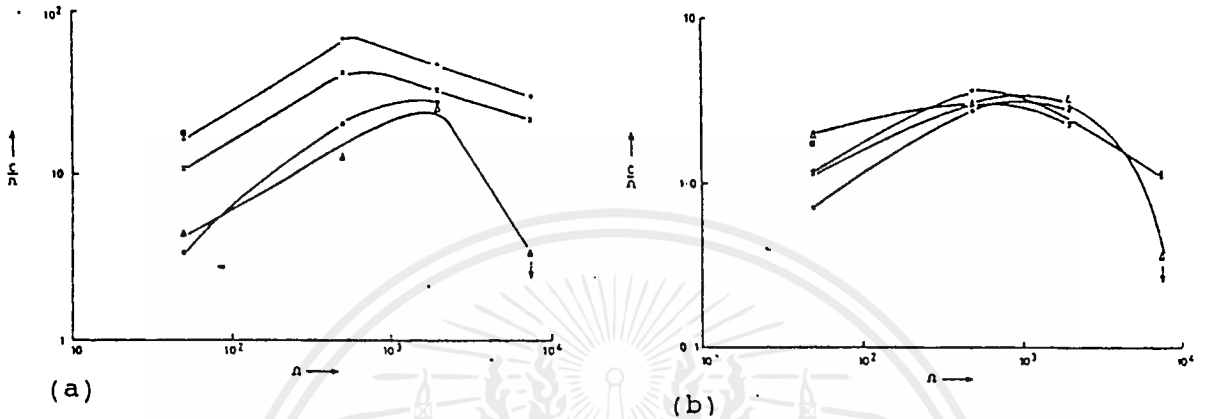
รูปที่ 2.4.7 รูป (a) แสดงข้อมูลเมื่อ $R = 8$ ไมโครเมตร, $\omega = 1500$ เฮิรตซ์ จะพบทริทหนึ่งทริ ถูกตรวจจะแสดงเวลาที่ซึ่งทริสมมาตรอย่างรวดเร็ว โดยสมการที่ 4: $A = 9 \times 10^{-3}$, $B = 7$, $C = 40000$, สมการที่ 5: $A = 0.039$, $B = 7$, $C = 1800$ รูป (b) แสดงข้อมูลเมื่อ $R = 10$ ไมโครเมตร, $\omega = 1500$ เฮิรตซ์ ปรากฏทริหนึ่งทริ โดยสมการที่ 4: $A = 9 \times 10^{-3}$, $B = 7$, $C = 38000$ สมการที่ 5: $A = 0.0405$, $B = 7$, $C = 1800$

กับความเป็นจริง การปรากฏให้เห็นของทริที่ 2500 ชั่วโมงซึ่งถูกแสดงเหมือนในรูปภาพประกอบเล็กๆ ไม่ได้แสดงเหตุผลของความแตกต่างนี้มากกว่ารูปแบบการกระจายของมัน การเปลี่ยนแปลงกฎการเติบโตนี้สามารถชี้ให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจริงในกลไกการเติบโต ถ้ามันเริ่มเกิดในสภาวะแวดล้อมและสภาพโครงสร้างที่แตกต่างกัน

รูปแบบอื่นๆ ของการเติบโตของทริที่สังเกตได้ที่นี่เป็นชนิดที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งการเพิ่มขึ้นจะอยู่ในอัตราที่ช้ามาก คืออยู่ระหว่าง 100 ถึง 400 ชั่วโมง ซึ่งสามารถเห็นได้ในรูปที่ 2.4.6 พฤติกรรมนี้ได้กำหนดให้ $\omega = 1500$ เฮิรตซ์, $R = 8$ ไมโครเมตร ที่แสดงในรูปที่ 2.4.7 และด้วยผลลัพธ์นี้มันพิสูจน์ความไม่สามารถเป็นไปได้ที่จะใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการแยกให้เห็นความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทั้งสองที่มีการทดสอบในเวลาจำกัด การเปรียบเทียบในรูปที่ 2.4.6 แสดงให้เห็นว่ามันใช้เวลาที่มากกว่า 800 ชั่วโมงที่จะปรากฏเห็นความแตกต่างระหว่างการทำนายของทั้งสองแบบจำลอง มันควรจะกล่าวไว้ว่าอัตราการเติบโตที่ใช้เวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมง ในรูปที่ 2.4.7 สามารถอธิบายได้ดีกว่าโดยวิธีของแบบจำลองนิวคลีโอชัน จุดนี้ไม่สามารถตรวจสอบด้วยข้อมูลของ S.T.L. ได้เพราะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ระหว่างระยะเวลาช่วงนี้ แต่ข้อมูลอื่นซึ่งแสดงการทำงานที่ดีขึ้นของแบบจำลองแบบนิวคลีโอชันในเวลาอันสั้นเหล่านี้

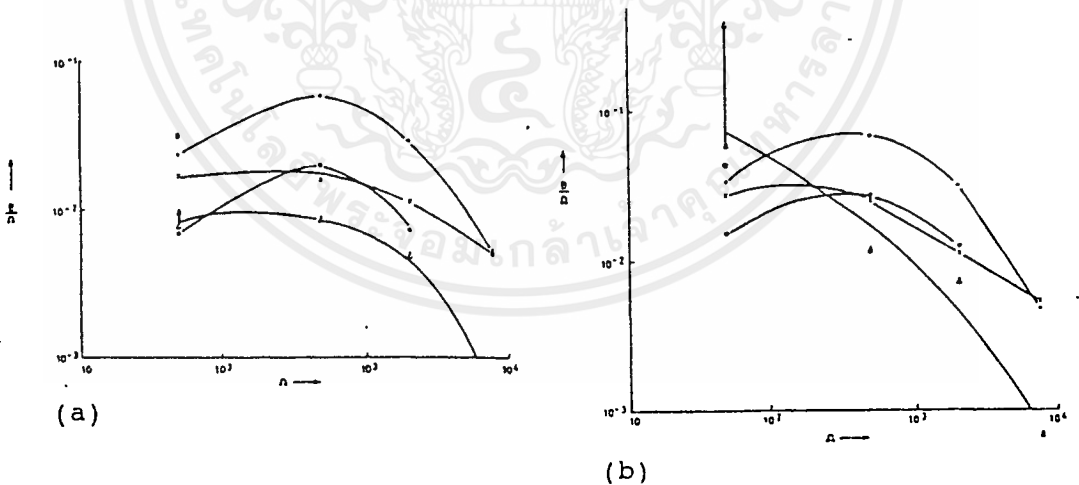
ในรูปที่ 8, 9 และ 10 เราได้รายงานการขึ้นกับความถี่ของ C/ω , B/ω และ A ในรัศมีมีความโค้งต่างกัน และสมการที่ 4 และ 5 เหตุผลหลักอยู่ที่อัตราการเติบโตเริ่มต้นซึ่งถูกควบคุมโดย C และ B เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความถี่ สิ่งนี้ทำตามข้อสรุปที่ง่ายขึ้นว่าการขึ้นกับความถี่ของการเติบโตของวอเตอร์ทรินี้ไม่สามารถอ้างถึงการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในสนามไฟฟ้า ข้อมูลทั้งหมดแสดงหลักฐานสำหรับองค์ประกอบหลักในอัตราการเติบโต

เริ่มต้น อย่างไรก็ตามองค์ประกอบ A ในแบบจำลองที่ทดสอบจะขึ้นอยู่กับความถี่เป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะแสดงการลดลงเล็กน้อยเท่านั้น ในการแสดงการเติบโตที่ไม่สม่ำเสมอที่สังเกตจากตัวอย่างทั้งหมดที่ $\omega = 1500$ เฮิร์ตซ์ ที่เป็นผลจากการวิเคราะห์ทั้งหมดนี้ค่อนข้างจะต่ำกว่าค่าที่คาดหวังไปบ้างซึ่งจะไม่เกี่ยวข้องกับจุดเหล่านี้ มันดูเหมือนที่



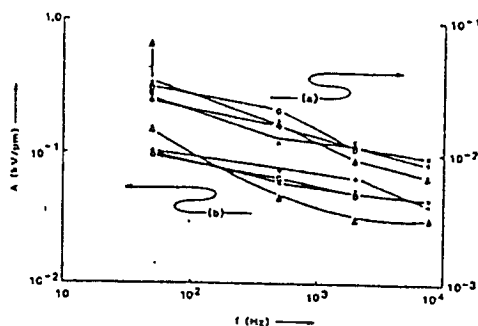
รูปที่ 2.4.8 แสดงค่าความขึ้นกับค่าถี่ของ C/ω

รูป (a) เป็นสมการที่ 4 รูป (b) เป็นสมการที่ 5 โดย + จะใช้ $R = 3$ ไมโครเมตร, x จะใช้ $R = 10$ ไมโครเมตร, o จะใช้ $R = 40$ ไมโครเมตรที่ ความเข้มข้น 0.1 โมล, Δ จะใช้ $R = 90$ ไมโครเมตรที่ ความเข้มข้น 1 โมล, \square จะใช้ $R = 10$ ไมโครเมตรที่ความเข้มข้น 1 โมล



รูปที่ 2.4.9 แสดงค่าความขึ้นกับค่าถี่ของ B/ω

รูป (a) เป็นสมการที่ 4 รูป (b) เป็นสมการที่ 5



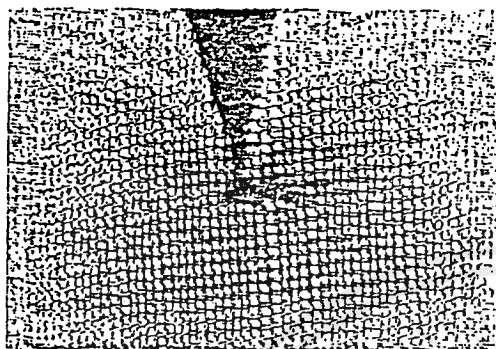
รูปที่ 2.4.10 แสดงค่าความถี่กับความถี่ของ A โดย
รูป (a) สมการที่ 4 รูป (b) สมการที่ 5

จะเป็นไปได้ว่า ความเค้นในกรณีเหล่านี้มีอิทธิพลต่อกลไกนิวเคลียสเอชซึ่งจะพิจารณาอัตราการเติบโต ซึ่งกำหนดให้อัตราการเติบโตเริ่มต้นถูกควบคุมโดยสภาพของจุดเริ่มต้นในระยะเวลาที่นานกว่าในแบบจำลองสนามไฟฟ้า ได้มีการบันทึกว่าอัตราการเติบโตที่ช้าถูกพบที่ความถี่ 1500 เฮิรตซ์ในการทดสอบเคเบิลขนาดเล็ก มันสังเกตได้ว่าในจำนวนกรณีต่างๆ การเติบโตมักจะหยุดอย่างรวดเร็วและไม่สามารถอธิบายโดยแบบจำลองทั้งสองได้

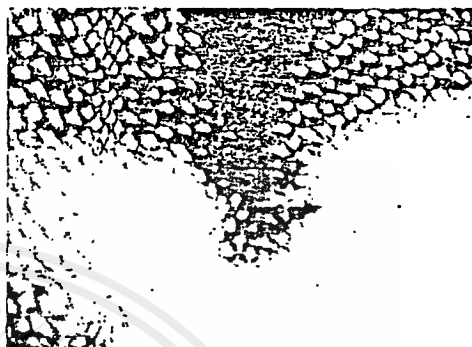
2.4.4 การพินิจพิจารณา

การวิเคราะห์เราได้แสดงให้เห็นว่าสำหรับข้อมูลการทดลองส่วนใหญ่ การเติบโตของทริที่ความถี่ต่างๆ สามารถอธิบายโดยอัตราการเติบโต L^{-2} จากสมการที่ 4 และ 5 ซึ่งมีความเท่ากับสมการอัตราสนามไฟฟ้ากำลังสอง พบว่าสมการ L^{-1} ยังดีไม่เพียงพอ ผลเหล่านี้แตกต่างจากการกำหนดในการอ้างอิงจากการพิจารณาจากรูปภาพของอัตราการขยายตัวของทริซึ่งสอดคล้องกับค่าของ R และ ω เหตุผลหนึ่งของความแตกต่างนี้อาจจะเป็นจำนวนความโค้งเล็กๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ตอนแรก เพราะแม้ว่าด้วยค่าเดียวกันที่กำหนด องค์ประกอบต่างๆ ที่ควบคุมได้เหมือนกับ R , d , ω , V , อิเลคโตรไลต์ ฯลฯ อัตราการขยายตัวควรจะเปลี่ยนจากทริหนึ่งไปยังทริอื่นๆ ความเชื่อถือของนิวเมอริคอลลินเทเกรต(numerical integration) ที่แสดงการทำงานจะดีกว่า เพราะ (1) แต่ละสภาพของจำนวนของทริที่มีขนาดใหญ่จะมีส่วนเกี่ยวข้อง (2) การวิเคราะห์นำไปสู่เหตุผลการมีอยู่ของอัตราการเติบโตเริ่มต้นที่ไม่จำกัดซึ่งไม่อยู่ในกรณีการศึกษาก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามมันไม่สามารถเป็นไปได้ที่จะยืนยันอย่างแน่นหนาว่าสมการอัตราอยู่ในรูปแบบสนามไฟฟ้ากำลังสอง แม้ความจริงที่ว่าข้อมูลของเราได้มาจากการวัดบนทริ ความผิดพลาดก็ยังมีขนาดใหญ่เกินไป ยิ่งกว่านั้นสมการเส้นตรงใน $E_x(L)$ ในสมการที่ 6 จะแสดงถึงพฤติกรรมของ L^{-2} ด้วย การแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถทำได้โดยการปรับค่าแรงดันที่จ่ายเท่านั้น และการศึกษาข้อมูลอ้างอิงจะแสดงอัตราการเติบโตที่เป็นปฏิภาคกับ V^2 ผลที่ได้มาโดยการวัดทริไม่เป็นที่นิยมของการขึ้นกับแรงดันด้วย ยิ่งไปกว่านั้นเนื่องจากการอินทิเกรตทางนิวเมอริคอลลินเทเกรตด้วย $E_a^2(L)$ และ $E_m^2(L)$ อัตราการเติบโตเริ่มต้นจึงถูกกำหนดแบบ CV^2/R^2 แต่ถ้าอัตราถูกควบคุมโดย $E_x(L)$ แล้วอัตราเริ่มต้นควรจะเป็น $C_k V/R$ โดย C_k เป็นการขึ้นกับ R ในกรณีนี้การวิเคราะห์ของเราให้ค่าของ C มีค่า

เท่ากับ $C_k V/R$ ซึ่งเพิ่มขึ้นด้วย R ในข้อขัดแย้งที่มีแนวโน้มจะสังเกตเห็นได้แสดงในรูปที่ 8 บนพื้นฐานของหลักฐานที่เห็นอยู่แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 6 ไม่สามารถนำไปปฏิบัติได้



(a)



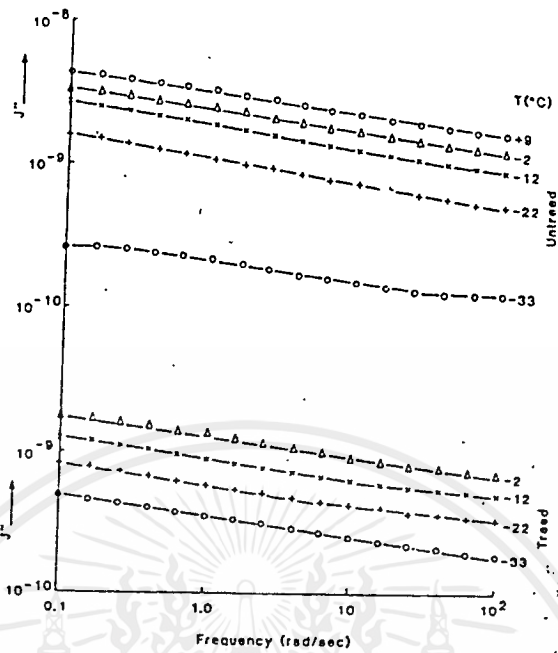
(b)

รูปที่ 2.4.11 รูป (a) ทริที่เกิดจากความเค้นที่ใช้เวลาประมาณ 300 ชั่วโมง

รูป (b) แสดงทริชนิดเดียวกันที่ใช้เวลาประมาณ 2000 ชั่วโมง

รูปแบบทั่วไปของการอธิบายการเติบโตของวอเตอร์ทริที่ว่า แม้ว่าอัตราการเติบโตจะขึ้นอยู่กับสภาวะในพื้นที่ที่เกิดทริ ในบางขั้นตอนอัตราการเติบโตกลายเป็นคุณสมบัติโดยรวมของทริที่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ L^2 ในจำนวนกรณีนี้ค่ากำลังสองของขนาดของวอเตอร์ทริที่ขึ้นของผลเฉลยวิธีหาค่าที่หึงงของที่หรือจาเขยที่แก้ที่ขั้วของอัตราที่นำมาพิจารณาเป็นขั้นตอนในอัตราที่เป็นผลรวมของวัสดุบนพื้นที่ของการเติบโต สภาวะภายใต้สิ่งนี้ปรากฏดูเหมือนจะเกี่ยวข้องกับรูปร่างของระบบและรูปแบบของการจับตัวในขบวนการเค้น

การเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ C และ B ด้วยการลดค่ารัศมีความโค้งจะแสดงถึงการเกี่ยวข้องบางประการของความเค้นทางกลในกลไกการเติบโต เนื่องจากอิทธิพลของความเค้นทางกลบนการเติบโตของทริเป็นที่รู้จักและความเค้นที่ก่อให้เกิดทริจะไม่เกี่ยวข้องกันการวิเคราะห์นี้ มันดูเหมือนว่าการเกี่ยวข้องกันนี้ควรจะเป็นของชนิดลักษณะโดยแท้ (Intrinsic nature) ในการสนับสนุนข้อสรุปนี้เป็นการสังเกตให้เห็นว่าทริซึ่งเติบโตในสภาวะก่อดัวของความเค้นโดยใช้เวลา 300 ชั่วโมงสามารถเอาชนะความเค้นที่สร้างขึ้นและเริ่มที่จะเติบโตตามปกติในที่สุด ดังรูปที่ 2.4.11(a) และ 2.4.11(b) ข้อสรุปที่ว่า การเติบโตของทริสามารถมีอิทธิพลต่อความเค้นทางกลของมันเองได้เท่ากับกับความเค้นในทางตรงกันข้าม บางคนแนะนำว่ากลไกการเติบโตของวอเตอร์ทริสามารถที่จะดูเหมือนการ



รูปที่ 2.4.12 แสดงองค์ประกอบสูญเสียของ J ในวัสดุที่เกิดทรีและไม่เกิดทรี ที่อุณหภูมิระหว่าง -33°C และ 9°C

ลักษณะการแตกหักภายใต้การกระทำของความดันทางแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากน้ำมันโพลีเมอร์ ตามความจริง อันตรายทางกลที่เกิดจากสนามไฟฟ้าจะไม่เป็นตัวนำในการขยายตัวของช่องที่มีน้ำอยู่ (water-filled channel) เหมือนที่สมมติฐานขึ้นก่อนหน้านี้ แต่จะประกอบไปด้วยการยึดและหดตัวในบางที่เหมือนกับเป็นช่องว่างหรือเป็นชนิดของรอยร้าว การสังเกตเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของโมเลกุลจะลดความยาวของทรีได้จะเป็นตัวสนับสนุนข้อคิดเหล่านี้ ในสภาพแวดล้อมเหล่านี้อัตราการเติบโตควรจะเกี่ยวข้องกับพลังงานที่เพิ่มขึ้นโดยสนามไฟฟ้า ในการเสียรูปของวัสดุจนวน ดังนั้น C/ω และ B/ω จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานต่อรอบซึ่งเคลื่อนย้ายจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการเสียรูป จุดสูงสุดของการขึ้นกับความถี่ดูแสดงในรูปที่ 2.4.7 และ 2.4.8 ประมาณ 1 กิโลเฮิรตซ์ ควรจะเกี่ยวข้องกับค่าสูญเสียสูงสุดในขบวนการผ่อนคลายทางโครงสร้างและมันควรจะกล่าวว่าการขนาดของมันจะแปรไปตามความถี่และวอเตอร์ทรีอิ่ง เนื่องจากผลตอบสนองทางกล เว้นเสียแต่รูปแบบบางอย่างของการไอออไนเซชัน (ionization) หรืออิเล็กโตรเคมิคอล (electrochemical) เกี่ยวข้องด้วย อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถที่จะตรวจสอบสิ่งนี้โดยการวัดบนวัสดุที่เกิดทรีอิ่ง ในรูปที่ 2.4.12 เราแสดงผลของการวัดที่ทำที่ความถี่ขนาด 10^{-2} เเรเดียนต่อวินาที ถึง 10^2 เเรเดียนต่อวินาที ที่อุณหภูมิ -33°C ถึง 9°C ที่อุณหภูมิทั้งหมดจุดสูงสุดของส่วนประกอบการสูญเสียของ J จะนำไปสู่ความถี่ที่ต่ำกว่า ขณะที่ไม่มีหลักฐานบางอย่างของขบวนการสูญเสียที่ความถี่ที่สูงกว่า ถ้าขบวนการต่อมาสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าอัตราการผ่อนคลายทางไดอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับการอุณหภูมิอย่างอ่อนๆ เท่านั้น ความเป็นไปได้อื่นๆ จะเป็นกลไกการสูญเสียทางกลที่สังเกตได้ภายใต้ความถี่ต่ำกว่า 150 เกลวิน ภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวถึงไดอิเล็กตริกจะเริ่มต้นด้วยความไม่บริสุทธิ์

ของพื้นที่ภายในแผ่นบางๆ ซึ่งทำให้เสียรูปโมเลกุลที่ยึดติดกันเมื่อมีการตอบสนองทางไดอิเล็กตริก แต่เป็นเพียงผลตอบสนองอย่างอ่อนที่จะทำให้เกิดแรงทางกลเท่านั้น

บทพื้นฐานของข้อตกลงเหล่านี้ค่าคงที่ของ C และ B จะมีรูปแบบเป็น

$$C \propto B \propto \omega \chi''(\omega) \quad (22)$$

เมื่อค่าคงที่ที่เป็นสัดส่วนกันบางที่จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ที่เกิดระหว่างขบวนการโพลาไรเซชันซึ่งในทางเรขาคณิตที่ศึกษาอาจจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ในอ่างเก็บน้ำ รูปที่ 2.4.8 และ 2.4.9 แสดงให้เห็นในกรณีที่วัดการเพิ่มค่าโมลในอัตราส่วน 10:1 โดยกำหนดให้เพิ่มเพียง 1.6:1 ในอัตราคงที่ แม้ว่าอัตราการเติบโตเป็นที่รู้ว่าจะสูงสุดจะขึ้นกับความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ของมันเอง ผลที่กล่าวมาข้างต้นด้วยทรีที่สังเกตได้โดยตรงแสดงให้เห็นว่าการขึ้นกับสิ่งต่างๆ จะยังคงที่ที่ค่าหนึ่งของโซเดียมคลอไรด์ การบันทึกนี้จากประสบการณ์ของเราในกรณีของโรโกวสกี (Rogowski) ที่แสดงสิ่งที่รบกวนและนำเราไปสู่การอ้างอิงที่ว่าผลเหล่านี้จะทำให้การวัดของการขึ้นกับความเข้มข้นในที่ที่ไม่เปลี่ยนระดับมีค่าต่ำกว่าการขึ้นกับรากที่สอง

เราพูดได้ว่าการตรวจสอบให้เห็นจุดสูงสุดของ C/ω เป็นพื้นฐานของการเกิดขึ้นที่รัศมีความโค้ง ในกรณีของ B/ω ข้อมูลค่อนข้างที่จะคลุมเคลือมากกว่าและอาจจะเกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของไดอิเล็กตริก สิ่งนี้ไม่ขัดแย้งกับกลไกของขบวนการนิวคลีเอชัน เพราะองค์ประกอบพรีเอกโปเนนเชียลของแบบจำลองนี้ถูกพิจารณาโดยอัตราของการรวบรวมบนพื้นผิวของนิวเคลียสซึ่งได้รับมาจากการขึ้นหรือลงที่ละน้อยของพลังงานอิสระ และเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของค่าเปอร์มิติวิตี องค์ประกอบเอกโปเนนเชียลจะให้ความน่าจะเป็นของขบวนการนิวคลีเอชันสำเร็จด้วย A ซึ่งเป็นปฏิภาคกับการกั้นพลังงานอิสระและค่าเปอร์มิติวิตีของพื้นที่ที่เกิดทรี

2.4.5 ข้อสรุป

อัตราการเติบโตของทรีซึ่งพิจารณาโดยทางเรขาคณิตของพื้นที่ที่เกิดจะเข้าใกล้การขึ้นกับ L^{-2} ในสภาพการทดลองที่ทำอยู่ตอนนี้ พฤติกรรมนี้จะเท่าเทียมกับกฎการเติบโตแบบสนามไฟฟ้า แต่แบบจำลองแบบเอกโปเนนเชียล (นิวคลีเอชัน) ไม่สามารถถูกมองข้ามไปได้ มันแสดงให้เห็นว่าการขึ้นอยู่กับความถี่ของอัตราการเติบโตไม่สามารถกำหนดการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กตริกโดยทรีซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนไปของการขึ้นกับทรีของความแข็งแรงของสนามไฟฟ้าสำหรับทรีที่มีขนาดใหญ่เพียงพอ อัตราคงที่ที่ได้รับเป็นค่าความขึ้นอยู่กับความถี่และผลของการวิเคราะห์จะนำเชื่อถือด้วยกลไกของจุดเริ่มต้นของไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุของช่องว่างเล็กๆ และรอยแตกที่แกนกลางและเติบโตขึ้น ในกรณีทั่วไปอัตราการขยายตัวของอันตรายดูเหมือนกำลังจะถูกจำกัด แต่ในกรณีบางอย่างซึ่งบรรยายลักษณะโดยใช้เรขาคณิตของการเริ่มต้นและความเค้นทางกลซึ่งจะเป็นอัตรานิวคลีเอชันที่ช้าที่สุด

บทที่ 3

การผลิตสายตัวนำที่ใช้ในฉนวนครอสลิงค์โพลีเอททีลีน

3.1 การพัฒนาของสายตัวนำแรงสูงฉนวนแบบฉุด(extruded power cable)

ในขณะที่เรามีสายตัวนำแรงสูงฉนวนแบบฉุดใช้อยู่หลายชนิด เช่น สายที่ใช้ฉนวนเป็นยางบิลทีล (butly rubber), ยางเอทีลีน-โพรพิลีน (ethylene-propylene rubber), โพลีเอทีลีน (polyethylene) และครอสลิงค์โพลีเอททีลีน (crosslinked polyethylene, XLPE) และยังมีสายฉนวนน้ำมัน (superceded oil-filled) ที่ใช้สำหรับแรงดันระดับต่ำและปานกลาง

สายที่ใช้ยางบิลทีลเป็นฉนวน จะประกอบด้วยยางบิลทีลเป็นฉนวนแล้วหุ้มด้วยคลอโรพรีน(Chloropren) หรือเปลือกหุ้มป้องกันชนิดไวนิล(vinyl protective sheath) เพราะมีความต้านทานต่อความร้อน, น้ำ, โอโซน ฯลฯ ได้ดี ยางบิลทีลเป็นฉนวนที่เหมาะสมในสายตัวนำไฟฟ้าแรงสูง ฉนวนชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้มากกว่าสายตัวนำที่ใช้ยางธรรมชาติหรือกระดาษในแรงดันระดับ 600 โวลต์ ถึง 77 กิโลโวลต์ เนื่องจากมีความสามารถในการใช้ในที่เปียกชื้น, อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิต่ำได้ จึงนิยมมาใช้กับสถานที่ใต้น้ำที่ระดับแรงดันที่ต่ำกว่า 44 กิโลโวลต์มานานกว่า 15 ปีแล้ว แต่มักจะเกิดจุดบกพร่อง(fault) ขึ้น เนื่องจากการเกิดขึ้นของวอเตอร์ทรี(water tree) และเคมีคอลทรี (chemical tree) ซึ่งปัญหาเหล่านี้ไม่ค่อยพบในสายตัวนำชนิดโพลีเอททีลีน(Polyethylene, PE) และครอสลิงค์โพลีเอททีลีน แต่ในปัจจุบันสายตัวนำชนิดนี้ยังใช้กันอยู่ เพราะเนื่องจากการประหยัด

เอททีลีนโพรพิลีนโคโพลีเมอร์(ethylene propylene copolymer, EPM) และเอททีลีนโพรพิลีนไดน์เทอร์โพลีเมอร์(ethylene propylene dien terpolymer, EPDM) ถูกแทนที่โดยยางเอทีลีนโพรพิลีน (ethylene propylene rubber, EP rubber) ซึ่งเอททีลีนโพรพิลีนโคโพลีเมอร์เป็นฉนวนโพลีเมอร์อิมิตัวที่มีความต้านทานต่อโอโซน, สถานอากาศ และสารเคมีเป็นอย่างดี และมีลักษณะทางไฟฟ้าที่ดี และเป็นตัวต้านทางที่ดีในอุณหภูมิต่ำ เมื่อนำมาผ่านขบวนการวัลคาไนเซชัน(Vulcanization) จะได้สารเอททีลีนโพรพิลีนไดน์เทอร์โพลีเมอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติสูงกว่าเอททีลีน-โพรพิลีนโคโพลีเมอร์ ผู้ผลิตในอเมริกาบางรายได้ให้ความสนใจในการผลิตสายตัวนำที่ใช้สารเอททีลีนโพรพิลีนไดน์เทอร์โพลีเมอร์ เพราะพวกเขาว่าสายแบบยางเอทีลีนโพรพิลีนหุ้มลีดซีท(Ethylene propylene rubber-lead sheath) มีคุณสมบัติดีกว่าสายแบบกระดาษเปเปอร์ลีด (Paper-lead) ในด้านการใช้งานที่สถานะต่างๆ

สายตัวนำที่ใช้ฉนวนแบบฉนวนครอสลิงค์โพลีเอททีลีน (Noncross-linked polyethylene-insulated cable) ถูกใช้งานในประเทศฝรั่งเศสโดยเฉพาะสายตัวนำระดับแรงดันสูงพิเศษ(Extra-Highvoltage, EHV) ถึงแม้ว่าสายแบบครอสลิงค์จะถูกใช้ในหลายประเทศ เนื่องจากอุณหภูมิในการใช้งานสูงกว่า คือ สายแบบครอสลิงค์ใช้งานที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ส่วนในสายแบบโพลีเอททีลีนจะใช้งานที่ 70 องศาเซลเซียส และสายโพลีเอททีลีนจะง่ายต่อการเกิดพลาสมาเสียดสี(Partial discharge) ซึ่งจะทำให้เกิดรูเล็กๆ ในสายตัวนำ

โพลีเอททีลีนเป็นฉนวนที่ดีสำหรับสายตัวนำแบบบริด แต่สายแบบครอสลิงค์โพลีเอททีลีนจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านความคงที่ของอุณหภูมิ ส่วนคุณสมบัติอื่นก็มีลักษณะคล้ายกันเกือบทั้งหมด โมเลกุลโพลีเมอร์สามารถทำเป็นครอสลิงค์ได้โดยปฏิกิริยาทางเคมีหรือโดยรังสีแกมมา หรือลำแสงอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง การทำครอสลิงค์โพลีเอททีลีนจะเริ่มด้วยการเพิ่มสารเปอร์ออกไซด์(peroxide) ลงไปในโพลีเอททีลีน และผ่านขบวนการวาคาไนซ์ในเวลา 1 นาทีที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสในท่อไอน้ำหลังจากการฉีด ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการทำครอสลิงค์ที่นิยมใช้กันในการทำสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีน

ในอดีตสายตัวนำจะใช้ฉนวนเพียงอย่างเดียว(single layer) แต่ในปัจจุบันจะใช้แบบหลายชั้น เช่น แบบสองชั้นโดยประกอบด้วยคอนดักเตอร์ชีลด์(conductor shield) และฉนวน และยังมีแบบสามชั้นซึ่งประกอบด้วยคอนดักเตอร์ชีลด์, ฉนวน และอินซูลเลเตอร์ชีลด์(insulator shield) โดยการผลิตจะทำการผลิตอย่างต่อเนื่องโดยเรียกว่า "ขบวนการทริเปิลเอกทรูชัน(triple extrusion process)" และใช้คาร์บอนฟิลเซมิคอนดักเตอร์(carbon-filled semiconductor) เป็นคอนดักเตอร์และอินซูลเลเตอร์ชีลด์ เพื่อให้ทำพื้นผิวและการพันของตัวนำแน่นขึ้น

สายตัวนำครอสลิงค์โพลีเอททีลีนแบบฉีดมีข้อบกพร่อง ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเบรคดาวน์ ซึ่งจุดบกพร่องประกอบด้วย ความขรุขระจุดที่ยื่นของพื้นผิวสิ่งแปลกปลอมและช่องว่างเล็กๆ ในเนื้อฉนวน ซึ่งการป้องกันการเกิดสิ่งแปลกปลอมได้โดยการให้ความดูแลในขบวนการผลิต โดยจะต้องทำในระบบปิด (Closed system) และในการใช้เม็ดโพลีเอททีลีนจะต้องมีตัวตรวจจับโลหะก่อนเข้าระบบการผลิต และเพื่อลดความขรุขระของผิวโดยการใส่คอนดักเตอร์ชีลด์และการออกแบบหัวฉีด และพัฒนาขบวนการผลิตและเพื่อการลดจำนวนช่องว่าง โดยการทำขบวนการครอสลิงค์และขบวนการหล่อเย็น

ข้อได้เปรียบอีกประการของขบวนการเอกทรูชัน(extrusion) คือสามารถเพิ่มความเร็วในขบวนการผลิต ซึ่งมีหลายวิธี เช่น ขบวนการควายไทย์เคอริง(dry type curing process) ซึ่งจะตรงข้ามกับขบวนการสตีมเคอริง(steam curing process) ซึ่งการผลิตเหล่านี้จะลดช่องว่างเล็กๆ ในเนื้อฉนวน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสายในการใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง

สายที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าในระดับ 15 ถึง 46 กิโลโวลต์ ที่ใช้ในอเมริกานั้น ในปัจจุบันนี้ใช้สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีน สายไฟชนิดนี้จะได้รับการใช้อย่างกว้างขวาง โดยจะเข้ามาแทนสายที่ใช้ฉนวนเป็นกระดาษขุ่นน้ำมัน สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนนั้นไม่ต้องการความดันของน้ำมันและอุปกรณ์เพิ่มเติม ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ระบบแรงดัน 115 และ 138 กิโลโวลต์ ถูกติดตั้งต่อมา

สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนเป็นสายที่ง่ายในการติดตั้งและง่ายต่อการเชื่อมต่อ ไม่ต้องการทักษะในการทำงานมากก็สามารถทำงานได้ และมีความคงทนต่อสภาพอากาศมากกว่าสายชนิดอื่นๆ สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนไม่ต้องการอุปกรณ์เพิ่มต่างๆ ช่วยในการติดตั้งและใช้งานสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนนี้สามารถฝังได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นๆ เพิ่ม และสามารถใช้ช่วงแรงดันระดับสูงๆ เช่น 138 กิโลโวลต์ หรืออาจ จะถึง 345 กิโลโวลต์

การเพิ่มระดับแรงดันเป็นจุดประสงค์หลักในการพัฒนาสายชนิดนี้ และการเพิ่มความจุกระแส (Current capacity) ในประเทศแถบยุโรปได้ใช้สายโพลีเอททีลีนที่ระดับแรงดัน 225 กิโลโวลต์ ถึง 600 เมกกะวา(MVA) (1200 ตารางมิลลิเมตร ตัวนำอลูมิเนียม) และสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนที่ระดับแรงดัน 110 กิโลโวลต์ ถึง 300 เมกกะวา (600 ตารางมิลลิเมตร ตัวนำทองแดง)

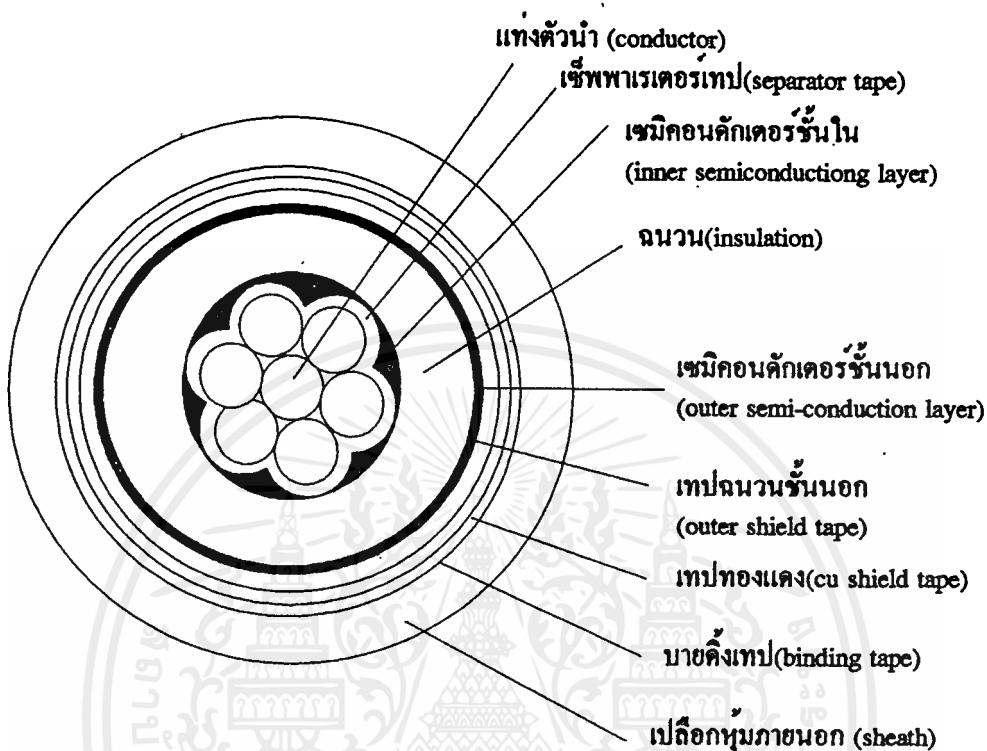
3.2 คุณสมบัติของสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีน

- การแสดงออกทางไฟฟ้า(Electrical performance) ดีมาก และค่าเบรคดาวน์(breakdown) และความต้านทานจะสูงมาก ค่าไดอิเล็กตริกคอสแทนเจนท์(dielectric loss tangent) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่ามาก
- เทอร์มอลริซิสติวิตี(Thermal resistivity) จะต่ำ สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนจะสามารถทำงานต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงสุด 90 องศาเซลเซียสได้ เพราะมีคุณสมบัติที่ทนต่อความร้อนดีมาก ดังนั้นจะสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าสายนอนครอสลิงค์โพลีเอททีลีน
- สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนมีน้ำหนักเบา เพราะไม่ต้องการวัสดุหุ้มที่เป็นโลหะ
- สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนเป็นสายประเภททรายไพบ์ (dry type) ซึ่งจะไม่มีปัญหาเรื่องน้ำมัน ซึ่งปัญหามักจะเกิดขึ้นกับสายที่ใช้ฉนวนหุ้มแบบกระดาษหุ้มน้ำมัน เช่น น้ำมันร้ว
- มีความคงตัวทางด้านเคมี
- ง่ายต่อการต่อ

ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นข้อได้เปรียบของสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีน และที่จะกล่าวต่อไปนี้จะกล่าวถึงข้อด้อยของสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีน

- ฉนวนของสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนจะมีความหนามากกว่าสายที่ใช้กระดาษเป็นฉนวน
- มีความทนทานต่อแรงดันอิมพัลส์(impulse) น้อยกว่าสายที่ใช้กระดาษหุ้มน้ำมัน
- มีคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมिन้อยกว่าสายที่ใช้กระดาษหุ้มน้ำมัน
- มีผลของการซึมซาบของน้ำมากกว่า
- สายครอสลิงค์โพลีเอททีลีนไม่มีความต้านทานต่อการเกิดโคโรน่า (corona) เหมือนอย่างแบบกระดาษหุ้มน้ำมัน และในบิลท์ลและยางเอททีลีนโพรทีลีน

8.8 องค์ประกอบของสายตัวนำครอสลิงค์โพลีเอททีลิน



รูปที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของสายตัวนำชนิดครอสลิงค์ โพลีเอททีลิน

ตัวนำ(conductor) เป็นส่วนที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

เซ็พพาเรเตอร์เทป(separator tape) เป็นเทปสภาพตัวนำที่ทำหน้าที่ป้องกันสารฉนวนของคอนดักเตอร์ซิล หรือของฉนวนไม่ให้ไหลเข้าใน (injection) ระหว่างสายตัวนำ

เซมิคอนดักเตอร์ชั้นใน(inner semiconducting layer (conductor shield)) ทำหน้าที่หุ้มฉนวนสภาพตัวนำเป็นรูปทรงกระบอกหุ้มบนตัวนำ ทำให้ดูแล้วตัวนำเป็นทรงกลมเกิดการคลายตัวของสนามไฟฟ้า, ทำให้วอเตอร์หรือเกิดยากขึ้น

ฉนวน(insulation) ทำหน้าที่หุ้มเพื่อไม่ให้ไฟฟ้าหนีออกจากตัวนำ

เซมิคอนดักเตอร์ชั้นนอก(outer semiconducting layer (insulation shield)) ทำหน้าที่หุ้มฉนวนสภาพตัวนำบนฉนวน ทำให้สนามไฟฟ้าภายในฉนวนสม่ำเสมอ, ต้องให้จุดต่อต่อกันสนิทกับเทปทองแดง

เทปทองแดง(Cu shield tape) ทำหน้าที่ให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลลงดินเวลาเกิดอุบัติเหตุ หรือเปลี่ยนให้กระแสไฟฟ้าไหลออกไปสู่ด้านนอกได้เพื่อความปลอดภัย

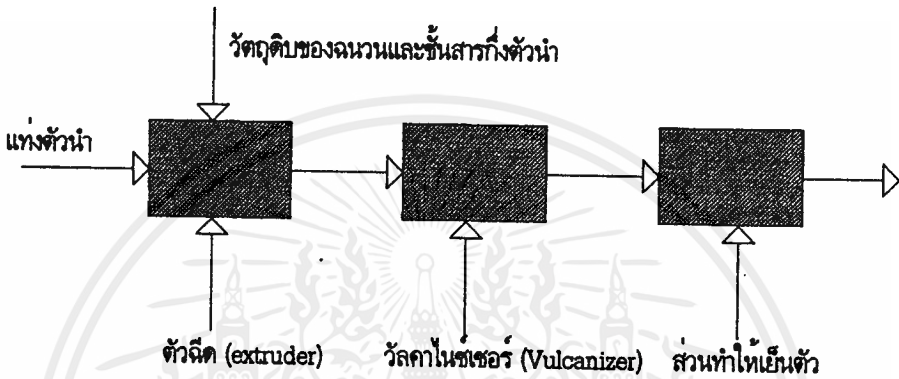
ฆายคั้งเทป(binding tape) ใช้สำหรับสายตัวนำหลายแกนเพื่อทำให้เป็นรูปกลม สำหรับสายตัวนำแกนเดี่ยว เพื่อป้องกันเทปทองแดงเปลี่ยนสีและป้องกันเทปทองแดงไม่ให้ติดกับเปลือกหุ้ม

เปลือกหุ้มภายนอก(sheath) เป็นส่วนที่เพิ่มความแข็งแรงให้สาย, ป้องกันความเสียหายจากภายนอกด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการผลิต

ขั้นตอนการผลิตสายตัวนำครอสลิงค์โพลีเอททีลีนในปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการทำการวัลคาไนซ์ต่อกันในแนวเส้นโค้ง(Catenary Continuous Vulcanization, CCV) วิธีการทำการวัลคาไนซ์ต่อกันในแนวตั้ง(Vertical Continuous Vulcanization, VCV) และการทำในวิธีการฉีดวัสดุเข้าไปในแบบพิมพ์(Long Land die method). แต่วิธีทั้งหมดนี้ก็จะมึวิธีการผลิตหลักคล้ายๆ กัน แต่จะต่างกันรายละเอียดที่ปรับปรุงขึ้นในแต่ละวิธี

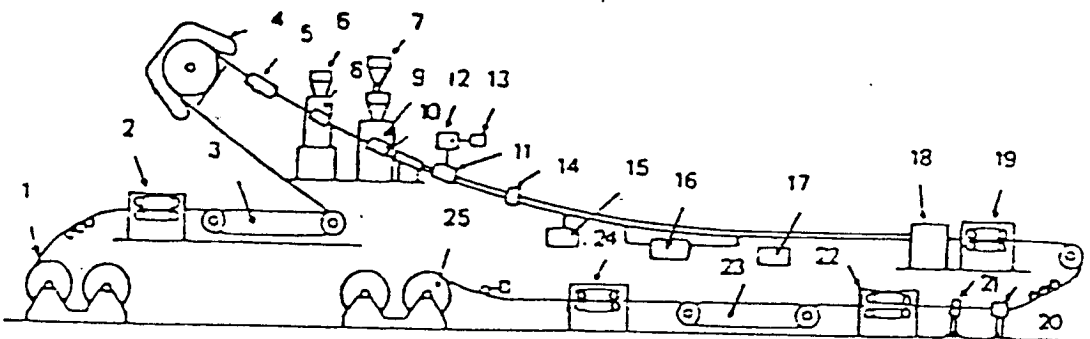


รูปที่ 3.2 แสดงขบวนการผลิตหลัก

3.4.1 วิธีการวัลคาไนซ์ต่อกันในแนวเส้นโค้ง(CCV Method)

วิธีนี้จะนำเอาหัวฉีดแบบสกรู(screw-type extruder) มาใช้ในการฉีดโพลีเอททีลีนเข้าสู่ท่อวัลคาไนซ์ (Vulcanizing tube) โดยอุณหภูมิที่หัวฉีดจะอยู่ประมาณ 125-127 องศาเซลเซียส และในท่อวัลคาไนซ์ อุณหภูมิจะอยู่ที่ 200-400 องศาเซลเซียส โดยความยาวท่อนั้นจะประมาณ 70-100 เมตร แต่บางระบบในปัจจุบันมีความยาวถึง 150-200 เมตร และนำไปผ่านขบวนการหล่อเย็นอีก

วิธีนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตสายตัวนำที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 3 ถึง 70 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 แสดงการผลิตแบบการทำวัลคาไนซ์ต่อกันในแนวเส้นโค้ง(CCV)

1. ที่เก็บตัวนำ(Supply stand)
- 2, 4, 9, 22, 24 กวาน(capstan)
- 3, 23 รูปการ(Loop car)
5. เครื่องอุ่นตัวนำ(Conductor preheater)
- 6, 7 ที่อุ่นวัตถุดิบ(Material preheater)
- 8, 9, 10 หัวฉีด(extruder)
11. เครื่องวัดความบิดเบี้ยว(Eccentricity Measurement)
12. จอโทรทัศน์ในการเอกซเรย์(X-ray TV set)
13. เครื่องอ่านเอกซเรย์(X-ray scanner)
14. เครื่องควบคุมความโค้ง(catenary position control)
15. ไอน้ำแรงดันสูง(High pressure steam)
16. เครื่องควบคุมความสูงของของเหลว(Liquid height control)
17. น้ำแรงดันสูง(High pressure water)
18. เครื่องหุ้มสายภายนอก(Double seal)
25. มล็ด

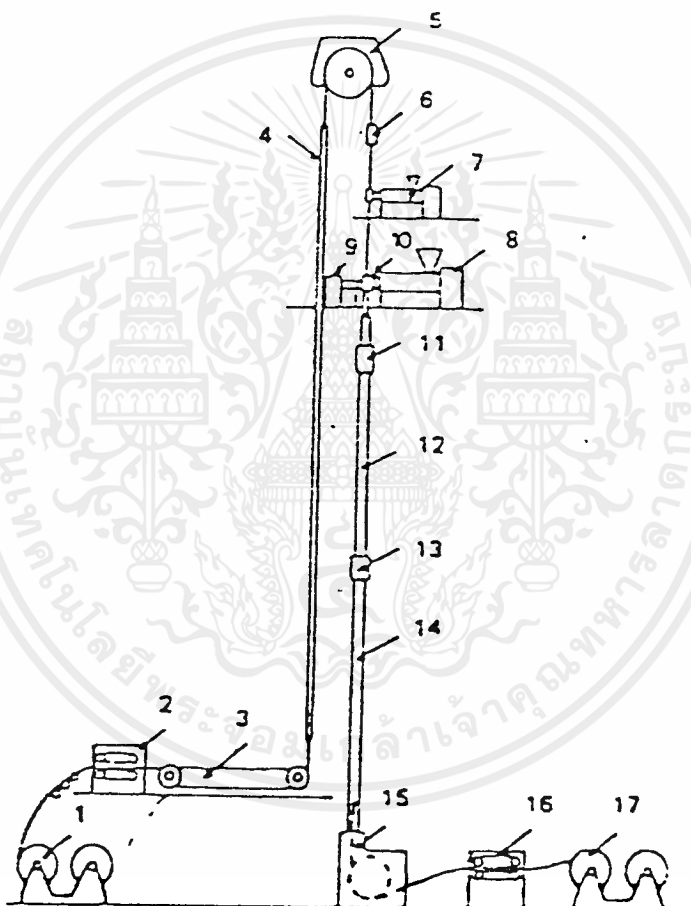
โดยการผลิตจะเริ่มจากตัวนำผ่านจากที่เก็บ ผ่านหัวฉีดในขั้นตอนแรก หลังจากผ่านการอุ่นจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง ในขั้นตอนแรกจะฉีดสารกึ่งตัวนำออกมาเพื่อเป็นคอนดักเตอร์ซีลด์ หลังจากขั้นตอนนี้แล้วตัวนำจะถูกหุ้มด้วยสารกึ่งตัวนำและนำไปสู่ขั้นตอนที่สองและที่สามต่อไป ซึ่งหลังจากผ่านขั้นตอนที่สามตัวนำจะถูกหุ้มด้วยคอนดักเตอร์ซีลด์, ฉนวน และอินซูลเลเตอร์ซีลด์ หลังจากนั้นจะผ่านท่อวัลคาไนซ์ด้วยความเร็วและอุณหภูมิสูงคงที่ และจะออกมาเป็นครอสลิงค์โพลีเอททีลีน

3.4.2 วิธีการทำการวัลคาไนซ์ต่อกันตามแนวคิ่ง(VCV Method)

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธีการทำการวัลคาไนซ์ต่อกันตามแนวเส้นโค้ง(CCV Method) มาก ทั้งในขั้นตอนการผลิตและอุปกรณ์ที่ใช้ เพียงแต่ผิดกันที่ทำในแนวคิ่ง โดยอาคารจะต้องสูงประมาณ 60-80 เมตร โดยวิธีนี้จะใช้ผลิตสายตัวนำใน 2 ระดับ คือที่ความเร็ว 10-200 เมตรต่อนาที ในการผลิตสายที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3-70 มิลลิเมตร และที่ความเร็ว 1-30 เมตรต่อนาที ในการผลิตสายที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 30-150 มิลลิเมตร

เนื่องจากการผลิตไนวีรีนี้ต้องการอากาศและอุปกรณ์ ซึ่งมีราคาสูงกว่า ทำให้ต้นทุนในการผลิตไนวีรีนี้สูงกว่าวิธีของการทำในแนวเส้นโค้ง

ทั้งสองวิธีนี้ในทอวัลคาไนซ์จะใช้วิธีสตีมเคอริง(Steam-curing method) โดยใช้ความดันประมาณ 20-30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่วิธีนี้ก็ยังมีปัญหาคือต้องใช้เวลานานในการทำให้สายแห้ง จึงเปลี่ยนมาเป็นวิธีที่ใช้ก๊าซ เช่น ไนโตรเจน(N_2) หรือคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) โดยใช้ความดันประมาณ 10-20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงการผลิตแบบการทำวัลคาไนซ์ในแนวตั้ง(VCV)

1. ที่เก็บตัวนำ
- 2, 16 กว้าน
3. รูลการ
- 4, 6 เครื่องอุ่นตัวนำ
5. กว้านต่อตั้งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

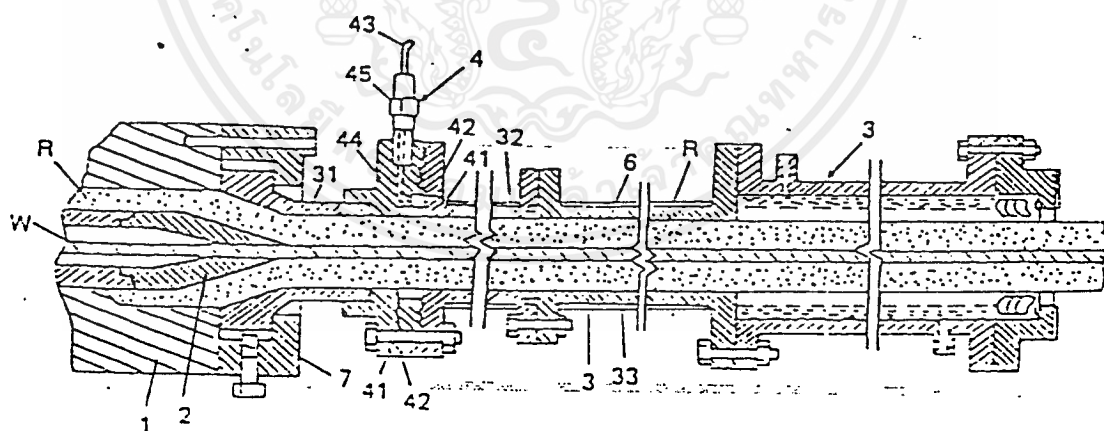
- 7, 8, 9 หัวฉีด
- 10 หัวรวม 2 ชั้น (two-layer common head)
- 11 จอโทรทัศน์ในการเอ็กซ์เรย์
- 12 เครื่องทำความร้อน (Heater)
- 13 เครื่องควบคุมความสูงของของเหลว
- 14 ท่อทำความเย็น (Cooling Tube)
- 15 เครื่องหุ้มสายภายนอก
- 17 วงล้อ

3.4.3 วิธีการฉีดวัสดุเข้าไปในแบบพิมพ์ (Long Land Die Method)

เนื่องจากโพลีเอทที่สึนนั้นมีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ไม่ดี จึงเป็นข้อจำกัดในการผลิตในสองวิธีแรก จึงต้องใช้ระยะเวลาานาน ทำให้ความเร็วในการผลิตจำกัดอยู่ที่ระดับหนึ่ง

ดังนั้นจึงพัฒนาวิธีนี้ขึ้นมาโดยอาศัยสารช่วย (Auxilliary agent) ในระหว่างการหลอมเพื่อการเคลื่อนที่อย่างราบเรียบของวัตถุพิมพ์ในแม่พิมพ์ สารที่ใส่จะต้องทนต่อสภาวะในการทำโครสลิงค์

ในการผลิตชนิดนี้สายการผลิตจะอยู่ในแนวระดับ และจะต้องออกแบบให้ตัวนำเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่มีกรโก้งกอ และวิธีนี้จะใช้ในการผลิตสายตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 3.5 แสดงการผลิตแบบการฉีดวัสดุเข้าไปในแบบพิมพ์

- 1 หัวฉีด (Cross head)
- 2 ปลายหัวฉีด (nipple)
- 3 อุปกรณ์ของแม่พิมพ์ (Long Land die device)
- 4 สารช่วยในการหล่อ (Mold assist agent supplier)
- 5 อุปกรณ์หล่อเย็น (Cooling device)

31-33 แบบหล่อ (Die)

41 โลหะพอร์รัส (Porous metal)

42 ที่เก็บสารช่วยในการหล่อ (Mold assist agent reservoir)

43-45.ทางที่สารช่วยในการหล่อไหลผ่าน (Mold assist agent passage)

จากการที่ระบบในความร้อนกับระบบทำความเย็นแยกจากกัน ทำให้ไม่มีน้ำแพร่เข้าไปในเนื้อของฉนวน ฉนวนอาจเรียกได้ว่าแห้งสนิท และแทบจะไม่มีช่องว่างในเนื้อฉนวน เส้นผ่าศูนย์กลางคงที่และไม่มีการบินงอ โดยทั้งสองส่วนสามารถควบคุมได้อย่างเป็นอิสระ อุณหภูมิในการทำครอสลิงค์สามารถทำให้อยู่ใกล้อุณหภูมิวิกฤตได้มากที่สุด ดังนั้นจะทำความเร็วในรายการผลิตเข้มข้น และอุปกรณ์มีขนาดเล็กลง

3.5 ขั้นตอนการทำครอสลิงค์โพลีเอททีลีน

การทำครอสลิงค์โพลีเอททีลีนนั้น ในการทำในอุตสาหกรรมผลิตสายตัวนำนั้นแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ

3.5.1 ขั้นตอนการผสม

3.5.2 ขั้นตอนการฉีด

3.5.3 ขั้นตอนการทำครอสลิงค์

ในขั้นตอนการผสมนั้น ส่วนผสมหลักก็คือ โพลีเอททีลีนและส่วนผสมของการทำครอสลิงค์(Cross-linked agent) ประมาณ 2-3 ส่วนต่อ 100 ส่วน และส่วนของแอนตี้เอจจิง(anti-aging) เล็กน้อย และในขั้นตอนการฉีดนั้นจะฉีดส่วนผสมที่ผสมกันเรียบร้อยแล้ว จะถูกฉีดที่อุณหภูมิเดียวกันกับตอนที่ผสมคือ ประมาณ 140 องศาเซลเซียส และจะผ่านสู่ขั้นตอนการครอสลิงค์ จะถูกเพิ่มความดันเพื่อไล่อากาศที่เกิดจากการทำครอสลิงค์นี้เป็นขั้นตอนโดยย่อของการทำครอสลิงค์โพลีเอททีลีนในการผลิตสายตัวนำ

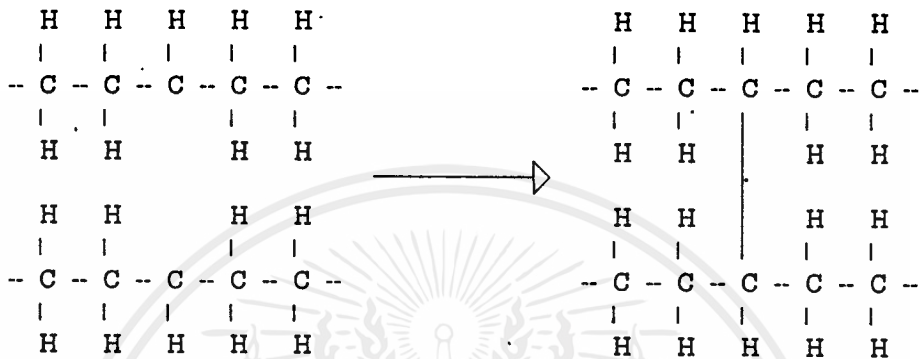
- ขั้นตอนการทำครอสลิงค์

โพลีเมอร์โดยเฉพาะครอสลิงค์สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาทางเคมี หรือวิธีการแผ่รังสี(radiation induce) โดยมากจะนิยมการใช้รังสีแกมมา(γ -ray) หรือการให้พลังงานกับอิเล็กตรอนจะเป็นวิธีที่ใ้ผลดี

จะทำโดยโพลีเมอร์แตกตัวเป็นโมโนเมอร์เสียก่อนภายใต้รังสีแกมมา แล้วจึงจับต่อกันใหม่เป็นแบบครอสลิงค์ โดยระดับการจับต่อเป็นครอสลิงค์นั้นแสดงโดยค่า G เป็นหน่วยของการครอสลิงค์ คือการเชื่อมต่อกันเป็นครอสลิงค์ต่อพลังงาน 100 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ของพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไป

ปฏิกิริยาเคมีในการทำครอสลิงค์ของโพลีเอททีลีนจะเกิดดังรูป ซึ่งโพลีเอททีลีนมีโมเลกุลที่มีพันธะไม่อิ่มตัวน้อยมาก คือประมาณ 15 ใน 1000 ส่วนในโพลีเอททีลีนความดันสูง(high-pressure polyethelene) และประมาณ 0.6 ต่อ 1000 ส่วนในโพลีเอททีลีนความดันต่ำ(Low-pressure

polyethelene) ในขณะที่มีถึง 200 ใน 1000 ส่วนในยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าทำไมจึงไม่ใช้กำมะถันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนในยางธรรมชาติ โดยจะใช้สารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) ในการเร่งปฏิกิริยาแทน อย่างเช่น ไดอัลฟักคิวทิลเปอร์ออกไซด์(di- α -cumyl peroxide) และเปอร์ออกไซด์ชนิดอื่นๆ จะถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง



รูป 3.6 แสดงปฏิกิริยาการทำครอสลิงค์

3.6 การปรับปรุงขั้นตอนการผลิตเพื่อลดการเกิดวอเตอร์ทรี

ตามที่ทราบกันแล้วว่าในการที่จะเกิดวอเตอร์ทรีขึ้นนั้นต้องมีต้นเหตุในการเกิด โดยมีจุดเริ่มต้นจาก 3 อย่างหลัก คือ

3.6.1 การลดช่องว่างในเนื้อฉนวน

3.6.2 ส่วนซูบระของชั้นสารกึ่งตัวนำ

3.6.3 สิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวน

จึงมีการปรับปรุงการผลิตเพื่อลดต้นเหตุการเกิดของวอเตอร์ทรีให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

3.6.1 การลดช่องว่างในเนื้อฉนวน

ช่องว่างในเนื้อฉนวนนั้นเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการผลิต เพราะเป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดวอเตอร์ทรีชนิดโบว์-ไทด์ทรี(Bow-tie-trees)

ในการที่จะลดช่องว่างมีอยู่ 2 ส่วนหลัก คือ

3.6.1.1 ในขั้นตอนการผลิต

ในขั้นตอนการผลิตนั้นต้องปรับปรุงการออกแบบของหัวฉีดพวกหัวสกรู หรือหัวครอส (screw or crosshead) เพื่อนำไปติดตั้งในชุดเครื่องฉีดฉนวนภายใต้ความดันที่กำหนดโดยเมื่อความดันยิ่งสูงจำนวนช่องว่างก็จะยิ่งลดลง

3.6.1.2 ในขั้นตอนการทำคออสติงค์

ในการทำการปรับปรุงวิธีการทำคออสติงค์นั้น ได้มีการพัฒนาขึ้นมาตามลำดับและสามารถแบ่งได้ดังนี้

1.2.1 วิธีการเคอร์ริง (Gas-curing Method)

1.2.2 วิธีสตีมเคอร์ริงที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว(Modified steam-curing Method)

1.2.3 วิธีการฉีดวัสดุเข้าไปในแบบพิมพ์(Long Land die Method)

1.2.4 วิธีใช้ความดันสูงมากพิเศษ(Ultrahigh-pressure cross linking method)

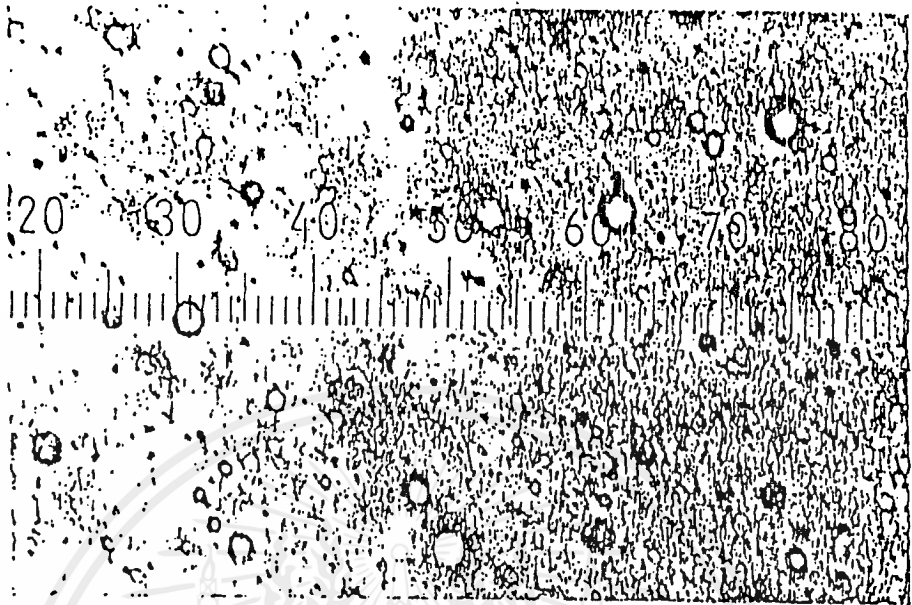
ก๊าซเฉื่อย(Inert gas) ถูกนำมาใช้แทนไอน้ำแรงดันสูง ในการนำความร้อนและความดันในการทำเช่นนี้มีด้วยกันสองแนวทาง หนึ่งนั้นในด้านของแรงดันและความร้อนก๊าซที่จะใช้เป็นก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์(SF₆) และไนโตรเจนจะเหมือนกับวิธีสตีมเคอร์ริง ยกเว้นทางด้านอุณหภูมิและความดันจะแตกต่างกันไป อีกด้านหนึ่งนั้นคือ ใช้ก๊าซในการให้แรงดันเพียงด้านเดียว และใช้ความร้อนจากแสงอินฟราเรด(infrared) โดยทั้งสองวิธีนี้จะช่วยลดจำนวนของช่องว่างลงได้

โดยจุดประสงค์หลักของวิธีข้างต้นคือ เพื่อลดความชื้นในฉนวน โดยแนวความคิดนี้จะลดการแพร่ของความชื้นเข้าไปในเนื้อฉนวน โดยอาจจะเรียกวิธีนี้ว่า เป็นวิธีสตีมเคอร์ริงที่ปรับปรุงแล้ว

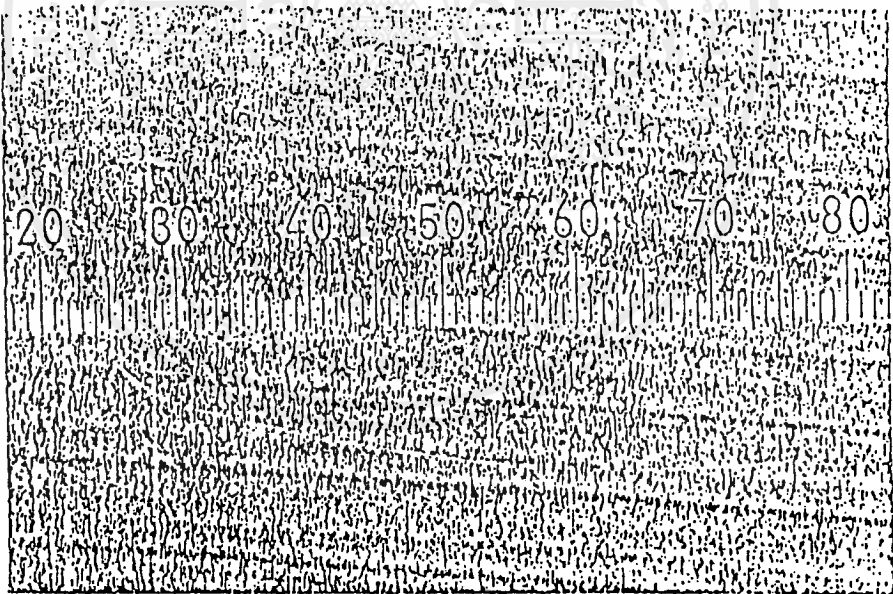
วิธีการฉีดวัสดุในแบบพิมพ์นั้น จะง่ายต่อการควบคุมความเที่ยงตรงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและฉนวนจะไม่มีส่วนสัมผัสกับน้ำหรือก๊าซเลย เพราะอยู่ในแบบพิมพ์ตลอด โดยหลักการแล้วจะไม่มีช่องว่างในเนื้อฉนวนเลย ยกเว้นบริเวณที่ผิวของฉนวน ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อน

โดยการผลิตสายในชนิดนี้อาจเรียกได้ว่าเป็นแบบแห้ง(dry type) ซึ่งตรงข้ามกับในวิธีสตีมเคอร์ริง ซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นแบบเปียก(wet type)

และในวิธีใช้ความดันสูงพิเศษนั้น ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนา โดยจะทำการหล่อ และทำการคออสติงค์ภายใต้แรงดันสูงพิเศษ จะทำให้เวลาในการทำคออสติงค์สั้นลงอีก



รูปที่ 1



รูปที่ 2

รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบช่องว่างที่ผิวของฉนวนโดย

1. วิธีสตีมเคอริง (steam-curing method)
2. วิธีการฉีดวัสดุเข้าไปในแบบพิมพ์ (Long Land die method)

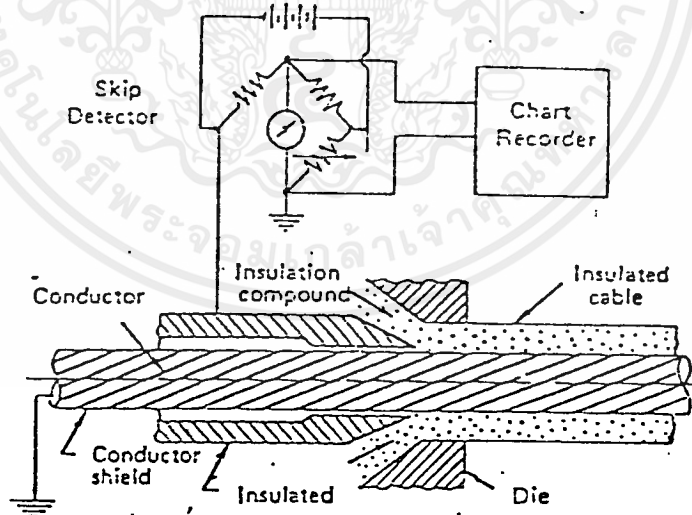
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 การลดส่วนขรุขระของชั้นสารกึ่งตัวนำ

ในอดีตเทปผ้า(fabric tape) ถูกนำมาใช้เป็นคอนดักเตอร์ซีลด์ และพัฒนามาเป็นเทปใยสังเคราะห์(nylon tape) ได้ใช้ในระดับแรงดันต่ำและปานกลางและใช้สารกึ่งตัวนำ ในการผลิตสายตัวนำในระดับแรงดันสูงถึงสูงมาก ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นมาตรฐาน

ในปัจจุบันได้ใช้เซมิคอนดักติ้งโพลีเอทิลีนโคโพลิเมอร์(Semiconducting polyethylen co-polymer) และโพลีเอทิลีนที่สามารถทำการครอสลิงค์ได้(Crosslinkable polyethylene) เพื่อใช้เป็นคอนดักเตอร์ซีลด์และอินซูลेशनซีลด์ โดยปัจจุบันนี้คอนดักเตอร์ซีลด์, ฉนวนและอินซูลेशनซีลด์จะถูกฉีดต่อกันมาโดยลำดับโดยเรียกว่า การฉีดแบบต่อเนื่องสามชั้น(three-layers simultaneous extrusion) โดยการออกแบบหัวฉีดต่างๆ นั้น และระบบต้องคำนึงถึงความเรียบ และรอยต่อของแต่ละชั้น

ในวิธีที่พัฒนาแล้วนั้นจะแยกออกเป็น 2 ชั้นตอนระหว่างการฉีดคอนดักเตอร์ซีลด์และฉนวนกับการฉีดอินซูลेशनซีลด์ ในการทำเช่นนี้รอยต่อระหว่างฉนวนกับอินซูลेशनซีลด์จะมีความเรียบกว่าการทำเป็นชั้นตอนเดียวกัน และยังสามารถตรวจสอบการกระโดดหรือความขรุขระของผิวได้โดยมีเครื่องมือตรวจสอบ(skip detector) เพื่อตรวจจับสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ผิว โดยเครื่องมือนี้จะติดตั้งใกล้หัวฉีดหลัก โดยหลักแล้วจะตรวจสอบความผิดปกติของคอนดักเตอร์ซีลด์มากกว่า



รูป 3.8 แสดงเครื่องตรวจสอบการกระโดดหรือความขรุขระของผิวคอนดักเตอร์ซีลด์ โดยจะติดตั้งอยู่ที่บริเวณหัวฉีดฉนวน

ในการผลิตสายตัวนำในปัจจุบันรอยต่อของแต่ละชั้นเป็นสิ่งสำคัญ จึงมีแนวคิดใหม่ซึ่งอาศัยหลักการของฉนวนที่เป็นกระดาษชุบน้ำมัน ซึ่งมีคุณสมบัติทางแรงดันเบรคดาวน์ดีและป้องกันการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ(Corona discharge) และป้องกันการเกิดทรี จึงเกิดความคิดที่จะใช้เทปที่มีของเหลวอยู่(Liquid-filled tape) ที่มีคุณสมบัติทางสารกึ่งตัวนำ และของเหลวที่เลือกคือ น้ำมันซิลิโคน(Silicone oil) เพราะมีคุณสมบัติของทั้งฉนวนและสารกึ่งตัวนำ โดยสายชนิดนี้จะใช้ในงานเฉพาะด้านเท่านั้น

3.6.3 การลดสิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวน

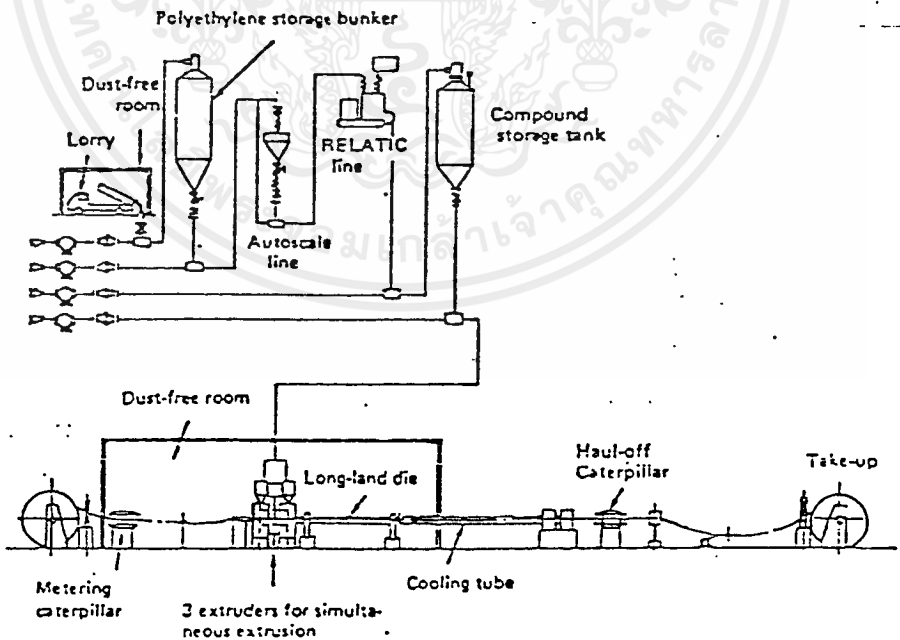
การที่จะมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในเนื้อของฉนวนนั้น อาจเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอนคือ

3.6.3.1 ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ

3.6.3.2 ขั้นตอนการขนส่ง

3.6.3.3 ขั้นตอนการผลิตสายตัวนำ

ดังนั้นการที่จะลดสิ่งแปลกปลอมจึงต้องเริ่มตั้งแต่ผู้ผลิตวัตถุดิบ คือในการผลิตเม็ดโพลีเอทิลีน โดยระบบทั้งหมดต้องทำเป็นระบบปิด โดยผู้ผลิตสายตัวนำต้องติดต่อกับผู้ผลิตวัตถุดิบให้ดีในเรื่องนี้ โดยวัตถุดิบเริ่มแรกนั้นต้องจัดเก็บในห้องสะอาดและส่งต่อไปสู่หัวฉีด โดยทั้งหมดจะต้องทำในระบบปิดเพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอม



รูป 3.9 แสดงระบบที่ปราศจากสิ่งแปลกปลอม

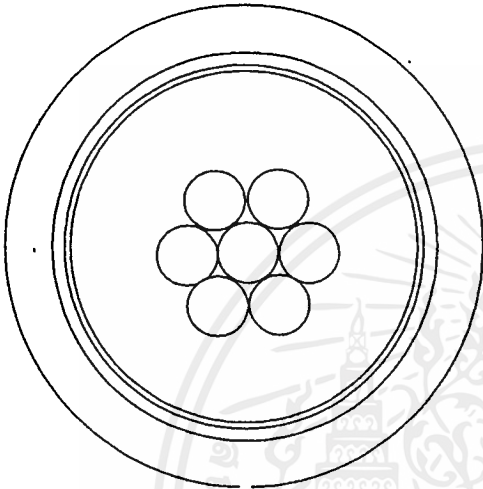
และยังได้นำเครื่องตรวจจับโลหะเข้ามาใช้ในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่เป็นโลหะ ไม่ให้เล็ดลอดเข้าไป
สู่กระบวนการผลิตได้

3.7 ประวัติการผลิตสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอททีลีน(XLPE)

3.7.1 ค.ศ. 1957-1965 ผลิตสายชนิด BN

T-T type cable

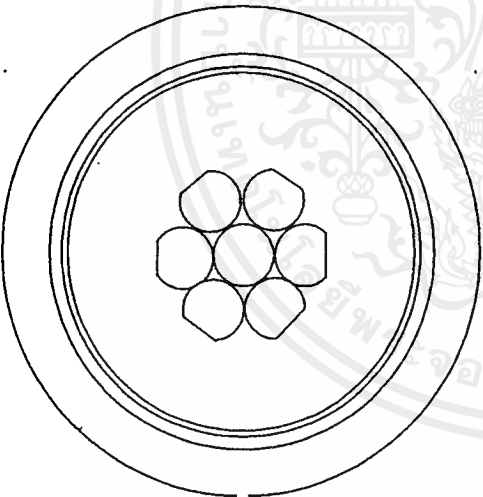
- conductor ใช้สาย anneal copper
ทรงกลมหุ้มด้วยดีบุก
- insulation ใช้ butyl rubber



3.7.2 ค.ศ. 1965-1976 ผลิตสายชนิด CV (ระยะแรก)

T-T type cable

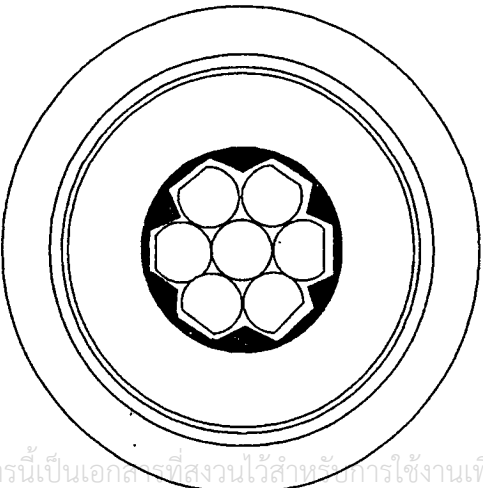
- เปลี่ยนอินซูลเตอร์เป็นครอสลิงค์โพลีเอททีลีนซึ่งมีลักษณะ
สมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม
- ใช้คอนดักเตอร์แบบทรงกลมอัดแน่น (ปี ค.ศ. 1971)
- เนื่องจากคอนดักเตอร์ซิลเป็นแบบเทป(tape)
ทำให้เกิดวอเตอร์ทรีมาก



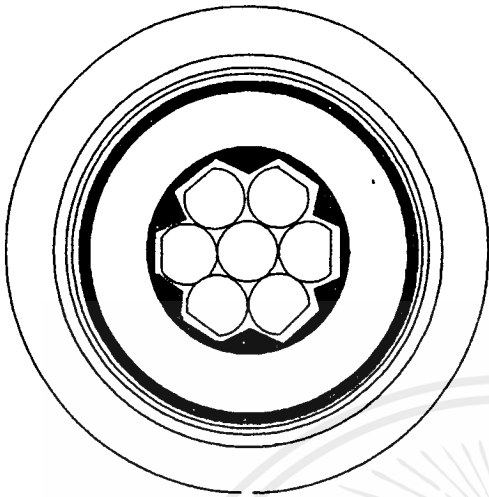
3.7.3 ค.ศ. 1976-1986 ผลิตสายชนิด CV (ระยะที่ 2)

E-T type cable

- เพื่อแก้ไขเรื่องวอเตอร์ทรีในคอนดักเตอร์ซิล จึงใช้วิธีเอกทวูชั่น
(extrusion) แทนการใช้เทป
- เพื่อแก้ไขเรื่องวอเตอร์ทรีในอินซูลชันซิล จึงเปลี่ยนจาก
เทปผ้าฝ้าย(cotton tape) มาเป็นทอปปิงเทปอินซูลชันซิล
- เพื่อเพิ่มความเชื่อถือ(reliability) ปราศจากช่องว่าง(void)
จึงใช้วิธีผลิตแบบทรายเคอริงครอสลิงค์ (dry curing
cross-link) นั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ cross-link) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.7.4 ค.ศ. 1985 ผลิตสายชนิด CV (ระยะที่ 3)

ขยายเคเบิล E-E type cable

- ใช้วิธีดรายเคอริง 3 ชั้นแบบฉีดยุ้ง (dry curing 3 layer common extrusion) เพื่อประกันด้านการพลังงานที่จ่ายให้มีสภาพคงตัว (stable) มากยิ่งขึ้น

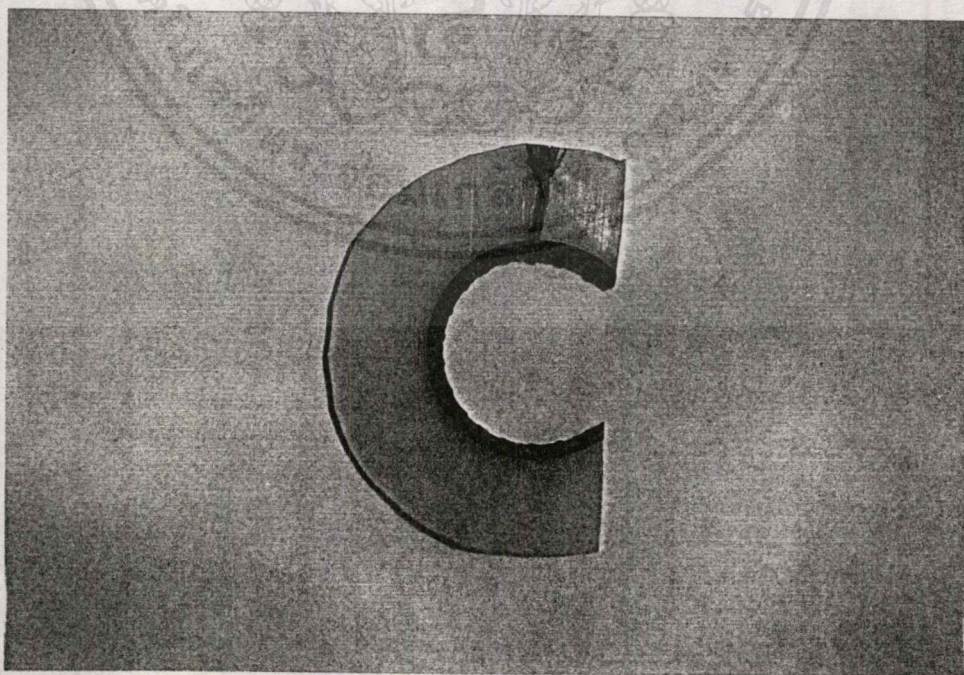
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 แนวคิดในการทดลอง

เนื่องจากเป็นที่ทราบกันแล้วว่า วอเตอร์ทรีนั้นเกิดจากข้อบกพร่องของชั้นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความคิดในการทดลองที่จะทำการจำลองการเกิดของวอเตอร์ทรีนั้นจะต้องทำกับแบบจำลองและตัวอย่างของสาย และต้องให้ความเครียดทางไฟฟ้าอย่างรุนแรงแก่สายและแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองนั้น และอาจจะมีควมถี่ของไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อเร่งให้เกิดวอเตอร์ทรีเร็วขึ้น แต่จุดสำคัญของการทดลองทั้งหมดก็คือ การทำให้เกิดจุดบกพร่องของสายและแบบจำลองนั้นๆ เช่น การใช้เข็มทิ่มเข้าไปในเนื้อฉนวนหรือ เปลือกหุ้มของสายตัวนำ เหตุผลที่ทำเช่นนี้เพราะเราทราบว่าวอเตอร์ทรีนั้นเกิดจากจุดบกพร่องของฉนวน อย่างไรก็ตามที่ได้ก็ยากที่จะเปรียบเทียบกับสายในการใช้งานจริง ทั้งในเรื่องไซในการทดลอง ทั้งสภาพแวดล้อมหลายๆ อย่างและที่สำคัญก็คือเวลาในการใช้งาน เพราะในการเกิดวอเตอร์ทรีในสายที่ใช้งานจริงนั้น จะต้องใช้งานมาอย่างต่ำประมาณ 6-7 ปี

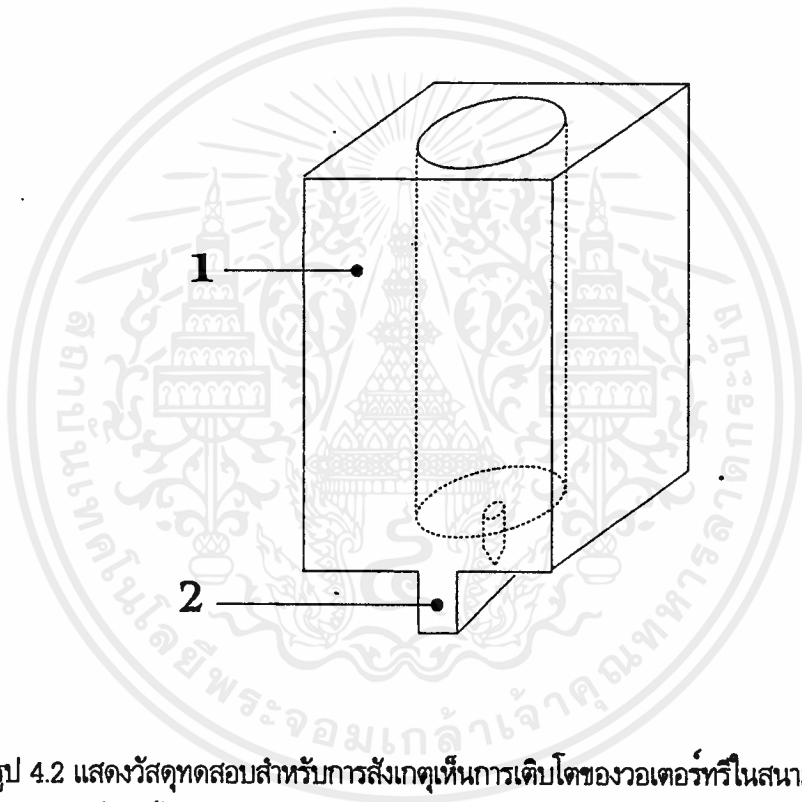
จากเอกสารที่ศึกษาได้กล่าวไว้ดีกว่า ในการจำลองการเกิดโดยใช้แรงดันอิมพัลส์นั้น โดยส่วนมากนั้นจะไม่เกิดทรีขึ้น แต่จะเป็นการเกิดการเบรคดาวน์แทน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.1 แสดงการเกิดเบรคดาวน์ในเนื้อฉนวนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ทฤษฎีการทดลองในการจำลองเกิดวอเตอร์ทรีโดยใช้วีวอเตอร์นีดเดิล(water needle)

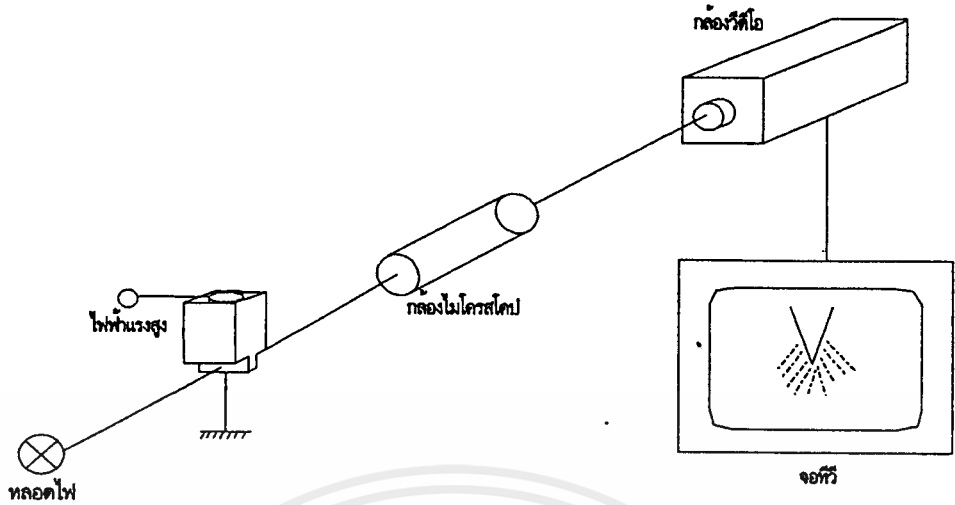
การทดสอบวอเตอร์นีดเดิล เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความต้านทานของวัสดุที่เกิดวอเตอร์ทรีแบบต่างๆ หรือเพื่อที่จะศึกษาการเกิดหรือการเติบโตของวอเตอร์ทรี ซึ่งสนามไฟฟ้าก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเติบโตของวอเตอร์ทรี คือ อัตราการขยายตัวของวอเตอร์ทรีจะขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้า (Electric field) ด้วยเหตุนี้แบบจำลองสำหรับการเติบโตของวอเตอร์ทรีโดยใช้สนามไฟฟ้าจึงถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การเติบโตของวอเตอร์ทรี จุดประสงค์ของการศึกษาก็เพื่อที่จะทดสอบถึงคุณสมบัติโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นกับขนาดของสนามไฟฟ้าในขณะที่เริ่มการเกิดวอเตอร์ทรี เช่น ค่าของสนามไฟฟ้าที่ยอดของปลายเข็ม (water needle)



รูป 4.2 แสดงวัสดุทดสอบสำหรับการสังเกตเห็นการเติบโตของวอเตอร์ทรีในสนามไฟฟ้า

1 - ที่เก็บน้ำ(Water reservoir),

2 - จุดที่มีความหนาน้อยกว่า 3 มิลลิเมตรเพื่อใช้ในการสังเกตเข็มและวอเตอร์ทรี



รูป 4.3 แสดงวงจรวัดการทดสอบ

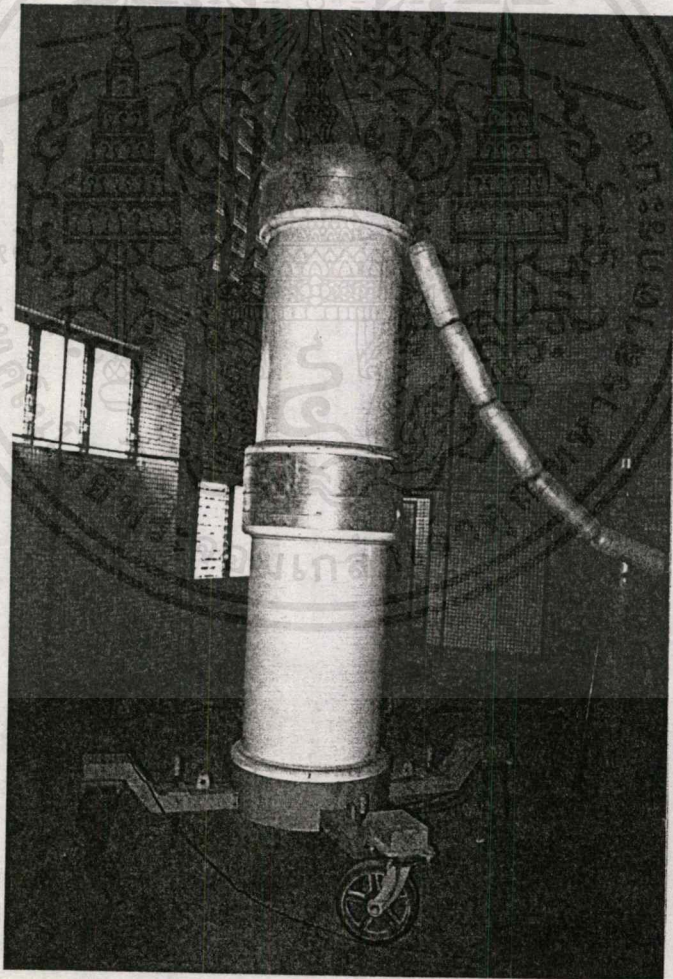
เนื่องจากวอเตอร์ทรีจะเกิดขึ้นที่ปลายของเข็มที่อยู่หัวสุดทดสอบ ซึ่งถูกออกแบบเพื่อให้ง่ายแก่การสังเกตเห็นการเติบโตของวอเตอร์ทรี ดังรูป 4.2 จะเป็นแบบของวัสดุทดสอบที่ทำจากโพลีเอทิลีนที่ผ่านการอัดที่ความดันต่ำออกมาเป็นรูปร่างดังรูป ซึ่งปลายของเข็มจะอยู่ที่ส่วนล่างของวัสดุทดสอบโดยความหนาของส่วนนั้นควรจะเล็กเพียงพอที่จะทำให้ไฟผ่านไปได้ ซึ่งเราจะใช้เข็มที่เป็นโลหะที่มีคาร์บอนความโค้งของปลายชี้เท่ากับ 3, 19, 40 และ 90 ไมโครเมตร และใช้ระบบวิดีโอ(video system) และกล้องไมโครสโคป(microscope) ที่มีกำลังขยาย 500 เท่าในการตรวจสอบลักษณะของผิวที่ปลายและค่าของรัศมีโดยระยะทางระหว่างเข็มและระนาบอิเล็กโทรดที่อยู่ตรงข้ามควรจะเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร ส่วนบนของวัสดุทดสอบจะใส่สารละลาย NaCl (น้ำเกลือ) ที่มีความเข้มข้น 0.1 mM หลังจากเติมสารละลายแล้วนำวัสดุทดสอบมาทดสอบด้วยกล้องไมโครสโคป เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลายได้เข้าไปอยู่ที่ปลายของอิเล็กโทรดโดยไม่มีฟองอากาศแล้ว ถ้าหากพบว่ายังมีฟองอากาศอยู่ให้ทำการเขย่าสักครู่หนึ่งเพื่อไล่ฟองอากาศออก หลังจากนั้นก็ป้อนแรงดันโดยแรงดันที่ป้อนจะอยู่ในช่วง 1-13 กิโลโวลต์ ที่ความถี่ระหว่าง 0.5 กิโลเฮิรตซ์และ 2 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันที่ป้อนให้แก่วัสดุทดสอบจะผ่านสายแพลตตินัม(Platinum) ที่เชื่อมต่อดัวยของเหลว วอเตอร์ทรีจะก็เริ่มเกิดขึ้นที่ปลายเข็ม และถูกแสดงโดยระบบวิดีโอ

4.3 การทดลอง

4.3.1 การทดลองที่ 1

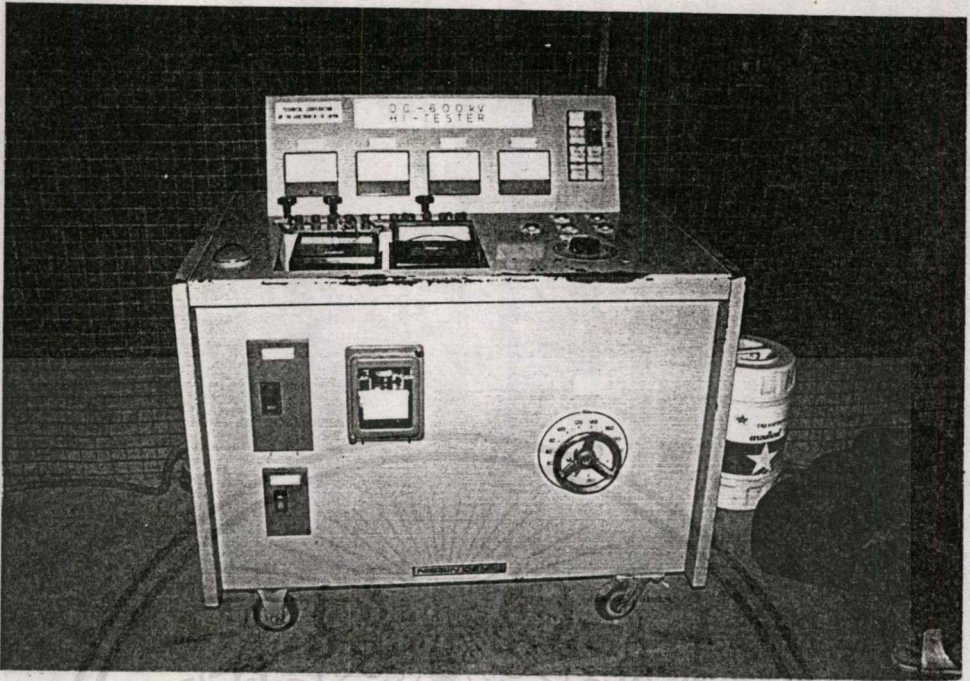
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. ตัวอย่างสายครอสลิงค์โพลีเอทิลีน
3. กล้องที่ใช้ในการทดลอง
4. อิเลคโตรดทรงกลม 2 ตัว
5. อิเลคโตรดปลายแหลม 1 ตัว
6. น้ำมันหม้อแปลง

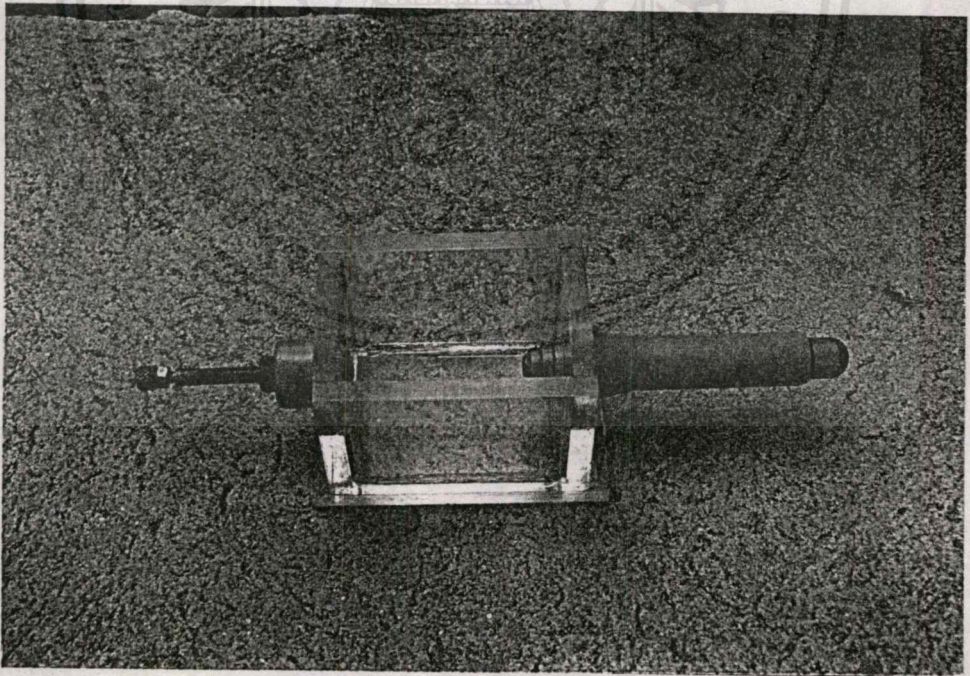


รูปที่ 4.4 แสดงตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

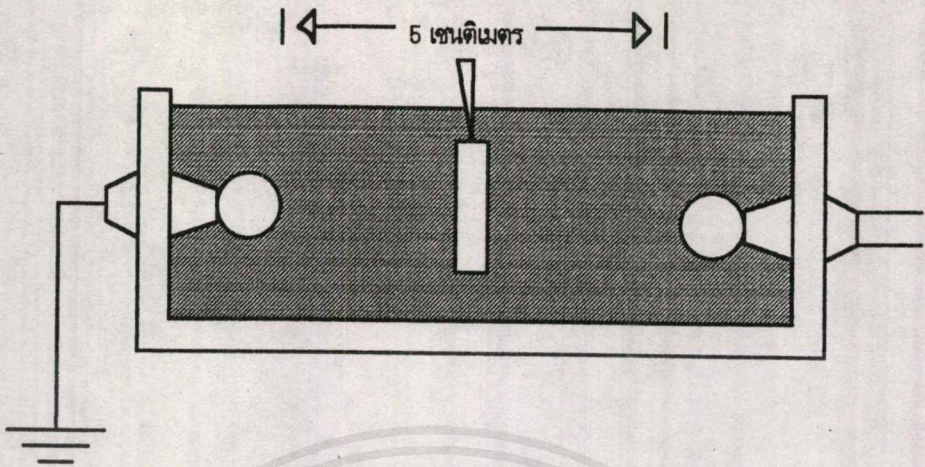


รูปที่ 4.5 แสดงส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



รูปที่ 4.6 แสดงกล่องที่ใช้ในการทดลอง(Chamber)

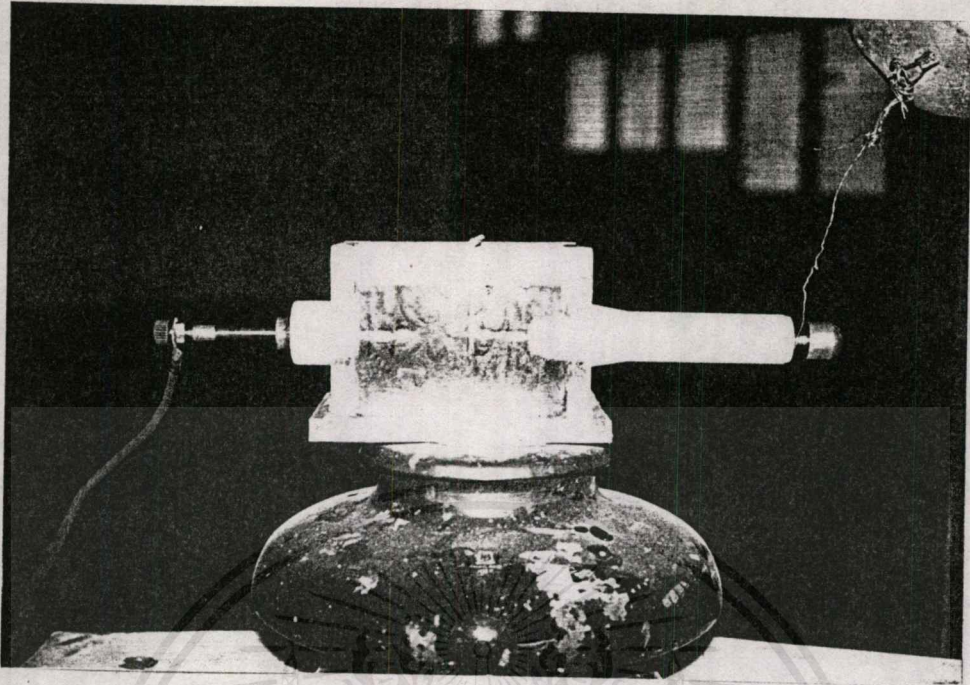
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.7 แสดงการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง

วิธีการทดลอง

1. นำสายที่ได้มาฉีกเป็นแผ่นบางๆ ประมาณ 1.5 มิลลิเมตร แล้วตัดให้ได้ขนาดประมาณ 1.5 ตารางเซนติเมตร
2. นำฉนวนที่ตัดได้มาวางไว้ระหว่างอิเล็กโทรด 2 ตัวที่ติดไว้ในกล่อง (Chamber) ที่ใช้ในการทดลอง โดยอิเล็กโทรดทั้ง 2 ข้างเป็นแบบทรงกลม โดยระยะห่างของอิเล็กโทรดทั้ง 2 ประมาณ 5 เซนติเมตร โดยฉนวนจะถูกยึดไว้ด้วยวิธีง่ายๆ
3. เทน้ำมันหม้อแปลงลงไปในกล่องจนท่วมฉนวนและอิเล็กโทรด
4. ต่อขั้วของอิเล็กโทรดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง และอีกขั้วหนึ่งต่อลงกราวด์
5. จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 100 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 3 นาที โดยทำประมาณ 30 ครั้ง ต่อฉนวน 1 แผ่น
6. เก็บตัวอย่างฉนวนไว้ไปทำการทดสอบต่อไป
7. ทำซ้ำในข้อ 3 ถึงข้อ 6 โดยเปลี่ยนอิเล็กโทรดข้างที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม โดยระยะห่างลดลงเหลือประมาณ 4 เซนติเมตรและแรงดันที่จ่ายให้ประมาณ 80 กิโลโวลต์



รูปที่ 4.8 แสดงการจัดอุปกรณ์วงจรที่ใช้ในห้องทดลอง

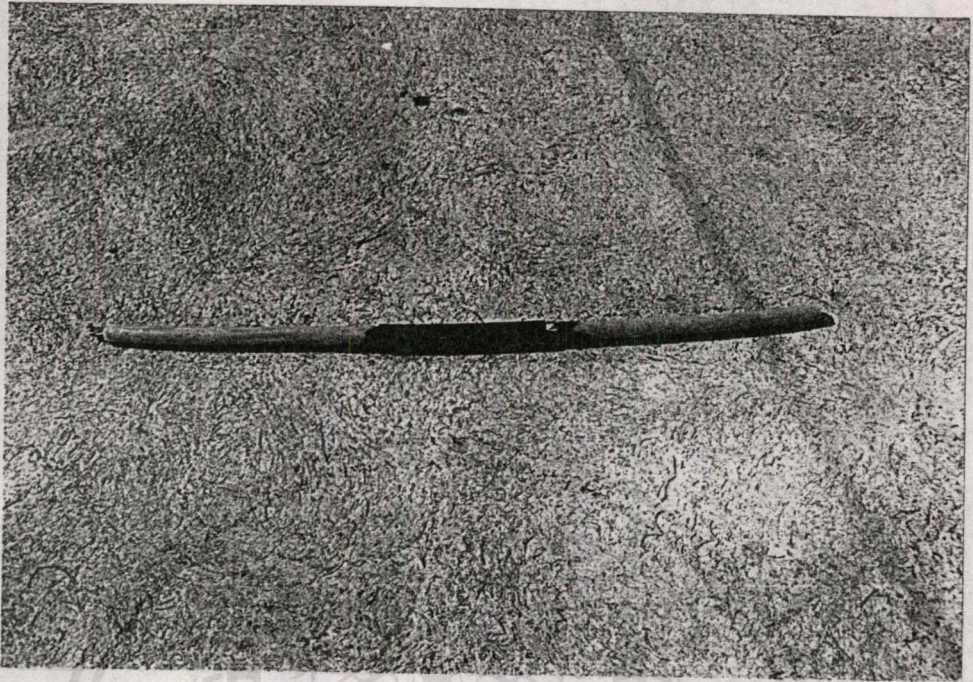
หมายเหตุ สาเหตุที่ต้องใช้น้ำมันหม้อแปลงเติมลงไป เพราะน้ำมันจะป้องกันการวาบไฟตามผิว(Flashover) เนื่องจากขนาดของแผ่นฉนวนมีขนาดจำกัด เพราะฉนวนที่ทดลองได้จากการตัดมาจากตัวอย่างสายอีกที

4.3.2 การทดลองที่ 2 การจำลองการเกิดวอเตอร์ทรีโดยวิธีวอเตอร์นิตเคิล อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. ตัวอย่างสายครอสลิงค์โพลีเอทที่ลื่นความยาวประมาณ 1 เมตร
3. อิเลคโตรดแบบแปลมปลาย
4. ถังน้ำ
5. เกลือ

วิธีการทดลอง

1. นำสายที่จะใช้ในการทดลองลงในถังน้ำโดยเติมน้ำและผลสมเกลือลงไปพอประมาณ โดยแช่ไว้ประมาณ 7-10 วัน
2. นำสายที่ได้มาปอกจากปลายทั้ง 2 ข้างเข้ามา และเกลือส่วนตรงกลางไว้ประมาณ 10 เซนติเมตร โดยการปอกต้องปอกให้ถึงเนื้อฉนวน



รูปที่ 4.9 แสดงสายตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง



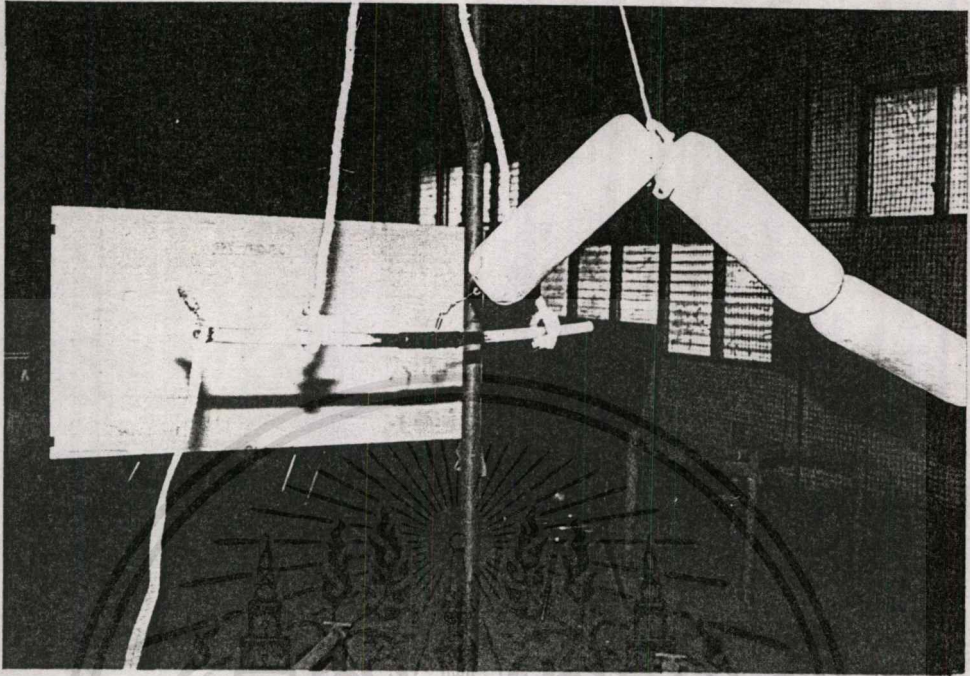
รูปที่ 4.10 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3. นำมาแขวน และต่อขั้วที่ปลายของตัวนำลงกราวด์ และใช้อิเล็กโตรดปลายแหลมกดเข้าไปที่เปลือกหุ้มสายให้ทะลุถึงเนื้อฉนวน และต่อขั้วเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
4. จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 120 กิโลโวลต์เป็นเวลา 3 นาทีประมาณ 30 ครั้งต่อ 1 สาย ที่ทำการทดลอง
5. เก็บตัวอย่างสายไว้ไปทำการทดสอบต่อไป

หมายเหตุ

- การแช่น้ำเป็นการทำเพื่อให้น้ำแทรกเข้าไปในสายตัวนำ
- การที่ใช้น้ำผสมเกลือนั้นเพราะจากการศึกษาพบว่าออสอนจะมีผลต่อการเกิดวอเดอรัทรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงการจัดอุปกรณ์จริงที่ใช้ในห้องทดลอง

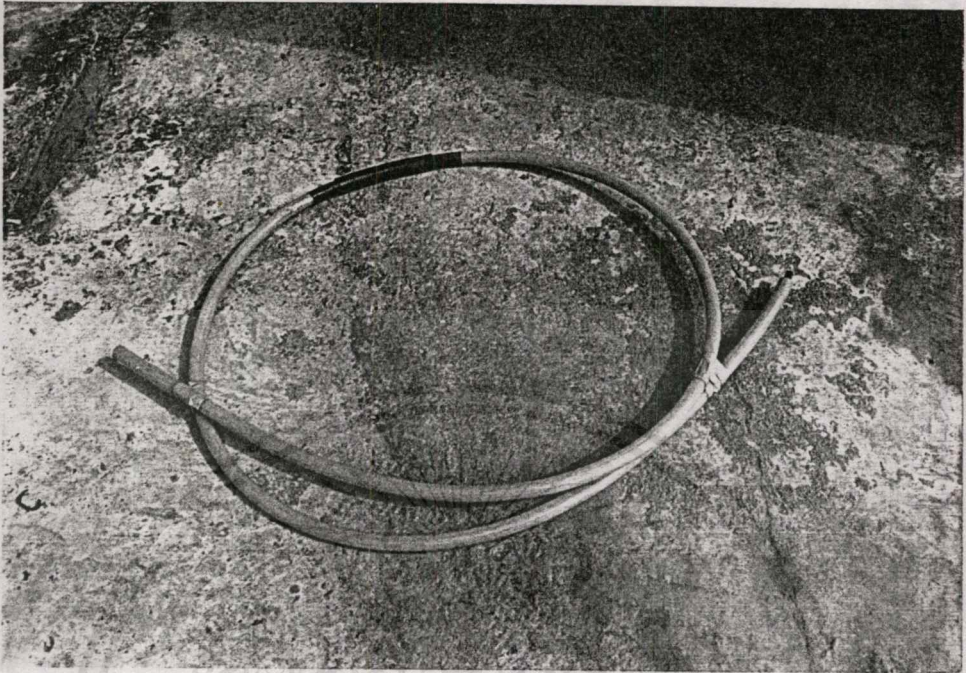
4.3.3 การทดลองที่ 3

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. ตัวอย่างสายครอสลิงค์โพลีเอททีลีน ความยาวประมาณ 5 เมตร
3. ถังน้ำ
4. เกลือ

วิธีการทดลอง

1. นำสายที่จะใช้ทดลองลงแช่ในถังน้ำโดยเติมน้ำและผสมเกลือลงไปพอประมาณ โดยแช่ไว้ประมาณ 7-10 วัน
2. นำสายที่ได้มาปอกจากปลายทั้ง 2 ข้างเข้ามา และเหลือส่วนตรงกลางไว้ประมาณ 10 เซนติเมตร และเหลือส่วนของเทปทองแดงไว้เล็กน้อย โดยส่วนที่ปอกต้องปอกให้ถึงเนื้อฉนวน



รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างสายที่ใช้ในการทดลอง



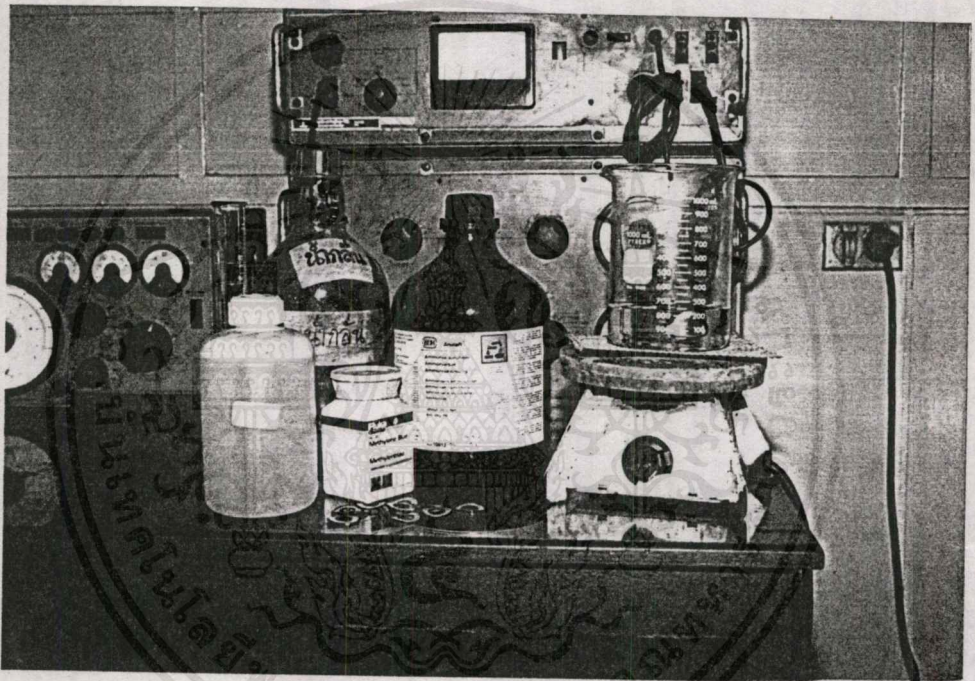
รูปที่ 4.13 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3. นำมาแขวนและต่อขั้วของตัวนำเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง และที่ส่วนของเพปทองแดงต่อลงกราวด์
4. จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 120 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 3 นาทีประมาณ 30 ครั้งต่อ 1 สาย ที่ทำการทดลอง
5. เก็บตัวอย่างสายไว้ไปทำการทดสอบต่อไป

3.5 การทดสอบหาอเทอร์ทรี

เครื่องมือทดสอบ

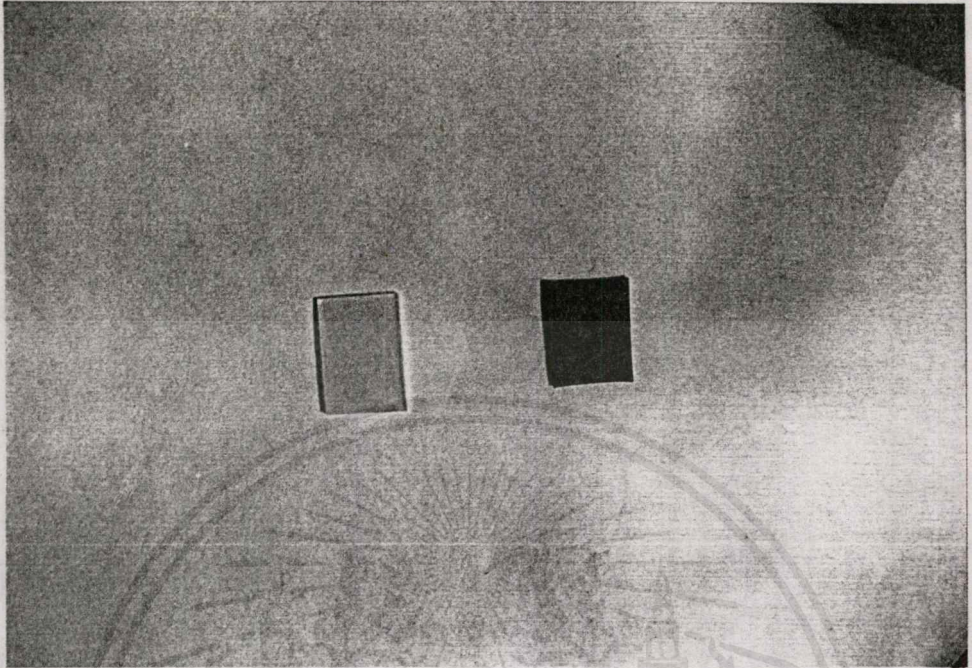
1. เต้าไฟฟ้า 1 เครื่อง
2. บีกเกอร์ขนาด 750 CC 1 ใบ
3. น้ำกลั่น 250 ml
4. เมทิลีนบลู(methylene blue) 0.5 กรัม
5. แอมโมเนีย 8 ml
6. เมทิลเอทิลคีโตน(methyl ethyl ketone)



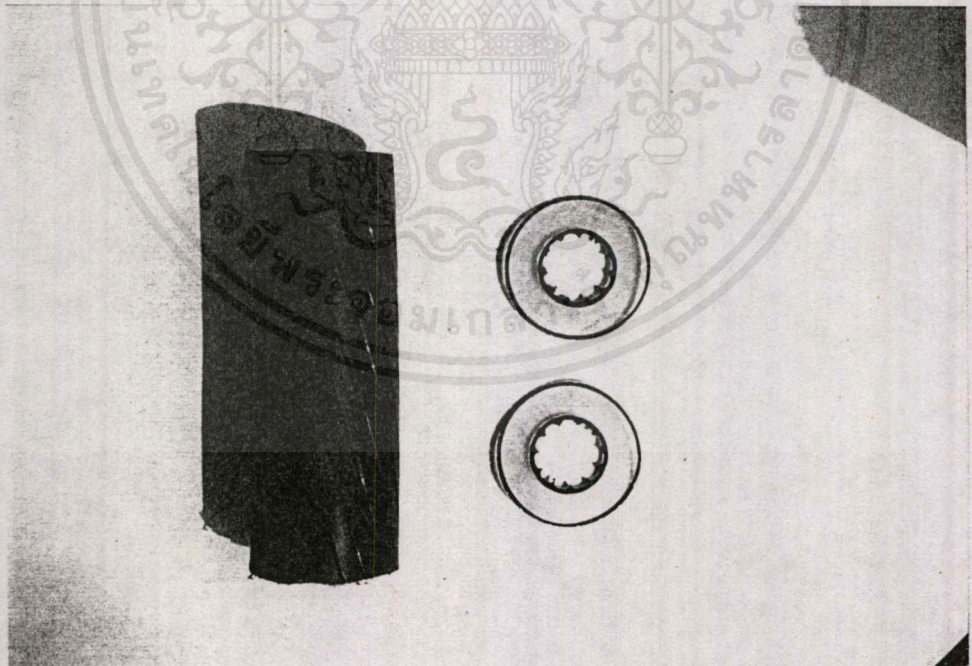
รูปที่ 4.14 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ให้ตัดตัวอย่างสายที่หุ้มฉนวนคอนดักทีฟโพลีเอทิลีนที่จะใช้ทดสอบ เพื่อเอามาผ่านเป็นแผ่นบาง หนาอย่างน้อย 0.5 มิลลิเมตร (ตัวอย่างสายควรจะผ่านการใช้งานมาแล้ว)

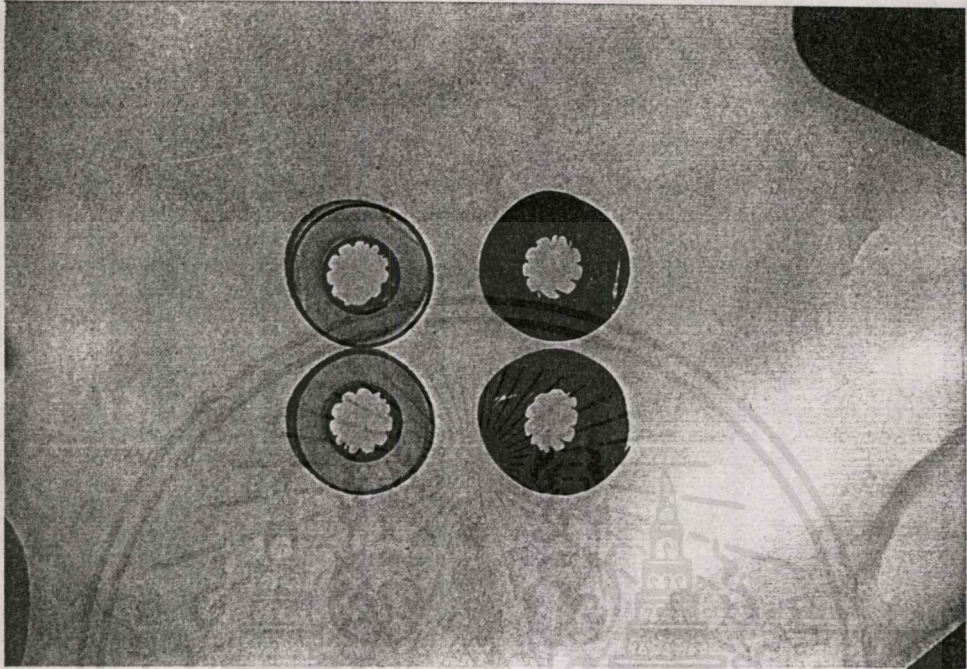


รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างของแผ่นฉนวนก่อนและหลังการทำการทดสอบหาหริ



รูปที่ 4.16 แสดงการเตรียมฉนวนเพื่อทำการทดสอบ

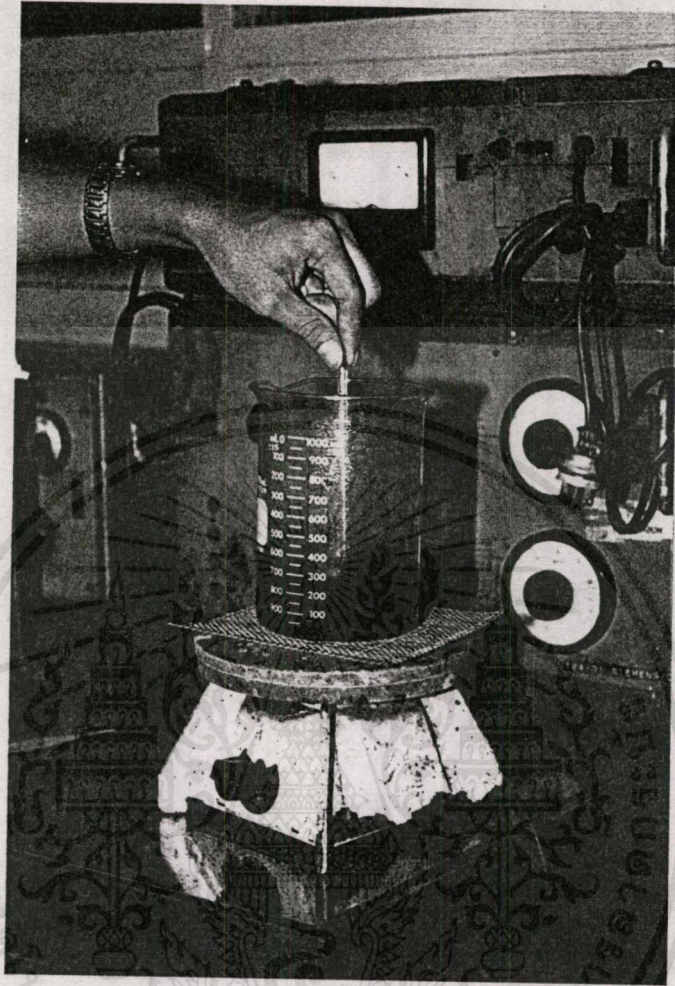
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างฉนวนที่ตัดมาจากสายตัวนำก่อนและหลังการทำการทดสอบหาหริ

วิธีการทดสอบ

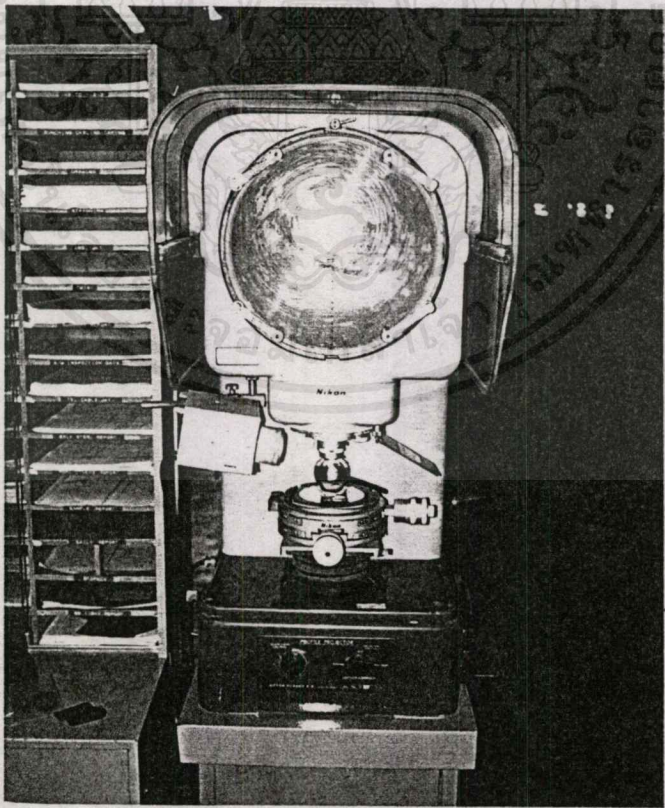
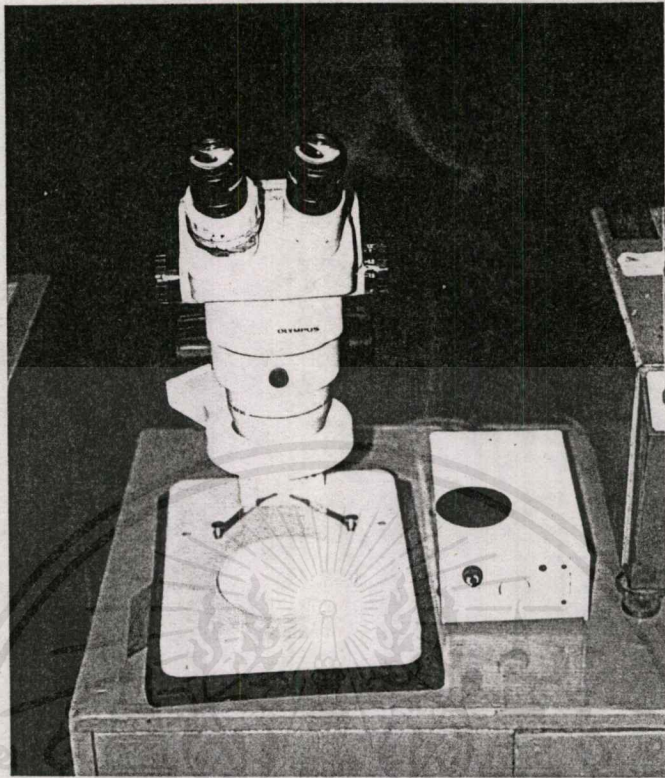
1. ใส่ น้ำกลั่น 250 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ แล้วทำการต้มให้เดือด
2. ใส่เมทิลีนบลู 0.5 กรัม คนสารให้เข้ากัน
3. ใส่แอมโมเนีย 8 มิลลิลิตร(มีกลิ่นฉุนมาก) คนสารให้เข้ากัน
4. ใส่ชิ้นทดสอบลงไปในการละลาย กวนชิ้นทดสอบประมาณ 10 นาที
5. นำชิ้นทดสอบมาเช็ดด้วยเมทิลเอทิลคีโตน



รูปที่ 4.18 แสดงการทดลอง

การตรวจสอบ

1. ตรวจสอบการเกิดทรีอิ่งในฉนวน
2. นำฉันทดสอบไปส่องด้วยกล้องขยาย ถ้าพบรอยแตก(Treeing) ให้ทำการวัดขนาดและพื้นที่รอยแตกนั้น



รูปที่ 4.20 แสดงกล้องที่ใช้ในการตรวจสอบวอเตอร์ทรี

1. กล้องจุลทรรศน์
2. กล้องโปรไฟล์โปรเจกเตอร์(Profile projector)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

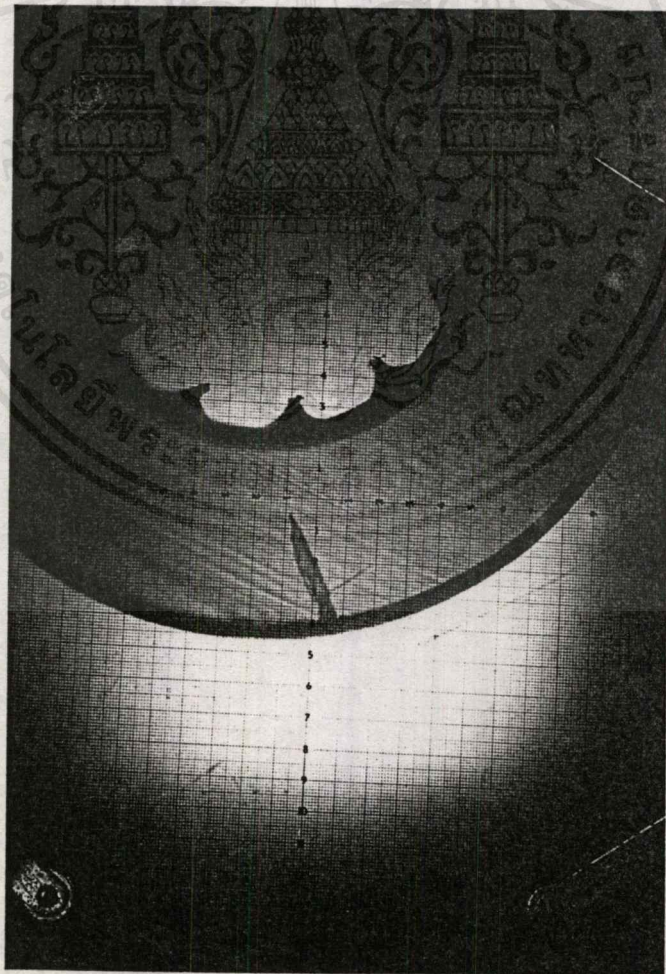
4.5 ผลการทดลอง

4.5.1 ผลการทดลองที่ 1

หลังจากการทดสอบหาวอเตอร์รีแล้วหันตามแนวที่คิดว่าจะพบวอเตอร์รี และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้ว ปรากฏว่ายังไม่สามารถพบร่องรอยของวอเตอร์รีแม้แต่เล็กน้อย แต่จะพบก็เพียงแต่ร่องรอยขีดข่วนที่ผิวของฉนวนเท่านั้น

4.5.2 ผลการทดลองที่ 2

หลังจากการทดสอบหาวอเตอร์รีแล้วส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้ว ปรากฏว่าก็ยังไม่สามารถพบร่องรอยของวอเตอร์รีเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 จะพบเพียงแต่รอยของอิเล็กโตรดปลายแหลมที่กดเข้าไปเนื้อฉนวนเท่านั้น



รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองที่ 2 ปรากฏรอยของอิเล็กโตรดปลายแหลมในเนื้อฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการทดลองที่ 3

หลังการทดสอบทาวเวอร์ที่เสร็จแล้วสองด้วยกล้องจุลทรรศน์
ของวอเตอร์ที่ได้อีกเช่นเดียวกัน

ปรากฏว่าก็ยังไม่สามารถพบร่องรอย



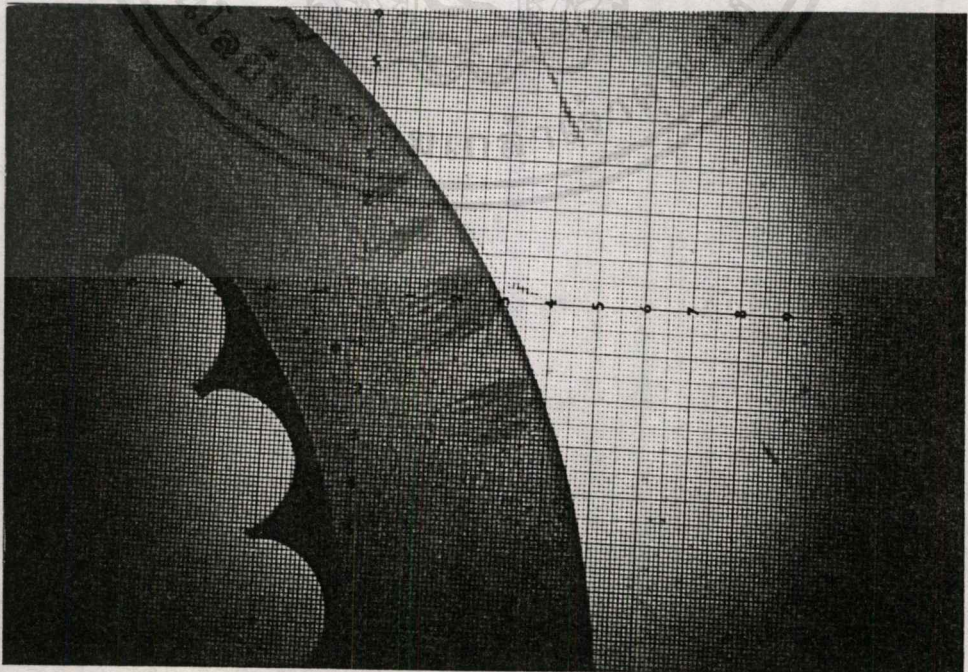
รูปที่ 4.22 แสดงร่องรอยการเกิดเบรคคานานในเนื้อฉนวนที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

จากการที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการวอเตอร์ทรีที่เกิดขึ้นกับสายครอสลิงค์โพลีเอทิลีนนั้น พบว่า การที่จะเกิดวอเตอร์ทรีขึ้นได้นั้นต้องอาศัยปัจจัยหลายประการด้วยกันที่ประกอบกันขึ้นมา อาทิเช่น แรงดันไฟฟ้า, สภาพของความชื้น, สภาพของสายตัวนำและฉนวน เป็นต้น การจะเกิดวอเตอร์ทรีขึ้นได้นั้นจะต้องอาศัยระยะเวลา นานพอสมควรในการเกิด การที่จะศึกษาการเกิดที่แท้จริงนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์มากมายในการทำการทดลอง และ การที่จะทำการทดลองการจำลองการเกิดนั้นจึงทำได้ยากไปด้วย เพราะกลไกการเกิดที่แท้จริงของวอเตอร์ทรีนั้นยัง ไม่มีผู้ใดทราบเป็นที่แน่ชัดว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร ทราบแต่เพียงปัจจัยที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดเท่านั้น

ดังนั้นการทดลองที่ทำขึ้น ก็เพียงแต่พยายามสร้างสภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดขึ้นของวอเตอร์ทรีเท่านั้น การทดลองที่ทำขึ้นพยายามให้ความเครียดทางไฟฟ้าที่สูงกว่าปกติ คือแรงดันที่ให้จะประมาณร้อยละ 80 ของแรงดันที่เกิดการเบรกดาวน์ของสายที่ทำการทดลอง และสภาวะของความชื้นในสายตัวนำก็ได้ทำขึ้นโดยแช่สายตัวอย่างลงในน้ำที่มีเกลืออยู่ เพราะจากการศึกษาพบว่าออสอนจะมีผลต่อการเกิดขึ้นของวอเตอร์ทรี และได้พยายามสร้างตำหนิให้เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนด้วยการใช้โอเลคโตรดปลายแหลมที่มเข้าไปเนื้อฉนวน เพื่อให้เครียดทางไฟฟ้า สูงกว่าปกติที่บริเวณปลายเข็ม เพื่อที่จะเอื้อแก่การเกิดวอเตอร์ทรีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.1 แสดงวอเตอร์ทรีที่เกิดขึ้นจริงในสายตัวนำที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

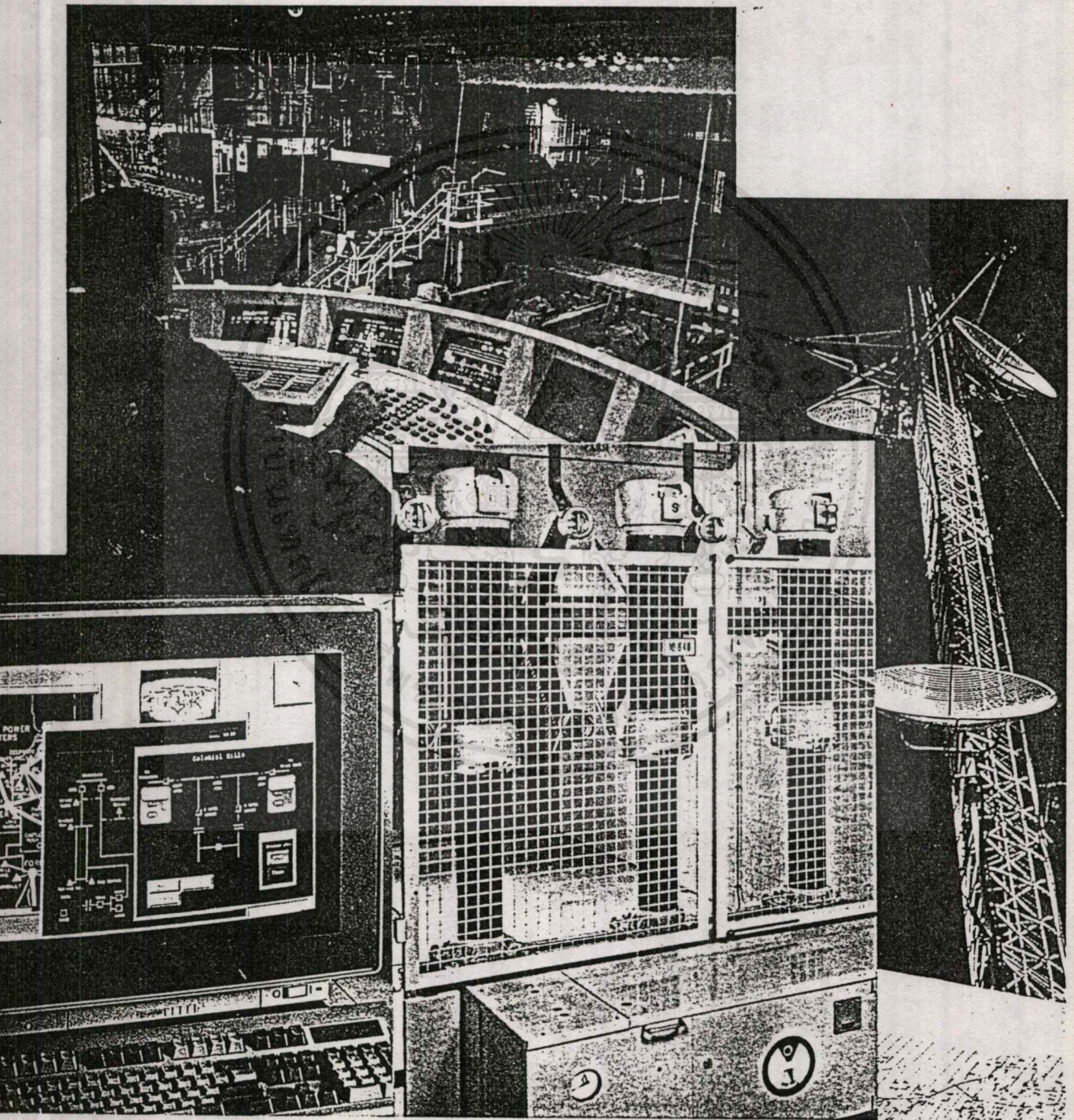
แต่หลังจากทำการทดลองที่จำลองการเกิดของวอเตอร์ทรี มาทั้งหมดนั้นยังไม่พบว่ามียวอเตอร์ทรีเกิดขึ้นในสายและฉนวนตัวอย่าง พบเพียงแต่การเบรคดาวน์ของฉนวนนั้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสภาพของสายตัวนำและฉนวนนั้นๆ ยังใหม่เกินไป และไม่มีควมชื้นแทรกเข้าไปในเนื้อฉนวนหรือระหว่างชั้นของฉนวนกับชั้นของสารกึ่งตัวนำของสารกึ่งตัวนำอย่างแท้จริงก็เป็นได้

แต่ปัจจัยที่คิดว่าน่าจะเป็นสาเหตุของการที่ไม่พบวอเตอร์ทรีนั้นคงเป็นเพราะเวลา โดยเวลาที่จ่ายแรงดันให้กับสายตัวนำนั้น เวลารวมนั้นอาจจะนานพอสมควร แต่ถ้ามีความถี่ไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย อาจจะทำให้การเกิดวอเตอร์ทรีเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น ซึ่งไม่อาจหาอุปกรณ์ที่ปรับความถี่นี้มาทำการทดลองได้ และจากการศึกษายังทำให้ทราบอีกว่า ฉนวนครอสลิงค์โพลีเอทิลีนที่มีความต้านทานในการเกิดวอเตอร์ทรีมากกว่าประเภทอื่นๆ เช่น พวกโพลีเอทิลีนและยางบิวทิล นั้นแสดงว่า การเกิดวอเตอร์ทรีในฉนวนชนิดนี้นั้นจะต้องการปัจจัยสนับสนุนเป็นอย่างมาก

และยิ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีและการออกแบบในการผลิตสายตัวนำชนิดนี้นั้น ได้รับการพัฒนามาเป็นระยะเวลายาวนานเพื่อลดการเกิดของวอเตอร์ทรี ดังนั้นอาจจะทำได้เพียงนำสายตัวนำที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมาผ่านขั้นตอนการทดสอบวอเตอร์ทรี แล้วพิจารณาคุณภาพของสายนั้นเท่านั้น

เมื่อดูโดยรวมแล้ววอเตอร์ทรีนี้ ก็ยังคงเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับสายตัวนำที่ยังหาทางแก้ไขโดยเด็ดขาดไม่ได้ โดยทำได้เพียงแต่ลดจำนวนและความหนาแน่นลงเท่านั้น

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15



3-4 ธันวาคม 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามดัดแปลงแก้ไขหรือทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากภาควิชาฯ
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

The 15th Conference on Electrical Engineering

จัดโดย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันอุดมศึกษา

ณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3-4 ธันวาคม 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณสนามไฟฟ้าในฉนวนแข็ง

The Calculation of High Voltage Fields in Solid

จงรักษ์ บุญเล็ง*, ขจร พิพัฒน์สุภรณ์**, คทา อภัยวงศ์** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

วิธีการในการคำนวณสนามไฟฟ้าในฉนวนแข็งที่นำเสนอนี้ อาศัยพื้นฐานการคำนวณจากสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้า (Field dependent Electric Conductivity) แนวคิดได้จากการสังเกตในท้องปฏิบัติกร พบว่าสภาพการนำไฟฟ้าของ acetophenone-doped polypropylene ขึ้นอยู่กับการปรับค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าอิเล็กโตรดแบบจุดพื้นราบ เป็นรูปแบบที่นิยมใช้แทนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอในสนามไฟฟ้า ในการคำนวณสนามไฟฟ้าต้องใช้การสมมติรูปแบบของอิเล็กโตรดทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันโดยให้อิเล็กโตรดแบบจุดเป็นศูนย์กลางของวงกลมด้านในและพื้นราบเป็นทรงกลมด้านนอก ในการทดลองใช้ water-dropped poly-ethylene เป็นตัวเปรียบเทียบผลการทดลอง

Abstract

A Generalized analytical for computing Electric field in solid is Introduced. It is based on the field dependent observation that Conductivity of acetophenone-doped polypropylene is field dependent over a range of applied electric stresses, a simple analysis shows that the Increasing of conductivity. For the study of the theoretical model, the needle-plate electrode system has been widely used by many investigator. We assume that a concentric spherical electrode configuration with the radius of the inner sphere much smaller than that of the outer sphere, can be approximately used to represent the needle-plate electrode configuration. The water-doped polyethylene was tested with this sets and taking the results be the reference.

*อาจารย์ **นักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3

บทนำ

การคายประจุไฟฟ้าของฉนวนแข็งภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงส่วนมากเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนแข็งสามารถจำลองรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอโดยใช้รูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดเป็นแบบจุดที่ระนาบ (point-plane) คุณสมบัติที่สำคัญของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ คือมีการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างช่องอิเล็กโทรดที่ไม่เท่ากัน ถ้าวางขอบรอบนอกของขั้วอิเล็กโทรดมีลักษณะเหมือนกัน ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีมากบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรด และมีความเข้มน้อยลงในบริเวณกลางช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ถ้าวางขอบรอบนอกของอิเล็กโทรดไม่เท่ากันหรือแตกต่างกันมาก ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีมากบริเวณขั้วอิเล็กโทรดที่มีรัศมีของความโค้งน้อยกว่าส่วนขั้วอิเล็กโทรดตรงข้าม จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าน้อยกว่าในการวัดระดับความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ากำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์แฟคเตอร์ของสนามไฟฟ้า (field coefficient factor) หรือ f เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มากที่สุด (E_{\max}) กับค่าเฉลี่ยความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_{avg}) และ ค่า f นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างอิเล็กโทรดมีมาก และรัศมีความโค้งลดลง ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนแข็งนั้นเป็นการทดสอบขั้นต้นว่า ฉนวนแข็งสามารถทนต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าหรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด เนื่องจากการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอทำให้สนามไฟฟ้ามีความเครียดสูงขึ้นและเป็นสาเหตุการเกิดเบรคดาวน์ได้ง่าย การคำนวณได้นาวิวิธีการเกิดอิเล็กทริกคอลหรืออิ้ง (electrical treeing) มาประยุกต์ใช้งาน

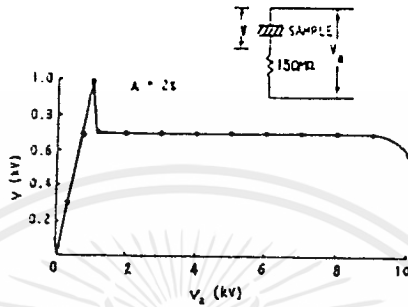
ทฤษฎี (Theory)

ความนำไฟฟ้าของสนามไฟฟ้าไม่อิสระ (The Field-Dependent Electric Conductivity) การทดลองอย่างง่ายถูกจัดขึ้นเพื่อตัดสินค่าความนำของสนามไฟฟ้าไม่อิสระโดยใช้วงจรที่แทรกในรูปที่ 1 และ 2 ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตัวอย่างที่ใช้คือ फिल्म polypropylene ทหนา $16 \mu\text{m}$ ซึ่งมี acetophenone เป็นสารเจือปนในฟิล์มนี้วางไว้ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทำด้วยทองแดง 2 แผ่นที่วางขนานกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 cm . ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ รูป 1 แสดงถึงการวัดความต่างศักย์ระหว่างตัวอย่างที่ใช้ทดสอบซึ่งมีค่าคงที่ในทางปฏิบัติเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนจาก 1.1 KV ไปเป็น 9 KV ซึ่ง แสดงถึงพฤติกรรมที่เสถียรของ acetophenone สำหรับแผ่นฟิล์ม polypropylene บริสุทธิ์ที่ปราศจากสารเจือปนความต่างศักย์ตกคร่อมตัวอย่างทดสอบจะเหมือนกับการป้อนแรงดันไฟฟ้า V_a จนถึง 2.4 KV แสดงให้เห็นว่าความนำไฟฟ้าเป็นสนามไฟฟ้าไม่อิสระ รูป 2 แสดงว่า สนามไฟฟ้าเฉลี่ย E_{av} ที่ต่ำกว่า 65 MV/m นั้นในทางปฏิบัติความนำไฟฟ้าเฉลี่ย $\sigma = J/E_{\text{av}}$ เป็นอิสระจากค่า E_{av} แต่ที่ค่า E_{av} ที่มากกว่า 65 MV/m ค่า σ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยค่า E_{av} จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่า J เป็นค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า และ E_{av} เท่ากับ V โดยแบ่งจากความหนา d อย่างไรก็ตามสำหรับ polypropylene บริสุทธิ์ที่ปราศจากสารเจือปน ค่า σ ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจนค่า E_{av} ถึง 150 MV/m บนพื้นฐานของเหตุผลเหล่านี้มีเหตุผลเพียงพอที่จะสันนิษฐานว่า acetophenone ในโพลีเมอร์เหมือนกับ ethanol ในน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้า และสามารถถือว่าเป็นอิเล็กโทรไลต์อย่างอ่อนได้ และพฤติกรรมของมัน

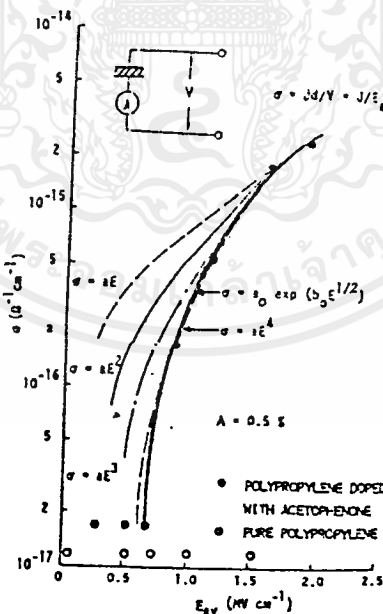
เป็นสาเหตุของการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จากการเพิ่มของสนามไฟฟ้านี้จะต้องเกี่ยวข้องกับการเพิ่มสูงขึ้นของสนามไฟฟ้าที่จะทำให้อิเล็กโตรไลต์แยกตัวออกเป็นไอออนบวกและลบ

จากการศึกษาตัวอย่างของแข็งภายใต้สนามไฟฟ้าข้อเท็จจริงที่ได้ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า

(I) หรือพิกัดการนำกระแส(σ) กับสนามไฟฟ้า (E) ของของแข็ง มีแนวโน้มและลักษณะของกราฟที่ได้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงคักดาไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างตัวอย่างที่ใช้ทดสอบซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบและตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับ polypropylene ซึ่งมี acetophenone เป็นสารเจือระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดทองแดง 2 แผ่นที่ วางขนานกันความหนาของตัวอย่างทดสอบ เท่ากับ 16 μm . เส้นผ่าศูนย์กลางของอิเล็กโตรดเท่ากับ 2.5 cm. ปริมาณสารเจือ acetophenone(A) เท่ากับ 2%

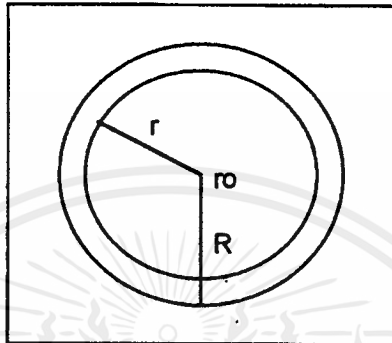


รูปที่ 2 เป็นรูปการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า σ ที่สนามไฟฟ้าเฉลี่ย E_{av} โดยใช้ตัวอย่างทดสอบเป็น polypropylene โดยมี acetophenone เป็นสารเจือและใช้อิเล็กโตรด เหมือนรูปที่ 1 วงกลมทึบเป็นข้อมูลของการทดลองของ poly-propylene ซึ่งมี acetophenone เป็นสารเจือและวงกลม กลวงเป็นข้อมูลของ polypropylene บริสุทธิ์และเส้นกราฟ เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่พอจะเข้ากับข้อมูลที่ได้ปริมาณสารเจือ acetophenone (A) เท่ากับ 0.5%

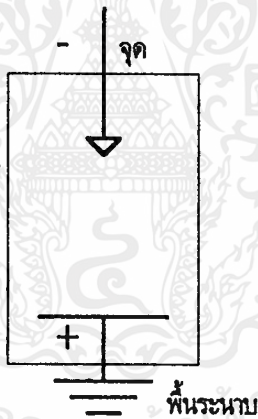
โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง $I = JS$; $I = sES$ ดังนั้น $\sigma = I/ES$ และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดการนำกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าในรูปที่ 2 เป็นดังนี้

$$\sigma = AE^b \quad [3.1]$$

โดยที่ค่า A, b เป็นค่าคงที่



รูปที่ 3 แสดงอิเล็กโทรดทรงกลมแบบมีจุดศูนย์กลาง



รูปที่ 4 แสดงรูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง

การสืบสวนการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้ระบบอิเล็กโทรดดังรูปที่ 4 จากรูปความเข้มของสนามไฟฟ้าจะอยู่บริเวณปลายสุดของอิเล็กโทรดแบบจุดมากที่สุด ในการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าต้องใช้สมมติฐานของรูปแบบของอิเล็กโทรดทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันดังรูปที่ 3 โดยให้อิเล็กโทรดแบบจุดเป็นศูนย์กลางของวงกลมข้างในรัศมี r_0 และให้จุดปลายสุดของอิเล็กโทรดแบบจุดมีรัศมี เป็น r เช่นกัน และวงกลมที่อยู่ข้างนอกมีรัศมีเป็น R ดังนั้นระยะระหว่างจุดปลายสุดกับพื้นราบเท่ากับ $R - r_0 = R$, $R \gg r_0$ และ สนามไฟฟ้า E ณ ทุกๆ จุดที่มีรัศมี r_0 ภายใต้เงื่อนไขการคงตัว (steady state) ทำได้จากความสัมพันธ์จากสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla J = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr}(r^2 J) = 0 \quad [1]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของกระแสเฉพาะในแนว r จะได้

$$\nabla J = \frac{(1)}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 J) = 0 \quad [2]$$

$$2Jr + r \frac{d}{dr} (Jr) = 0 \quad [3]$$

และ

$$Jr = \sigma E_r \quad [4]$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3 และ 4 จะได้

$$2\sigma E_r + r \frac{d}{dr} (\sigma E_r) = 0$$

$$2\sigma E_r + r \sigma \frac{d}{dr} (E_r) + r E_r \frac{d\sigma}{dr} = 0$$

นำ $(dr/r\sigma E_r)$ ทหารตลอดจะได้

$$2 \frac{dr}{r} + \frac{dE_r}{E_r} + \frac{d\sigma}{\sigma} = 0 \quad [5]$$

อินทิเกรตสมการที่ 5 จะได้

$$\ln(r^2 E_r \sigma) = C$$

$$E_r = \frac{C}{r^2 \sigma} \quad [6]$$

C เป็นค่าคงที่ในการอินทิเกรต

จากสมการที่ 6 ถ้า σ ไม่ขึ้นกับ E_r แล้ว E_r จะแปรผกผันตาม r^2 นั่นคือสนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางกำลังสอง และถ้า σ ขึ้นอยู่กับ E_r แล้วสมการที่ 1 ในสมการที่ 6 จะได้

$$E_r = \frac{C}{A E_r^b \cdot r^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ErEr^b = \frac{C}{Ar^2}$$

$$Er^{b+1} = \frac{C}{Ar^2}$$

$$Er = \frac{(C)^{1/(b+1)}}{A} \cdot r^{-2/(b+1)} \quad [7]$$

ถ้า $b=0$

$$Er = \frac{C}{Ar^2} \quad [8]$$

ถ้า $b=1$

$$Er = \frac{(C)^{1/2}}{A} \cdot r^{-1} \quad [9]$$

ใช้ boundary condition

$$\begin{aligned} Ur &= \int Er dr \\ Ur &= Er(R - r_0) \\ Ur &= Er \cdot r \end{aligned} \quad [10]$$

แทนค่าในสมการที่ 7

$$\frac{C}{A} = Ur \cdot r^{\frac{(1-b)}{(1+b)}}$$

ที่ $b=0, r=r_0$

$$\frac{C}{A} = Ur \cdot r_0$$

แทนค่าในสมการที่ 7

$$Er = E_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad [11]$$

$$E_0 = \frac{Ur}{r_0} \quad [12]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันที่ $b = 1$ จะได้

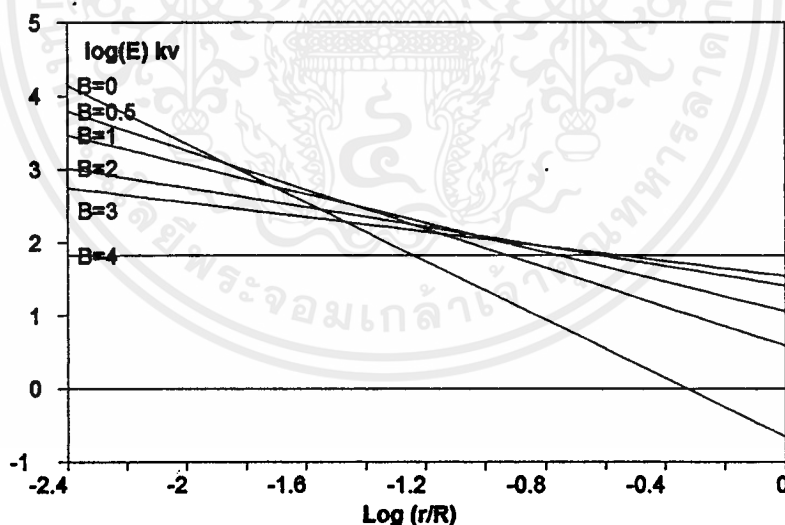
$$E_r = E_0 \frac{r_0}{r} \quad [13]$$

$$E_0 = \frac{Ur}{r_0 \ln(R/r_0)} \quad [14]$$

ที่ $b \neq 1$ จะได้

$$E_r = E_0 \frac{r_0^{\frac{2}{b+1}}}{r} \quad [15]$$

$$E_0 = \frac{(b-1) \cdot Ur}{(b+1) \cdot r_0^{\frac{2}{b+1}} \cdot [R^{\frac{b-1}{b+1}} - r_0^{\frac{b-1}{b+1}}]} \quad [16]$$



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ E_r กับ $\log(r/R)$

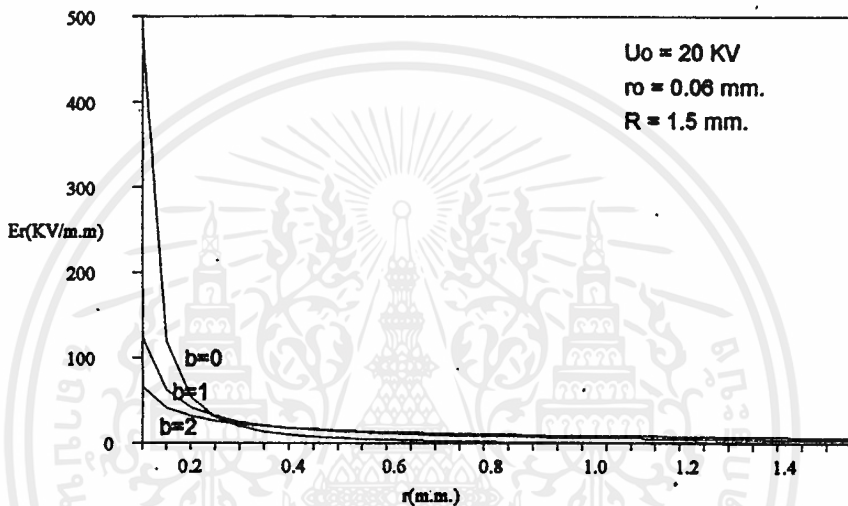
จากสมการที่ 11-15 จะเห็นได้ว่า E_r เป็นฟังก์ชันของ r/R และ ค่า E_r เป็นฟังก์ชันของ r_0 จากกราฟรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของ b จะขึ้นอยู่กับพิกัดการนำกระแสไฟฟ้าของฉนวนและค่าต่ำสุดของ b ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่มีความตึงเครียดสูงสุด คือ บริเวณปลายสุดของอิเล็กโตรดแบบจุดนอกจากนี้ยังบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับพิกัดการนำกระแสไฟฟ้าในของแข็งซึ่งสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ปลายของอิเล็กโตรดในขณะใดๆ U_0 สามารถหาค่าของความเข้มของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น E_0 จากสมการที่ 12,14 และ 16 ดังนี้

$$b = 0 : \quad U_o = E_o r_o \quad [17]$$

$$b = 1 : \quad U_o = E_o r_o \ln(R / r_o) \quad [18]$$

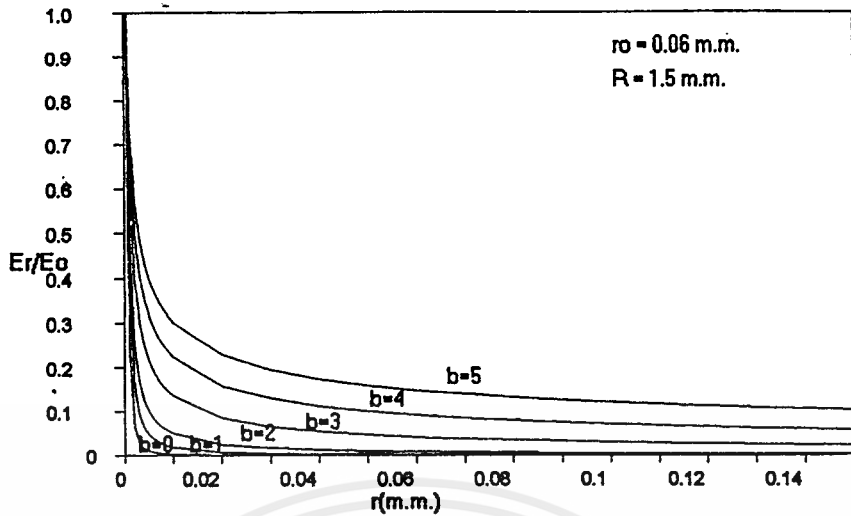
$$b \neq 1 :$$

$$U_o = E_o r_o \cdot \frac{(b+1)}{(b-1)} \cdot \frac{R}{r_o} \left[\left(\frac{r}{r_o} \right)^{(b-1)} - 1 \right] \quad [19]$$



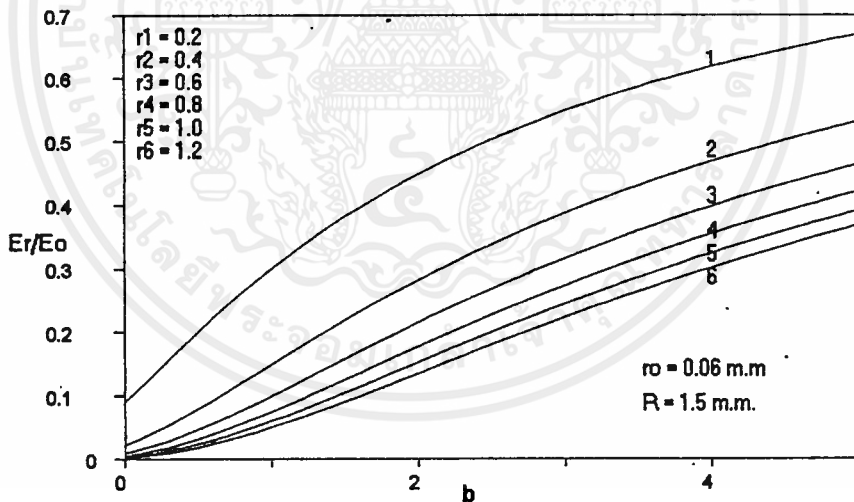
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r กับ r

จากรูปที่ 6 เป็นการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r ในเทอมของ r โดยสมมติค่าของ $U_o = 20$ KV $r_o = 0.06$ ม.ม. และระยะแกป $R = 1.5$ ม.ม. ถ้า $b = 0$ ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ปลายสุดหรือ E_o มีค่าเป็น 330.34 KV/mm ซึ่งมีค่าสูงมาก ถ้าค่า r มีค่า 0.1 ม.ม. ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่า 120 KV/mm ลดลง 2.7 เท่า ถ้า $b = 1$ และ 2 ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็น 103.55 และ 30.3 KV/mm. ตามลำดับ ผลที่ได้จากกราฟรูปที่ 6 สรุปได้ว่าความสัมพันธ์ในสมการที่ 1 ถ้า b มีค่ามากความเครียดของสนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลงนั่นคือของแข็งชนิดนั้นมีพิภคทนนำกระแสได้ดีกว่าของแข็งที่มีค่า b น้อย



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของ E_r/E_o และ r

จากรูปที่ 7 เป็นการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_o ในเทอมของ r โดยมี $r_0=0.06$ ม.ม. $R=1.5$ ม.ม. ถ้าค่าของ b มาก E_r/E_o จะมากตามไปด้วย นั้นแสดงให้เห็นว่า ถ้าอัตราส่วนระหว่าง E_r/E_o มีค่ามากกว่าการกระจายของสนามไฟฟ้า ณ สองจุดที่อยู่ติดกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน

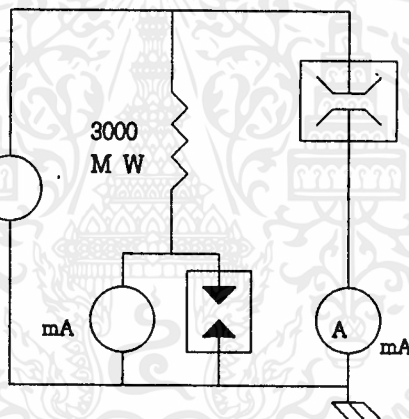


รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_o กับ b

จากรูปที่ 8 เป็นการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_o ในเทอมของ b เป็นแบบเส้นตรงที่ $b > 2$ โดยปกติอัตราค่าเพิ่มของ E_o กับค่าของ b ไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลองการลดลงของ E_r ด้วยการเพิ่มค่า b ทำให้อัตราการเพิ่มของ E_o ลดน้อยลงสำหรับค่า b สูงๆ

วิธีการและอุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองใช้อิเล็กโตรดทองเหลืองแบบโรโกสกีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 cm เนื่องจากการทดลองนี้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ประมาณ 30 KV ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3.2 cm สามารถลดความเครียดของสนามไฟฟ้าตามขอบอิเล็กโตรดได้ ทำให้กระแสที่ไหลเนื่องจากการเกิดโคโรนาไม่เกิดขึ้น เพราะในการทดลองนี้กระแสที่ไหลทดลองหรือที่ไหลในวงจรมีอยู่ในระดับ μA ดังนั้นต้องป้องกันการเกิดโคโรนาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0-600KV ป้อนเข้าที่ขั้วของอิเล็กโตรด เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีการต่อแบบ Double circuit ทำให้ขั้วออกมาเป็นลบ ทำให้ต้องต่อขั้ววาโนดของอิเล็กโตรดที่กราวด์ สำหรับการทดลองใช้ Polyethylene มีความหนา 20 μm และหนา 40 μm เมื่อนำมาทดลองต้องใช้น้ำเคลือบบางๆ เพื่อให้หน้าเกาะติดกับแผ่น Polyethylene จากนั้นนำแผ่นที่เปียกน้ำไปวางไว้ระหว่างอิเล็กโตรด ข้อควรระวังในการทดลองต้องพิจารณาในการนำน้ำเคลือบแผ่นฟิล์มต้องไม่มากจนเกินไป เพราะจะเกิดดิสชาร์จเนื่องจากมีน้ำเป็นตัวกลาง ในบางครั้งจะเกิดการดิสชาร์จขึ้นมากกระแสไหลมาก การทดลองครั้งนั้นต้องยกเลิกไป



รูปที่ 9 แสดงวงจรการทดลอง

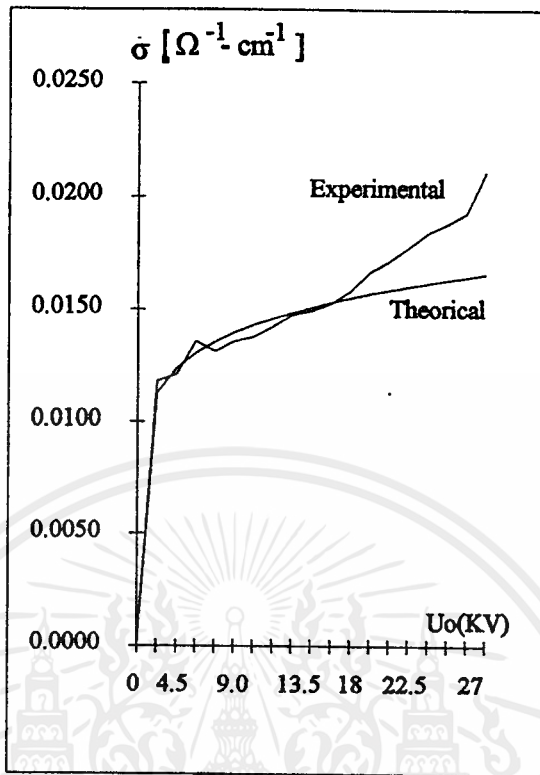
ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองต้องทำหลายๆ ครั้งแล้วนำผลที่ดีที่สุดมาบันทึกผลดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าสามารถหากระแสได้ จากนั้นใช้สูตรแปลงกระแสเป็นการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปพล็อตกราฟระหว่าง การนำกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

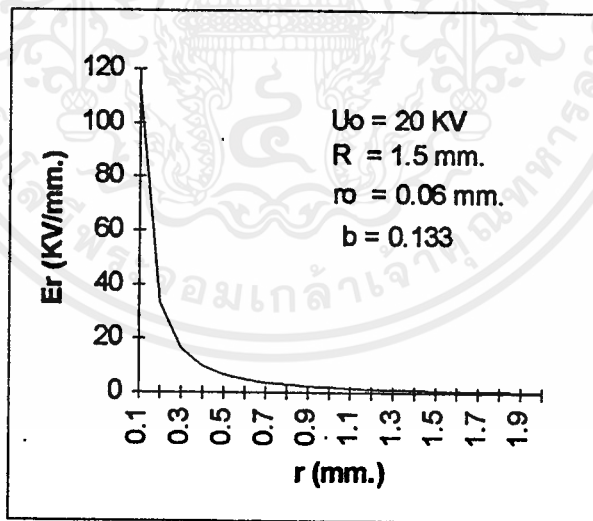
ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลอง

U_0 (KV)	I_a (μ A)	σ (Exp.)	σ (Theo.)
0.00	0.00	0.0000	0.0000
1.50	0.20	0.0118	0.0113
3.00	0.41	0.0121	0.0124
4.50	0.69	0.0136	0.0130
6.00	0.89	0.0131	0.0135
7.50	1.15	0.0136	0.0140
9.00	1.40	0.0138	0.0143
10.50	1.69	0.0142	0.0146
12.00	2.00	0.0147	0.0149
13.50	2.28	0.0149	0.0151
15.00	2.59	0.0153	0.0153
16.50	2.95	0.0158	0.0155
18.00	3.39	0.0167	0.0157
19.50	3.78	0.0171	0.0158
21.00	4.21	0.0177	0.0160
22.50	4.68	0.0184	0.0162
24.00	5.10	0.0188	0.0163
25.50	5.55	0.0192	0.0164
27.00	6.45	0.0211	0.0165

จาก $\sigma = AE^b$ แทนค่า E ด้วย U_0 และ แทนค่า σ จะสามารถหาค่า A กับ b เมื่อได้ค่า A และ b แล้ว นำค่า b ไปแทนในสมการที่ 16 + 15 จากนั้นพล็อตหาค่า E_r แปรตาม r โดยให้ $R=1.5\text{mm}$. $r_0=0.06\text{mm}$.
ดังรูป



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ กับ U_0



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r กับ r ในแผ่น Polyethylene

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและจากการวิเคราะห์ผล แสดงให้เห็นว่าการคำนวณสนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีการนำไฟฟ้าของสนามไฟฟ้าไม่มีอิสระ สามารถหาสนามไฟฟ้าในฉนวนแข็งได้ดีและแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Omar E. Ibrahim[2] มีลักษณะคล้ายกัน การเพิ่มขึ้นของค่า r จะมีผลให้สนามไฟฟ้าลดลง อย่างมากและจะลดลงเป็นศูนย์เมื่อระยะ r มีค่าประมาณ 1.9 mm. ดังรูปที่ 11

ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอที่ แสดงให้ดูในบทความนี้มีข้อผิดพลาดเนื่องจากการตั้งสมมุติฐาน 2 ขั้นตอนคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า σ กับค่า E ดังสมการที่ 3.1 และการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ กับ E จากการทดลองซึ่งไม่ได้วัดค่า σ จริงแต่วัดค่า I แทนแล้วนำมาคำนวณ ซึ่งผลทั้ง 2 ข้อนี้อาจทำให้การคำนวณมีข้อผิดพลาด แต่แนวโน้มของความเป็นจริงที่เกิดขึ้น จะมีลักษณะเหมือนที่ได้จากการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. M. Tu, L. H. Wu, X. Z. Wu and C. K. Cheng and K. C. Kao "On the mechanism of treeing inhibition by additives in polyethylene" IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-17, pp. 539-545, 1982
- [2] Omar E. Ibrahim "An expression for the electric field distribution in rod-plane gaps" IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol 23 No. 3, pp. 493-494, 1988
- [3] E. Kuffel and W.S. Zengengl "High Voltage Engineering" Pergamon Press Ltd., 1984

ภาคผนวก ข.

SPECIFICATIONS FOR
THERMOPLASTIC AND CROSSLINKED POLYETHYLENE
INSULATED SHIELDED POWER CABLES
RATED 5 THROUGH 46 KV
(8TH EDITION)

Prepared by Cable Engineering Section, Committee on Power Distribution,
Association of Edison Illuminating Companies.

AEIC Specifications are adopted in the public interest and are designed to eliminate misunderstanding between manufacturer and the user, and to assist the user in selecting and obtaining the proper product for his particular need. Existence of any AEIC Specification does not in any respect preclude the manufacture or use of products not conforming to the Specification. Use of the AEIC Specification is at the user's own risk. AEIC makes no warranties or representations concerning the specifications and the user is to satisfy itself that the specification is adequate and appropriate for use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTENTS

<u>Section</u>	<u>Page</u>
A. General	1
B. Qualification Tests	4
C. Insulation Thickness and Test Voltages	10
D. Semiconducting Shielding	14
E. Production Sampling Tests	16
F. Tests on Completed Cable	19
G. Partial Discharge Test	20
H. Extruded Insulation Shielding Test	22
I. Cable Identification	22
J. Conditions Applying to Tests	23
K. Tests During and After Installation	25
L. Shipment and Reels	26
M. Guarantee	27
N. Information to be Supplied by Purchaser	27
O. Procedure for Determining Diameters	28
P. Referred Industry Standards	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS FOR
THERMOPLASTIC AND CROSSLINKED POLYETHYLENE INSULATED,
SHIELDED POWER CABLES RATED 5 THROUGH 46 kV

A. GENERAL

A.1 Scope

These Specifications are intended to supplement applicable ICEA-NEMA Standards for thermoplastic polyethylene and crosslinked thermosetting polyethylene (referred to in these specifications as crosslinked polyethylene) insulated cables rated 5 through 46 kV and used for the transmission and distribution of electric energy. Cables purchased under these specifications shall, unless otherwise specified, meet the requirements of the applicable ICEA-NEMA Standards and the modifications and additions given in the subsequent paragraphs. Also, unless otherwise specified, the frequency of making tests or taking samples shall be in accordance with the applicable ICEA-NEMA Standards, S-66-524 and S-61-402.

A.1.1 Since the original issue of this document, extensive field performance results and laboratory data has been accumulated. This experience has shown that cables with thermoplastic insulation which have been installed in a wet environment may have a reduced life expectancy, especially at higher dielectric operating stresses. When these conditions are anticipated, the user should consult with the manufacturer and consider such options as increased insulation thickness, tree resistant compounds, metallic sheath, and filled conductor strand. Pending further experience, it is suggested that similar consideration also be given when specifying XLP insulation for these conditions.

A.1.2 The user of this specification should recognize that many options are included. The user should select the necessary options required for a complete description of the desired cable.

Conductor - See ICEA-NEMA Standards

Metal - copper (bare or coated) or aluminum 1350

Aluminum Conductor Temper - hard, three-quarter hard, or half-hard

Conductor Stranding - solid, concentric, compressed, or compact, Class B or C

Conductor Size

Stress Control Layer (conductor shield) - See Paragraph D.1

Insulation - See Paragraph A.3

Material - Thermoplastic or crosslinked polyethylene (filled or unfilled)

Insulation Thickness - Depends on voltage rating and Column A or B choice - See Table C1

Non-Metallic Insulation Shielding - See Paragraph D.2 and D.4

Semiconducting polymeric coverings - extruded (thermoplastic, deformation resistant thermoplastic, or crosslinked) compound, or combination of extruded compound or tape with coating (paint)

Metallic Shielding - See ICEA-NEMA Standards

Metallic electrostatic shielding - copper tapes (flat or corrugated) or wires (bare or coated)

Metallic electrostatic shielding combined with Neutral

Metallic shield requirements for fault current - See ICEA Publication P-45-482

Overall Covering - See ICEA-NEMA Standards

Thermoplastic or crosslinked jacket (polymeric), sheath (metallic), material of jacket or sheath

Single or Multiple Conductor Assemblies - See ICEA-NEMA Standards

Identification - See Section I

A.2 Maximum Operating Temperatures

A.2.1 The design and construction of the cable shall be such that the cable will operate satisfactorily in wet or dry locations at conductor temperatures not exceeding those shown in Table A1.

A.2.2 The temperatures in Table A1 under the subheading "Normal Operation" are applicable to operating load cycles typical of electric light and power systems.

A.2.3 The temperatures in Table A1 under the subheading "Emergency Operation" are applicable for an average over several years, of one period of not more than 36 hours per year and for a total of not more than three periods in any 12 consecutive months. (Joint and termination limitations or cable environmental conditions may require the use of lower emergency operating temperatures.)

TABLE A1

Maximum Conductor Temperatures °C
(5 through 46 kV)

<u>Type Insulation</u>	<u>Normal Operation</u>	<u>Emergency Operation</u>	<u>Short Circuit Operation</u>
Thermoplastic Polyethylene	75	90	150
Crosslinked Polyethylene	90	130	250

A.2.4 These maximum temperatures (the actual hottest portion of the line or circuit at any time) may be used in ampacity calculations when adequate information is known about the overall thermal characteristics of the cable environment to assure that these temperatures will not be exceeded. In the absence of this information, the permissible conductor temperatures should be reduced by 10 °C or in accordance with available data.

A.2.5 When the user is considering operation at emergency temperatures, he is cautioned to consider the thermal deformation characteristics of the semiconducting insulation shielding system.

A.3 Insulation, Voids and Contaminants

A.3.1 Thermoplastic Polyethylene Insulation - The insulation shall be a virgin, high-molecular weight thermoplastic polyethylene compound which, before application to the conductor, shall comply with the requirements of ASTM D 1248, latest edition, Type I, Class A, Category 4 or 5, Grade E4 or E5. The insulation of the completed cable shall be free from:

1. Any void larger than 2 mils.
2. Any contaminant larger than 7 mils in its largest dimension. The number of contaminants of sizes between 2 and 7 mils shall not exceed 15 per cubic inch of insulation for all voltages.
3. Any translucent material that is larger than 50 mils in its radial vector projection.

The method of examination and frequency of sampling shall be in accordance with Section E and J. In-plant repairs of the insulation are prohibited unless specifically agreed to by the purchaser.

A.3.2 Crosslinked Polyethylene Insulation - The insulation shall be crosslinked polyethylene. The insulation of the completed cable shall be free from:

1. Any void larger than 3 mils. The number of voids larger than 2 mils shall not exceed 30 per cubic inch of insulation for all voltages.
2. Any contaminants (opaque material or material that is not homogeneous crosslinked polyethylene) larger than 7 mils in its largest dimension. The number of contaminants of sizes between 2 and 7 mils shall not exceed 15 per cubic inch of insulation for all voltages.
3. Any translucent material that is larger than 50 mils in its radial vector projection.

The method of examination and frequency of sampling shall be in accordance with Section E and J. In-plant repairs of the insulation are prohibited unless specifically agreed to by the purchaser.

"Filled" crosslinked polyethylene contains 10 percent or more of mineral fillers by weight. An unfilled compound may contain up to 2-1/2 percent carbon black for use at 5 kV and no carbon black over 5 kV.

A.4 Semiconducting Shielding, Voids and Protrusions

A.4.1 Semiconducting extrusion for conductor shielding shall be free of any voids larger than 3 mils. The number of voids larger than 2 mils shall not exceed 30 per cubic inch of conductor shield. Results shall be recorded and reported for Engineering Information only.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของกรมการช่างไฟฟ้าและเครื่องกลของกรมการช่างไฟฟ้าและเครื่องกล
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A.4.2 Semiconducting extrusion for insulation shielding shall be free of any voids larger than 5 mils. The number of voids larger than 3 mils shall not exceed 30 per cubic inch of insulation shield. Results shall be recorded and reported for Engineering Information only.

A.4.3 The contact surface between semiconducting extrusions and the insulation shall be free from protrusions or irregularities which extend from the cylindrical surface of the extrusion by more than 5 mils toward the insulation or 10 mils away from the insulation for the conductor shield, or + 10 mils for the insulation shield.

A.5 When reference is made in this publication to an industry standard, that reference is to a Standard with the title and date of issue as listed in Section P.

A.6 Symbols used in this specification.

Vr = phase-to-phase voltage
Vg = phase-to-ground voltage
Vt = test voltage
pC = picocoulombs

B. QUALIFICATION TESTS

Qualification tests included in this section are intended to demonstrate the capability of the manufacturer to furnish high quality cable with the desired performance characteristics.

High voltage time test (B.1), impulse test (B.2), cyclic aging test (B.3), resistance stability test (B.4), and an accelerated water treeing test (B.5) shall be made initially and subsequently whenever the conductor shield, insulation or semiconducting insulation shield compounds are changed, or when requalification is required.

Where a conductor shield compound has been qualified for use with an insulation compound and with a number of insulation shield compounds, a change of the conductor shield compound shall require requalification with the approved insulation compound and any one of the approved insulation shield compounds.

Where an insulation shield compound has been qualified for use with an insulation compound and with a number of conductor shield compounds, a change of the insulation shield compound shall require requalification with the approved insulation compound and any one of the approved conductor shield compounds.

When any qualified insulation compound is changed, requalification will be required with all conductor shield and insulation shield compounds for which approved status is desired.

Requalification tests for previously qualified constructions are required on one sample in accord with the following:

- a) Each insulation shall be requalified at 24 month intervals.
- b) Each insulation shall be requalified for major processing changes, such as replacement of steam cured with dry cured equipment on extrusion lines.

It is intended that the product furnished under this specification shall consistently comply with the qualification test requirements. All data shall be recorded and reported according to J.2. The results of a failure dissection and examination shall be included.

For qualification of 5 through 15 kV rated cables, one sample of 15 kV rated cable with a wall thickness of 175 mils, and a conductor size between 1 AWG and 250 kcmil inclusive shall be tested (1/0 AWG preferred).

For qualification of 5 through 35 kV rated cables, one sample of 35 kV cable with a wall thickness of either 345 or 420 mils, and a conductor size between 1 AWG and 250 kcmil inclusive shall be tested (1/0 AWG preferred).

For qualification of 46 kV rated cables, one sample with a wall thickness of either 445 or 580 mils and a conductor size between 500 and 2000 kcmil inclusive shall be tested.

NOTE: Any specific cable may be qualified on its own kV rating.

B.1 High Voltage Time Test

A high voltage time test shall be made on samples of cable (10' minimum length between terminals) with rated voltages of 15 kV and higher after conditioning in accordance with Section B.3

The test frequency shall be 60 Hz. The test shall be performed with the cable at room temperature. A test voltage equal to 100 V/mil shall be applied under the conditions stated in Part 6 of ICEA Standard S-61-402 and held for a period of one hour. The voltage shall then be increased in 40 V/mil steps and held for 1/2 hour at each value, continuing to cable breakdown. The V/mil stress is calculated with the thicknesses from Table C1.

A sample which fails to withstand the 420 V/mil step (1st 5 hrs.) shall be considered to have failed to meet the qualification test requirements.

The results of each cable test, cable failure dissection and examination shall also be recorded and reported as engineering information.

On 15 kV rated cable, the test may be discontinued only by reason of a cable failure outside the terminations. On cable rated 25 thru 46 kV, the test may be discontinued by reason of a termination failure only if the 620 V/mil step has been concluded.

B.2 Impulse Test

An impulse test to establish performance characteristics shall be made on samples of cable, (10' minimum length between terminals) with rated voltages of 15 kV and higher in accordance with IEEE Standard No. 82, Test Procedure for Impulse Voltage Tests on Insulated Conductors.

เอกสารนี้เป็นความลับ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The test shall be made on samples of cable with rated voltages of 15 kV and higher after conditioning in accordance with Section B.3. The sample shall be placed in a pipe for the complete test. The pipe ends shall be suitably closed.

The impulse withstand test shall be performed with the temperature of the conductor at 90°C in case of thermoplastic polyethylene, and at 130°C in case of crosslinked polyethylene. The 90°C and 130°C shall be achieved by circulating current in the conductor. Following the impulse withstand test, reduce the temperatures to the operating level of 75°C or 90°C respectively and continue to impulse breakdown.

Three impulses of each polarity with a magnitude equal to the BIL shown in Table B1 shall be applied. The voltage is then to be raised over the BIL withstand values listed below in steps of approximately 25 percent of BIL with three impulses of negative polarity applied at each step and continuing to cable breakdown outside the terminals.

For purpose of this specification, the BIL and impulse withstand values are as follows:

TABLE B1

<u>Cable Rating</u> <u>kV</u>	<u>BIL</u> <u>kV</u>	<u>Required Impulse</u> <u>Withstand Voltage kV</u>
5	60	75
8	95	120
15	110	140
25	150	190
28	150	190
35	200	250
46	250	310

The results of a failure dissection and examination of each sample shall be recorded and reported.

B.3 Cyclic Aging Test. Sufficient additional sample length is required to provide aged cable for tests B.1 and B.2.

The test shall be performed in accordance with the following procedure. The cable shall be installed in 3" plastic conduit with suitably closed ends.

1. After a minimum seven day period from the time the cable has been manufactured for 5 through 35 kV and ten days for 46 kV cables, the initial partial discharge level shall be measured as specified in Table F1.

Also, measure the dissipation factor at voltages given in Table F1 and at room temperature. Unless there is specific agreement by purchaser and manufacturer on other values, the dissipation factor shall not exceed 0.1 percent for thermoplastic polyethylene and crosslinked polyethylene without fillers or additives (other than those normally used in processing). If fillers and/or additives are used, the dissipation factor shall not exceed 0.5 percent.

If the partial discharge values in picocoulombs exceed the values specified in Table F1, or if the dissipation factor limits are exceeded, the test shall be terminated and the cable design rejected.

2. Using the same cable sample as in 1., a continuous 60 Hz voltage of three times rated voltage to ground shall be applied for 30 days.

A load current shall be applied to the conductor for approximately eight continuous hours each working day. The load current shall produce a conductor temperature of 90°C for thermoplastic polyethylene and 130°C for crosslinked polyethylene for a period of not less than six hours per working day.

3. At the midpoint of the test period (15 days) and at the end (30 days), the partial discharge in picocoulombs at room temperature and at test temperature shall be measured as specified in Table F1, and plotted. The dissipation factor at voltages given in Table F1 and at room temperature and at test temperature shall also be measured. If the partial discharge values in picocoulombs exceed the values specified in Table F1, or if the dissipation factor limits are exceeded, the test shall be terminated and the cable design rejected.

B.3.1 Physical Examination - At the end of the 30-day test period, a two foot sample of the cable shall be dissected and the individual components examined to determine what changes have taken place during the cyclic loading. The balance of the cable will be used for tests B.1 and B.2.

This examination shall include tests as described in Section D.5 to measure the volume resistivity of the conductor and insulation shields, and tests to measure the insulation tensile strength and elongation at rupture.

B.3.2 Report - When requested in accordance with J.2, a complete report shall be submitted to the purchaser with tabulations of the physical examination results, including: (1) number, size and location of cable sections examined; (2) all load currents; (3) conductor temperatures; (4) partial discharge values; (5) voltages and (6) dissipation factor measurements.

B.4 Resistance Stability Test

The requirements described in ICEA Publication T-25-425 shall be met.

B.5 Accelerated Water Treeing Test (For Trial Use and Engineering Information Only)

B.5.1 General - This test procedure is applicable for single conductor extruded dielectric cables manufactured with thermoplastic or crosslinked polyethylene insulation. The test samples selected for testing shall be a minimum of 15 feet long (active shielded length) and shall be rated 15 kV, with a 175 mil wall. The conductor size shall be between #2 AWG and #4/0 AWG; #1/0 AWG preferred. The conductor shall be compressed class B stranded aluminum.

B.5.2 Preconditioning of Test Samples - Prior to testing cables for accelerated electrochemical treeing, the overall jacket, if any, shall be removed from each cable sample. Appropriate stress relief terminals shall then be installed on the cable and an ac voltage of 200 volts/mil shall be applied to the center conductor of the sample for five minutes. The sample shall then be installed inside a nominal 3 inch plastic conduit with the conduit ends closed. Measure the power factor at voltages given in Table F1 and at room temperature. Then precondition the cable as follows:

B.5.2.1 Thermoplastic Cables - Two samples of thermoplastic cable are required for the preconditioning test. While maintaining rated 8.7 kV on the cable samples, current shall be circulated in the conductor for 50 hours at 75°C and subsequently for 150 hours at 90°C.

B.5.2.2 Crosslinked Cables - Two samples of crosslinked cable are required for the preconditioning test. While maintaining 8.7 kV on the cable samples, current shall be circulated in the conductor for 50 hours at 90°C and subsequently for 150 hours at 130°C.

B.5.3 Test Sample Preparation - When the appropriate preconditioning is completed, provisions shall be made to fill the conductor strand interstices of the entire sample with tap water and to maintain this condition throughout the test. After the conductor is filled, 50 to 75 percent of the test sample length shall be immersed in tap water by filling the conduit and sealing the ends of the conduit. The treeing test shall then be commenced with one of the following procedures:

B.5.4 Test Procedures - Two test procedures for accelerated treeing are outlined herein. Either procedure may be used, depending on the availability of time or test equipment.

B.5.4.1 Test I - Test Voltage: 85 volts/mil (average stress)
Test Frequency: 950 - 1050 Hz
Load Cycle: The load cycle for current shall be 8 hours on per day with the maximum conductor temperature being attained for a minimum of 6 hours each day. The current shall be cycled for 5 days during each week. The voltage shall be maintained for the entire test period of 90 days.

(*)

Conductor Temperature:

For thermoplastic polyethylene cables the maximum conductor temperature shall be 75°C.

For crosslinked polyethylene insulated cables the maximum conductor temperature shall be 90°C.

B.5.4.2 Test II - Test Voltage: 150 volts/mil (average stress)

Test Frequency: 49-61 Hz (state nominal frequency utilized)

Load Cycle: The load cycle for current shall be 8 hours on per day with the maximum conductor temperature being attained for a minimum of 6 hours each day. The current shall be cycled for 5 days during each week. The voltage shall be maintained for the entire test period of 120 days.

(*)

Conductor Temperature:

For thermoplastic polyethylene insulated cables the maximum conductor temperature shall be 75°C.

For crosslinked polyethylene insulated cables the maximum conductor temperature shall be 90°C.

(*) Maximum conductor temperature may occur on sample sections in water or in air depending on methods employed for providing the water jacket on the outside of the cable.

B.5.5 Dissipation Factor Test - measure the dissipation factor at rated voltage to ground at room temperature upon completion of the accelerated water treeing test.

B.5.6 AC Breakdown Test - An ac breakdown test shall be performed upon completion of the accelerated water treeing test. This test shall be performed immediately after the termination of the treeing test; preferably, within the same working day. If this is not possible, the sample shall be stored in water until the ac breakdown test can be completed. When special cable terminals (i.e., water terminals, etc...) are employed for the breakdown tests, the minimum 15 foot

active cable length shall not be shortened by the application of such terminals. Without draining the water from the conductor, an ac voltage of 100 volts/mil shall be applied to the center conductor of the test sample for one hour with increasing voltage steps of 40 volts/mil for 1/2 hour each, until breakdown. Dielectric breakdown shall occur in the active shielded section of the cable sample. Retermination is permitted should breakdown occur in the terminal. The cumulative time and voltage at breakdown shall be recorded and reported for engineering information only.

B.5.7 Impulse Breakdown Test - an impulse breakdown test shall be performed on one of the two samples from the accelerated water treeing test. The sample treatment shall be as described in B.5.6 for the ac breakdown test. All testing is to be at room temperature. Use IEEE Standard No. 82 for the test procedure. Should a failure result at a value equal to or below the BIL rating, reterminate the longest remaining cable length and retest the sample.

The results of the testing and failure dissection shall be recorded and reported as engineering information.

B.5.8 Tree Count - Upon completion of the AC breakdown test, a minimum of thirty wafers approximately 25 mils thick and one or more wafers approximately 5 mils thick shall be cut from sections adjacent to the cable fault, dyed in an appropriate manner and examined for water and electrical treeing. Tree size (mils) and density (number per cubic inch of insulation) shall be counted and plotted on five cycle semi log paper, with the number of trees plotted on the ordinate and the size plotted on the abscissa of the graph. This data shall be reported for engineering information only. The samples shall be maintained for 24 months. The following tree counts shall be made.

B.5.8.1 Count and record on all wafers the number and size of trees 10 mils and larger emanating from the conductor and insulation shield surfaces.

B.5.8.2 Count and record on all wafers the number and size of trees 10 mils and larger in the insulation (bow-ties). The suggested size groups are: 10- 20 mils, 21-30 mils, 31-40 mils, etc.

B.5.8.3 Count and record the number and size of trees (bow-ties) 2 mils and larger in a representative section of one thin (approximately 5 mil) wafer. It is recommended that a 100 mil x 100 mil area in the center of the insulation wall of the wafer be used for this purpose. The suggested size groups are: 2-5 mils, 6-10 mils, etc. The purpose of this tree count is to evaluate the propensity for the insulation to develop large numbers of small bow-tie type trees.

C. INSULATION THICKNESS AND TEST VOLTAGES

C.1. The insulation thicknesses in Table C1 are based on the rated circuit voltage, phase to phase, and on the cable insulation level.

C.2 The insulation thicknesses in Table C1 shall apply to single-conductor cables and to the individual conductors of multiple-conductor cables.

C.3 The average thickness of insulation shall not be less than in Table C1. The average thickness of insulation shall be determined by using an optical measuring device, taking four measurements 90° apart. The average thickness shall be taken as one-fourth of the sum of the four measurements.

C.4 The minimum insulation thickness at any point shall not be less than 90 percent of the values in the table.

C.5 The thickness of insulation for the various systems shall be determined as follows:

C.5.1 For three-phase systems with 100 percent insulation level (NOTE 4, Table C1), use the thickness value given in columns A or B of the table (see Note 1, Table C1).

C.5.2 For delta systems where one leg may be grounded for periods over one hour, see 173 percent level in Note 4, Table C1.

C.5.3 For single and two-phase systems with 100 percent insulation level, multiply the voltage to ground by 1.73 and use the resulting voltage value or next higher rating to select the corresponding insulation thickness from Column A or B, Table C1.

TABLE C1

INSULATION THICKNESSES, TEST VOLTAGES AND
CONDUCTOR SIZES FOR THERMOPLASTIC AND
CROSSLINKED POLYETHYLENE INSULATED POWER CABLES

Rated Voltage Phase to Phase kV	Conductor Size AWG or kcmil	Minimum Average Insulation Thickness Mils		5 Minute ac Test Voltages kV		15 Minute dc Test Voltages kV	
		A	B	A	B	A	B
		5	8 to 1000 Above 1000	2.29 90	115	2.92 18	23
8	6 to 1000 Above 1000	2.92 115	140	3.56 23	28	45	55
15	2 to 1000 Above 1000	4.45 175	220	5.59 35	44	70	80
25	1 to 2000	6.60 260	320	8.13 52	64	100	120
28	1 to 2000	7.11 280	345	8.76 56	69	105	125
35	1/0 to 2000	8.76 345	420	10.67 69	84	125	155
46	4/0 to 2000	11.30 445	580	14.73 89	116	165	215

NOTES:

1. There are two insulation thicknesses specified in some cases for thermoplastic and crosslinked polyethylene insulated cable having the same voltage rating. Columns A and B provide a choice of these thicknesses for the 100 percent insulation level. This choice will depend on the pertinent operating experience and evaluation of other factors such as conductor size, initial cost, replacement cost, impulse strength, etc. When the 133 percent insulation level is required, Column B, insulation thickness may be specified. (See Note 4.)
2.
 - a. Rated Voltage, for the purpose of these specifications, is a value selected by the purchaser as a convenient reference for defining the insulation requirements for his cable.
 - b. For cables intended for three-phase systems, the Rated Voltage is expressed in terms of phase-to-phase voltage. For cables intended for other systems, it should be expressed in suitable terms that will make clear the voltages involved.
 - c. The phase-to-phase operating voltage may exceed the Rated Voltage by 5 percent during continuous operation, or 10 percent during emergencies of not more than 15 minutes duration.

3. For other voltage ratings and conductor sizes, specific agreement between purchaser and manufacturer in the selection of insulation thickness for each application is recommended. When the user is considering conductor sizes or insulation wall thicknesses less than the values shown in the table, the effects of maximum voltage stresses should be evaluated.
4. The selection of the cable insulation level to be used in a particular installation shall be made on the basis of the applicable phase-to-phase voltage and the general system category as outlined below.
 - a. 100 Percent Level - Cables in this category may be applied where the system is provided with relay protection such that ground faults will be cleared as rapidly as possible, but in any case within one minute. While these cables are applicable to the great majority of cable installations which are on grounded systems, they may also be used on other systems for which the application of cables is acceptable provided the above clearing requirements are met in completely deenergizing the faulted section.
 - b. 133 Percent Level - This insulation level corresponds to that formerly designated for ungrounded systems. Cables in this category may be applied in situations where the clearing time requirements of the 100 percent level category cannot be met, and yet there is adequate assurance that the faulted section will be deenergized in a time not exceeding one hour. Also, they may be used when additional insulation strength over the 100 percent level category is desirable.
 - c. 173 Percent Level - Cables in this category should be applied on systems where the time required to deenergize a grounded section is indefinite. Their use is recommended also for resonant grounded systems. Consult the manufacturer for insulation thicknesses.
 - d. In common with other electrical equipment, the use of cable is not recommended on systems where the ratio of the zero to positive phase sequence reactance of the system at the point of cable application lies between -1 and -40 since excessively high voltages may be encountered in the case of ground faults.
5. To limit the maximum voltage stress on the insulation at the conductor to a safe value, the minimum size of the conductor shall be in accordance with Table C1. For cables or conditions of service where mechanical stresses govern, such as in submarine cables or long vertical risers, these minimum conductor sizes may not provide sufficient strength.

D. SEMICONDUCTING SHIELDING

D.1 The conductor shielding shall be extruded and shall consist of black, semiconducting material compatible with the insulation and the conductor and shall have allowable operating temperatures equal to or higher than those of the insulation. The outer surface of the conductor shield shall be cylindrical and shall be firmly bonded to the overlying insulation. The extruded shield shall be easily removable from the conductor and the average thickness shall be in accordance with Table D1*.

→ A semiconducting tape may be used between the conductor and the extruded semiconducting material. When the tape is used, the extruded material shall have the thicknesses given in Table D1.

TABLE D1

Conductor Size AWG or kcmil	Conductor Shield Thickness (mils)			Notes
	Minimum Point	Minimum Average	Maximum Average	
8.4 - 107.2 mm ² 8-4/0	0.30	12	15	0.33
11.7 250-500 mm ² 600-1000	0.41	16	20	0.51
12.0 250-500 mm ² 600-1000	0.51	20	25	0.54

D.2 The insulation shielding shall be extruded unless otherwise specified and shall consist of one layer of black, semiconducting thermoplastic or thermosetting material (as specified by the purchaser) applied directly over the insulation. The thermosetting material shall meet the solvent extraction requirements as described in E.2.2.

The thickness of the extruded insulation shielding shall be in accordance with Table D2. (To determine the minimum diameter over the insulation, Table O1 shall be used.)

The purchaser of cable without an outer jacket or lead sheath should consider the physical requirements of the semiconducting insulation shielding.

TABLE D2

Calculated Minimum Diameter Over Insulation Inches	For Cables With an Overall Jacket			For Cables Without an Overall Jacket		
	Insulation Shield (mils)			Insulation Shield (mils)		
	Minimum Average	Minimum Point	Maximum Point	Minimum Average	Minimum Point	Maximum Point
0-1.000	30	24	70	30	24	70
1.001-1.500	40	32	70	50	40	85
1.501-2.000	50	40	85	70	56	115
2.001-and larger	50	40	100	70	56	130

*For compact round conductors having a diameter eccentricity tolerance verified by measurement of 2 mils before covering, the average conductor shielding thickness may be 50% of Table D1 values if stated by manufacturer at time of quotation.

D.3.1 For cables rated 5 through 35 kV, when the stripping test of H.1.1 is performed on extruded insulation shielding, the tension required to remove 1/2 inch strips at room temperature shall conform to Table D3. The shielding shall be removable without damaging the insulation, leaving no conducting material which cannot be readily removed. These requirements do not apply to a paint and tape shield or when a bonded insulation shield is specified.

An insulation shield that requires heat for its removal shall not be supplied unless specifically approved by the purchaser. In this case, the maximum tension shown in Table D3 shall apply after the application of heat. The minimum value shall be 10 pounds for room temperature measurements.

D.3.2 For cables rated 5 through 35 kV, a second test per H.1.2 shall be made for cases where the maximum tensions of Table D3 are exceeded.

D.3.3 For cables rated 46 kV, the insulation shield shall be bonded mechanically, firmly and continuously to the insulation. If a firm bond cannot be obtained, then the required tension to remove a 1/2 inch wide, longitudinally cut strip of extruded insulation shielding at room temperature shall not be less than 12 pounds when tested in accordance with H.1.1 of this specification.

TABLE D3

Type of Insulation Shield	Minimum/Maximum Tension In Pounds
	5-35 kV Class Cables
Thermoplastic or crosslinked	6/24

D.4 Where the manufacturer proposes to furnish a semiconducting coating or paint as an electrostatic shield applied directly to the insulation surface and enclosed by the semiconducting tape shield, he shall so state at the time of the quotation. Since both the coating and semiconducting tape shield are electrically conductive, a warning or identification of this fact is essential. A marker tape, placed directly under the metallic shielding, shall be printed with the legend, "Remove the underlying semiconducting tape shield and coating before splicing or terminating". The semiconducting tape shall consist of nylon cloth coated, impregnated, frictioned or calendered on one face and skimmed on the other face with conducting rubber compound. The skim coat may be cured or uncured and shall contain no sulphur or other ingredients which will react with metals contacting the tape. The nominal thickness of the tape shall be not less than 10 mils. The semiconducting tape shall be helically applied to the cable with printed side up with 10 percent or more overlap on itself. The tape shall be free of significant creases or wrinkles.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D.5 The volume resistivity of extruded or taped semiconducting shields shall be measured by the two electrode method outlined in Part 6 of ICEA Standard S-66-524.

The volume resistivity in meter-ohms, when measured at the temperatures indicated, shall not exceed the following values:

On Thermoplastic Polyethylene Insulation		75°C	90°C	
Extruded conductor shield		1000	1000	
Extruded insulation shield		500	---	
Taped insulation shield		500	---	
On Crosslinked Polyethylene Insulation		90°C	110°C	130°C
Extruded conductor shield	1000	---	1000	
Extruded insulation shield	500	500	---	
Taped insulation shield	500	500	---	

E. PRODUCTION SAMPLING TESTS

E.1 Heat Distortion Requirement for XLP Insulation

	Filled	Unfilled
250 kcmil and smaller (Insulation tested on conductor) Maximum percent distortion	20	25
Larger than 250 kcmil (Buffed samples of insulation taken in close proximity to the conductor) Maximum percent distortion	10	15

E.2.1 Solvent Extraction Requirements for XLP Insulation

A test shall be made on a sample of insulation taken from the inner 25 percent of the insulation wall in accordance with ASTM D 2765 Method A, using a Wiley cutting mill or equivalent.

	Filled	Unfilled
Extractables after 20 hours drying time- Maximum percent	30	30

E.2.2 Solvent Extraction Test for Extruded XLP Semiconducting Conductor Shield & Insulation Shield - A representative cross section containing the extruded conductor shielding and insulation shield if crosslinked shall be cut from the cable. The resulting wafer shall be at least 25 mils thick. Any outer covering and the conductor shall be removed. The resulting wafer shall then be placed in a

liter of boiling, fresh decahydronaphthalene with one percent by weight antioxidant 2246 for five hours using the equipment specified in ASTM D 2765. The wafer shall then be removed from the solvent and examined with a minimum 15-power magnification.

The extruded semiconducting shields shall be continuous for the total 360°. Partial loss of the extruded semiconducting material at the exposed surface is permitted provided there is semiconducting material at the insulation surface for a total of 360°. Total or partial separation of the semiconducting shield from the insulation is permissible.

Examination indicating any lack of continuous and complete shielding shall be cause for rejection.

E.3 Structural Stability Test

A structural stability test as described in this section shall be made on samples of cable with rated voltages of 15 kV and higher. This test is to be performed with the cable in a plastic pipe except when oven heating is used. The pipe ends shall be suitably closed.

The sample selected for this test shall not be less than 30 feet long. The sample shall be conditioned, with no test voltage applied, either by circulating current in the conductor or by oven heating at the following conductor temperatures in the sequence indicated:

1. Room temperature.
2. Not less than six hours at 75°C for thermoplastic polyethylene and 90°C for crosslinked polyethylene.
3. Not less than six hours at 90°C for thermoplastic polyethylene and 130°C for crosslinked polyethylene.
4. Room temperature.

The partial discharge in picocoulombs shall be measured at room temperature at the first and fourth steps; at 75 or 90°C whichever is applicable, at the end of the second step; and at 90 or 130°C whichever is applicable, at the end of the third step. Use test voltages as specified in Table F1. The measured values of all steps shall not exceed the values given in the above table for the rated voltage and insulation thickness of the cable. The method of heating shall be recorded and reported.

A dissipation factor test shall be made on the above sample. The dissipation factor shall be measured at rated voltage to ground at each temperature step. Unless there is specific agreement by purchaser and manufacturer on other values, the dissipation factor shall not exceed 0.1 percent for thermoplastic polyethylene and crosslinked polyethylene without fillers or additives (other than those normally used in processing). If fillers and/or additives are used, the dissipation factor shall not exceed 0.5 percent.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E.4 Dimensional Stability

Tests shall be made to determine the dimensional stability of the cable system.

The axial protrusion of the inner conductor from the dielectric core shall be determined in accordance with the following:

1. A one-foot sample shall be taken at least one foot away from the end of the reel length. A square cut shall be made through the ends of this sample when at room temperature.
2. All outer materials shall be removed, including jacket, metallic shielding, nonmetallic shielding tapes and bedding tapes.
3. The sample shall be placed at once in an oven for 20 hours at 70°C if thermoplastic polyethylene and at 121°C if crosslinked polyethylene.
4. After removal of the sample from the oven, the conductor protrusion at each end shall be measured at room temperature and recorded.

A 5 to 35 kV sample on which the conductor protrusion exceeds 125 mils for stranded and 160 mils for solid conductors at either end shall be considered to have failed to meet the requirements of this test. (For resampling procedure, refer to J.4.) The conductor protrusion for 46 kV cable shall not exceed 175 mils at either end.

E.5 Void and Contaminant Determination, and Conductor Shield Projection Test

E.5.1 Samples shall be prepared as follows: Two inches of the sample shall be cut helically or in some other convenient manner to produce thin samples of the insulation and conductor shield. Wafers (or the turns of the helix) shall be approximately 25 mils thick (producing approximately 80 wafers). The cutting blade shall be sharp and shall produce a sample with uniform thickness and with very smooth cut surfaces. The sample shall be kept clean and shall be handled carefully to prevent scratching the cut surfaces.

E.5.2 The entire specimen shall be viewed by transmitted light for general determination of freedom from voids, contaminants, and translucent materials in the insulation and between the insulation and conductor shield*.

1. A contaminant is any solid or liquid material which is opaque or not homogeneous thermoplastic or crosslinked polyethylene insulation, including discolored, translucent material of more than 50 mils in its radial vector projection.
2. The entire area of 20 consecutive wafers (or equivalent turns of the helical sample) shall be examined with a minimum of 15-power magnification, including any areas which appear suspect during the above examination by transmitted light.

*For mineral-filled crosslinked polyethylene insulated cables, and conductor shields, the reflected light method shall be used.

- *-3. A tabulation of numbers and sizes shall be made with a minimum of 15-power magnification of:
- a. All voids, 2 mils in greatest dimension and larger, in cross-linked polyethylene; and
 - b. all contaminants, 2 mils in greatest dimension and larger in thermoplastic and crosslinked polyethylene; and
 - c. discolored, translucent material of more than 2 mils in its radial vector projection.

This tabulation shall be recorded and reported.

4. The largest void, the largest contaminant and the largest translucent material shall be marked by encircling and must be subsequently measured on a micrometer microscope.
5. The number of voids, contaminants and transluents per cubic inch of insulation shall be calculated from the tabulation. (The volume of the 20 wafers, or equivalent turns, may be determined by any convenient method.) If the 20 wafers constitute less than one cubic inch and if the void or contaminant count exceeds the allowable number, then a sufficient number of wafers from the same sample shall be examined to total one cubic inch of insulation.

E.5.3 The largest void, contaminant and translucent material marked on the sample shall be measured with a micrometer microscope using a minimum of 40-power magnification. The largest dimension shall be measured only. If voids, contaminants or transluents exceed the limits listed in A.3, the sample shall be considered to have failed to meet the test requirements. (For resampling procedure refer to J.4.)

E.5.4 The contact area between the insulation and the shield extrusions (both the conductor shield and the insulation shield) on the 20 wafers or equivalent turns shall also be examined, using a minimum of 15-power magnification. The sample shall be considered to have failed to meet the test requirements if the contact surface between these extrusions and the insulation has protrusions or irregularities which exceed the limits specified in A.4.3. (For resampling procedure refer to J.4)

F. TESTS ON COMPLETED CABLE

F.1 Electrical Requirements on Factory or Shipping Reel Lengths of Completed Cable.

Each insulated conductor in the completed cable shall be tested in accordance with Part 6 of ICEA Standard S-61-402 for thermoplastic cables and S-66-524 for the thermosetting cables at the voltages given in Table C1. Multiplexed cable shall be tested after multiplexing.

F.2 Partial Discharge Test Requirements

Each reel of completed shielded power cable shall comply with the maximum partial discharge in picocoulombs specified in Table F1. Multiplexed cable shall be tested after multiplexing.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In case of failure on a factory reel length of cable, the cable may be cut into shipping lengths and retested. (For resampling procedure refer to J.4.)

The maximum partial discharge in picocoulombs shall not exceed the values given by the equation shown below when the quantity in parenthesis is not less than zero.

F.1 $pC = 5 + (V_t/V_g - 2.0) 22.5$ (See A.6 for symbols)

TABLE F1

V_t/V_g ratio	1.0	1.5**	2.0**	3.0**	4.0
pC - All Voltages	5	5	5	27.5	50
<u>Cable Voltage Rating in kV</u>	<u>Test Voltages (V_t) in kV Corresponding to V_t/V_g Ratio</u>				
5	3.0	4.5	6.0	9.0	11.5
8	4.5	7.0	9.0	14.0	18.5
15	8.5	13.0	17.5	26.0	35.0
25	14.5	22.0	29.0	43.5	57.5*
28	16.0	24.0	32.5	48.5	65.0*
35	20.0	30.5	40.5	60.5	81.0*
46	26.5	40.0	53.0	80.0	106.0*

*The ac test voltages in Table C1 for the specified walls shall not be exceeded.

**Dissipation factor readings shall be made at these voltage levels when required by other sections of this specification.

G. PARTIAL DISCHARGE TEST

G.1 Scope

A partial discharge test shall be carried out:

1. On single-conductor cables which are shielded, and
2. On individually shielded conductors in multiconductor cable and multi-plexed assemblies.

G.2 Definitions

G.2.1 The Apparent Discharge Characteristic (ADC) is defined as the apparent charge-transfer (corona or partial discharge) magnitude versus applied voltage as the voltage is lowered.

G.2.2 The partial discharge (or corona) extinction voltage shall be defined as the voltage at which the apparent charge-transfer falls to a partial discharge of 5 pC, when measured in the manner described herein, as the applied voltage is decreased from a value exceeding the inception voltage.

G.3. Test Apparatus

The test apparatus and calibration procedure described in ICEA Publication T-24-380 shall be used for performing the partial discharge test except that the calibration may be made at either end for lengths of cable of less than 100 feet.

G.4 Test Procedure

G.4.1 An alternating current test voltage having a frequency within the range 49-61 Hz shall be applied between the conductor and the metallic component of the insulation shield of the individual conductors under test. The rate of change of the applied voltage shall not exceed 2000 volts/second as the voltage is decreased.

The test voltage shall not be maintained for more than three minutes during any single test.

The applied test voltage shall be raised to the appropriate maximum voltage level given in Table F1 and then lowered in order to derive the ADC.

If the apparent charge-transfer exceeds a partial discharge value of 5 pC at the maximum test voltage, the extinction voltage shall be noted as the applied voltage is being lowered.

Both the ADC and the partial discharge extinction voltage may be determined alternatively from the CRT display, a charge-transfer-meter indication or an X-Y recording. However, it is desirable that the ADC, in particular, be derived from an X-Y recording. The partial discharge values at each voltage of Table F1 shall be recorded and reported.

G.4.2 The cable shall not be subjected to any ac test (except for an in-process test not exceeding five seconds) for seven days for 5 to 35 kV and 10 days for 46 kV cables prior to performance of the ADC test. The ADC test for crosslinked polyethylene shall not be performed earlier than seven days for 5 to 35 kV and 10 days for 46 kV cables after the insulating process.

G.4.3 Cables shall be tested dry with the shield or sheath grounded on both ends and used as the ground electrode. (If the grounding on both ends introduces excessive interference, then one end only may be used as the ground electrode. This end shall be so selected to display the maximum detector response.) The test potential shall be a nominal 60 Hz alternating current voltage.

G.4.4 The cable under test shall be so terminated that there will be no detectable corona discharge on the ends of the cable over the range of corona test voltages required for that cable.

H. EXTRUDED INSULATION SHIELDING TEST

H.1 Stripping Test for Extruded Insulation Shielding

H.1.1 Normal Test. A cable sample approximately 15 inches long shall be used. The semiconducting material shall be cut longitudinally and vertically down to the insulation. A second cut shall be performed in the same way at 1/2 inch separation from the first cut. For attachment of the measuring device, approximately two inches of the 1/2 inch strip of each end of the cable shall be removed by pulling it at a 90° angle away from the cable. The required pulling tension in pounds shall be measured by increasing the force on the strip until the strip separates from the insulation at a speed of approximately 1/2 inch per second. The strip test shall be made at room temperature, one at each end of the cable in opposite directions and 180° apart. Each test shall be terminated at the center of the cable sample. The minimum and maximum pulling tensions shall be recorded as measured at the specified pulling speed. The shielding shall be removable without damaging the insulation, leaving no conducting material which cannot be readily removed.

H.1.2 Test for use when maximum tension of Table D3 is exceeded. A test shall be performed on a sample as described in H.1.1. The semiconducting material shall be cut longitudinally using a scoring tool having a depth of blade one mil less than the specified minimum point thickness of the semiconducting layer of the cable being tested. A second parallel cut shall be performed at least 1/4 inch from the first cut. The strip test shall be made at room temperature, one at each end of the cable in opposite directions and 180° apart. The shielding shall be removable for 12 inches of length without tearing in two or leaving conducting material on the insulation which cannot readily be removed. Pulling force is not applicable in this test. Where material requiring heat is requested (see D.3.1), heat treatment prior to the test is permissible.

I. CABLE IDENTIFICATION

I.1 The outer surface of each cable shall be durably marked throughout its length with the manufacturer's identification, type of insulation (i.e., XLP or XLPE, not manufacturer's trade name), size of conductor, whether aluminum or copper, rated voltage, year of manufacture, and insulation thickness. A manufacturer's trade name may be added to the above required information.

Polymeric insulation shielding and semiconducting jackets shall be conspicuously identified as semiconducting.

The preceding identification shall be repeated along the cable at regular intervals with unmarked surfaces not exceeding six inches.

If the cable has a lead sheath, the identification shall be provided on a tape under the lead sheath.

I.2 Marking on the semiconducting shielding shall be by surface printing only. Durable marking on an outer jacket may be accomplished by indenting (but not to a depth greater than 15 percent of its thickness) or by purchaser approved surface printing.

I.3 For all cables, the manufacturer shall maintain records which will permit the identification of stock reel lengths and shipping reel lengths which were insulated adjacent to any particular stock or shipping reel length. The records shall be maintained for a period of not less than one year from shipping date, unless a longer period is requested by the purchaser at the time of inquiry.

I.4. When center strand identification is requested by a purchaser, the center strand of each conductor shall be indented with the manufacturer's name and year of manufacture at regular intervals with unindented surfaces not exceeding .12 inches.

J. CONDITIONS APPLYING TO TESTS

J.1 General

J.1.1 A "lot" is defined as the quantity of cable requiring one sample.

J.1.2 The lot shall not be shipped (except when agreed to by purchaser) unless all required tests have been completed and results of tests show compliance with all requirements of this and all reference specifications.

J.1.3 For multiple conductor cable assemblies, the number of tests shall be based upon the total single insulated conductor lengths.

J.1.4 All factory tests prescribed by the specifications shall be made at the expense of the manufacturer. All samples shall be furnished by the manufacturer.

J.1.5 The purchaser may elect to witness tests and to make inspection of the cable during the process of manufacture, except for those processes of a confidential nature.

J.1.6 Where tests are required for engineering information, the results of these tests shall not be cause for rejection.

J.2 Certified Copies of Tests

J.2.1 If requested by the purchaser at the time of inquiry, the manufacturer shall furnish the purchaser with certified copies of the results of all tests required by this and all reference specifications.

J.2.2 If requested by the purchaser at the time of inquiry, the manufacturer shall furnish certified copies of actual production test values.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J.2.3 If requested by the purchaser at the time of inquiry, the manufacturer shall furnish certified copies of actual test values from those tests required for engineering information.

J.2.4 If requested by the purchaser at the time of inquiry, the manufacturer shall furnish the purchaser with a certified copy of the qualification test that represents the cable being purchased.

J.3 Frequency of Sample Tests

The frequency of tests on samples shall be as set forth in this section, except if otherwise specifically agreed between the purchaser and the manufacturer at the time of placing the order. If the purchaser requires more frequent tests, he shall so state in his inquiry and the manufacturer shall state in his proposal the charges for such additional tests.

J.3.1 The structural stability sample test (E.3) shall be made by the manufacturer on samples selected by him at the rates shown in Table J1.

TABLE J1
SAMPLING FREQUENCY

Number of Tests	Thousands of Feet of Cable	
	Column X	Column Y
0	0-50	0- 50
1	50-150	50- 350
2	150-250	350- 650
3	250-350	650- 950
4	350-450	950-1250
	etc.	etc.

Col. X is for cable with conductors larger than 500 kcmil and for all cables rated 28 kV or over.

Col. Y is for all other cables.

J.3.2 The stripping (H.1) and volume resistivity tests on semiconducting shielding (D.5) shall be made at the rate of one test for each 25,000 feet of cable or major fraction thereof or at least once per insulation shield extruder run.

J.3.3 For the dimensional stability test (E.4) and the solvent extraction test (E.2.1 and E.2.2), three samples shall be tested per insulation extruder run. The samples shall be taken from the beginning, near the middle and the end of each extruder run.

J.3.4 For the void and contaminant determination test (E.5), a two-foot long sample shall be taken from each end of manufacturer's stock length. One sample from the outer end of each reel is sufficient if a number of reels of identical cable are being run, provided that at least one sample is taken for each 10,000 feet.

J.3.5 Unless otherwise specified, the frequency of making tests and taking samples shall be in accordance with the applicable ICEA-NEMA Standards.

In the case of all sample tests, a manufacturer may choose to perform tests on the entire lot of any single production run of one size, voltage rating and design of a completed cable. When this is done and the number of samples, specimens and tests for the entire lot are made as prescribed, tests on individual orders taken from the run need not be made. However, the manufacturer shall provide a certified copy of the applicable test report to the purchaser.

J.4 Resampling Procedure

The procedure as outlined in Part 6 of ICEA S-66-524, shall be followed except for those tests listed under J.4.1.

- J.4.1 Void, Contaminant and Conductor Shield Protrusions (A.4.3)
- Dimensional Stability (E.4)
- Shield Stripping (H)
- Shield Volume Resistivity (D.5)
- Solvent Extraction for Conductor and Insulation Shield (E.2.2)
- Solvent Extraction for Insulation (E.2.1)
- Cable Tests on Completed Cable (F)

In case of failure of the original sample(s), one sample from each end of cable of every shipping reel in this lot shall be tested. In case of failure of one or both of the resamples, the cable on the shipping reel from which the sample(s) was taken shall be rejected.

K. TESTS DURING AND AFTER INSTALLATION

K.1 At any time during installation, a dc proof test may be made at a voltage not exceeding 75 percent of the dc test voltage specified in Table C1 applied for five consecutive minutes.

K.2 After installation and before the cable is placed in regular service, a high voltage dc test may be made at 80 percent of the dc test voltage specified in Table C1 applied for fifteen consecutive minutes.

K.3 After the cable has been completely installed and placed in service, a dc proof test may be made at any time during the period of the guarantee at 65 percent of the dc test voltage specified in Table C1 applied for five consecutive minutes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L. SHIPMENT AND REELS

L.1 Packing, Sealing and Shipping

L.1.1 The cable shall be placed on the reels so that it will be protected from damage during shipment. Each end of the cable shall be firmly and properly secured to the reel. Care shall be taken to prevent looseness of reeled cable.

L.1.2 There shall be no water and no corrosion in the completed cable when the reel is shipped. If the conductor shows evidence of slight corrosion and no pitting, then the manufacturer shall verify that the cable was dried prior to shipping. Each end of each length of cable shall be durably sealed before shipment to prevent entrance of moisture.

L.1.3 Each length of cable listed on the purchaser's order or detail list shall be shipped on a separate reel, except where the purchaser specifies multiple or parallel cable assemblies.

L.1.4 The reels shall be lagged or covered with suitable material to provide physical protection for the cables during transit and during ordinary storage and handling operations.

L.2 Reels

L.2.1 The minimum diameter of the drum of the shipping reel shall be not less than prescribed in ICEA Standard A-9-428.

L.2.2 The inner or drum end of the cable, when allowed to project through the flange of the reel, shall be protected to avoid damage to the cable or seal.

L.3 Marking on Reels

Each reel shall be marked as follows:

L.3.1 With a durable label securely attached to a flange of the reel and plainly stating the destination, the purchaser's order number, shipping length of cable on reel, number, type and size of conductors, cable configuration, thickness and type of insulation, voltage rating, and shall show identification in accordance with paragraph I.1.

L.3.1.1 The recorded shipping length of multiple cable assemblies shall be the measured length after assembly.

L.3.2 With a durable number on a flange of the reel, either branded on the reel or stamped on metal tags permanently attached to the reel.

L.3.3 Shipping reels shall be free of any information not pertaining to the order.

M. GUARANTEE

M.1 The manufacturer shall guarantee that the cable furnished under these specifications is of first class material and workmanship throughout, that it has been tested in accordance with these specifications, and that the results of the tests comply with the requirements of these specifications, and, in lieu of other claims against it, agrees to replace (i.e., supply new cable):

1. any length of cable found defective in material or workmanship during the installation of the cable, or
2. any length of cable failing during normal and proper use within one year of date of placing in service which shows defects of material or workmanship, provided in each case that immediate written notice of such failure is given to the manufacturer and he is given all reasonable opportunity to inspect such failure.

M.2 Failure to pass any of the electrical tests specified herein by any specimen removed from cable which has previously failed in service shall not be considered prima facie evidence of defects in material or workmanship.

M.3 The date of placing in service is to be interpreted as the date on which operating voltage was first applied, but in no case shall it be interpreted to be later than the six months after the shipment of the cable from the factory.

M.4 Where two or more lengths of single conductor cable are operated as the equivalent of one multiple conductor cable, any length of cable damaged as a result of the failure within the guarantee period of one of the other lengths in the same circuit, for a cause for which the manufacturer is responsible, or through the withdrawal and replacement of such length, shall be replaced by the manufacturer.

M.5 All replacements by the manufacturer under the provisions of this section shall be made free of charge, f.o.b. the original delivery point.

M.6 Except as otherwise agreed, defective lengths of cable which have been replaced under the provisions of this section shall become the property of the manufacturer.

N. INFORMATION TO BE SUPPLIED BY PURCHASER

N.1 When requesting proposals from cable manufacturers, the inquiry should include the following information as a minimum:

1. Number of feet of cable and maximum shipping length.
2. Rated voltage of cable and nominal system phase to phase voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Description of cable, including conductor size and material, type of insulation, shielding system and special features; such as, paralleling, multiplexing, etc.
4. Operating frequency, if other than 60 Hz.

N.2 If the purchaser desires assistance in the design of the shielding system, he shall furnish the design value of phase to ground fault current in symmetrical amperes, the duration in cycles and reclosing practices.

O. PROCEDURE FOR DETERMINING DIAMETERS OF CABLE 5 THROUGH 35 kV*

O.1 Cable conforming to this specification shall have the following maximum permissible tolerances on the nominal diameters:

Over insulation	+ 30 mils
Over extruded insulation shielding	+ 50 mils

O.2 Diameters shall be computed by the following method:

1. To determine the diameter over the insulation, use the formula shown in Table 01.

TABLE 01

<u>Conductor Size</u> <u>AWG or kcmil*</u>	<u>Diameters Over Insulation (mils)</u>		
	<u>Minimum</u>	<u>Nominal</u>	<u>Maximum</u>
8-4/0	C+30+A+2T	Add 30	Add 60
250-500	C+40+A+2T	Add 30	Add 60
600-1000	C+50+A+2T	Add 30	Add 60

Where:

C = conductor diameter from applicable ICEA-NEMA Standards

Second Term = twice the extruded conductor shield thickness

A = value from Table 02

T = minimum average insulation thickness from Table C1

All dimensions are in mils.

*Diameters for 46 kV rated cables will be added when sufficient experience has been obtained.

If stated by the manufacturer at time of quotation that a conductive tape and a subsequent extruded shield is to be applied over the conductor, the minimum diameter over the insulation shall be calculated by the formula:

$$D_{min} = C + 80 + 2T$$

TABLE 02

<u>Conductor Size</u>	<u>Voltage Rating*</u>	<u>A (mils)</u>
All sizes	5-15 kV	0
1 through 4/0	25-28 kV	0
Above 4/0	25-28 kV	10
1/0 through 4/0	35 kV	0
Above 4/0	35 kV	15

2. To determine the nominal diameter over the insulation shield for a cable, add the appropriate nominal value shown in Table 03 to the nominal diameter over the insulation as calculated from Table 01.

TABLE 03

<u>Calculated Minimum Diameter Over Insulation (Inches)</u>	<u>Extruded Insulation Shield Adders (mils)</u>					
	<u>For Cables with An Overall Jacket</u>			<u>For Cables Without An Overall Jacket</u>		
	<u>Minimum</u>	<u>Nominal</u>	<u>Maximum</u>	<u>Minimum</u>	<u>Nominal</u>	<u>Maximum</u>
0-1.000	30	80	130	30	80	130
1.001-1.500	50	100	150	70	120	170
1.501-2.000	70	120	170	110	160	210
2.001-	70	120	170	110	160	210

*Consult manufacturer for larger conductors and higher voltage rated cables.

Example:

1/0 concentric (Class B) stranded conductor with extruded strand and insulation shields (a 15 kV cable) having a 220 mil wall having no overall jacket.

	C = 373 mils
2 x 15 =	30 mils for extruded strand shield from Table 01
A =	0 from Table 02
2T =	440 mils insulation (2 x 220) from Table 01
	<u>843</u>
rounds to	845 mils for minimum diameter over insulation
plus	30 mils from Table 01
	<u>875</u> mils for nominal diameter over insulation
plus another	30 mils from Table 01
	<u>905</u> mils for maximum diameter over insulation

To calculate the diameter over the extruded insulation shield:

875 mils nominal diameter over insulation
<u>30</u> minimum value from Table 03
905 mils minimum diameter over insulation shield

875 mils for nominal diameter over insulation
<u>80</u> nominal value from Table 03
955 mils nominal diameter over insulation shield

875 mils nominal diameter over insulation
<u>130</u> maximum value from Table 03
1005 mils maximum diameter over insulation shield

Tables 04, 05 and 06 give calculated values for cables without an outer jacket. The required diameters for other constructions are to be calculated using Tables 01, 02, and 03.

After fabrication, the two diameters, one over the insulation and the other over the insulation shield, shall be measured at both ends of each shipping length of completed cable using a diameter rule or the average of two values measured at 90°. If either diameter at either end of a shipping length is outside of the permissible tolerance range, the entire shipping length of completed cable shall be rejected.

CALCULATED DIMENSIONS
FOR CABLES WITHOUT AN OVERALL JACKET
TABLE 04 - CONCENTRIC STRANDING*

Aluminum & Copper Conductor Sizes; AWG or kcmil & Nominal O.D.; inches		15-kV Cable(175 Mils)		15-kV Cable(220 Mils)		25-kV Cable(260 Mils)		35-kV Cable(345 Mils)	
		Diameter-Mils		Diameter-Mils		Diameter-Mils		Diameter-Mils	
		Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding
2S*	0.258	670 + 30	750 + 50	760 + 30	840 + 50	--	--	--	--
2	0.292	700 + 30	780 + 50	790 + 30	870 + 50	--	--	--	--
1S*	0.289	700 + 30	780 + 50	790 + 30	870 + 50	870 + 30	950 + 50	--	--
1	0.332	740 + 30	820 + 50	830 + 30	910 + 50	910 + 30	990 + 50	--	--
1/0S*	0.325	735 + 30	815 + 50	825 + 50	905 + 50	905 + 50	985 + 50	1075 + 30	1195 + 50
1/0	0.373	785 + 30	865 + 50	875 + 30	955 + 50	955 + 30	1035 + 50	1125 + 30	1245 + 50
2/0	0.418	830 + 30	910 + 50	920 + 30	1000 + 50	1000 + 30	1080 + 50	1170 + 30	1290 + 50
3/0	0.470	880 + 30	960 + 50	970 + 30	1050 + 50	1050 + 30	1170 + 50	1220 + 30	1340 + 50
4/0	0.528	940 + 30	1020 + 50	1030 + 30	1110 + 50	1110 + 30	1230 + 50	1280 + 30	1400 + 50
250	0.575	995 + 30	1075 + 50	1085 + 30	1205 + 50	1175 + 30	1295 + 50	1350 + 30	1470 + 50
350	0.681	1100 + 30	1220 + 50	1190 + 30	1310 + 50	1280 + 30	1400 + 50	1455 + 30	1575 + 50
500	0.813	1235 + 30	1355 + 50	1325 + 30	1445 + 50	1415 + 30	1535 + 50	1590 + 30	1750 + 50
600	0.893	1325 + 30	1445 + 50	1415 + 30	1535 + 50	1505 + 30	1625 + 50	1680 + 30	1840 + 50
700	0.964	1395 + 30	1515 + 50	1485 + 30	1605 + 50	1575 + 30	1735 + 50	1750 + 30	1910 + 50
750	0.998	1430 + 30	1550 + 50	1520 + 30	1640 + 50	1610 + 30	1770 + 50	1785 + 30	1945 + 50
800	1.031	1460 + 30	1580 + 50	1550 + 30	1710 + 50	1640 + 30	1800 + 50	1815 + 30	1975 + 50
900	1.094	1525 + 30	1645 + 50	1615 + 30	1775 + 50	1705 + 30	1865 + 50	1880 + 30	2040 + 50
1000	1.152	1580 + 30	1740 + 50	1670 + 30	1830 + 50	1760 + 30	1920 + 50	1935 + 30	2095 + 50

* Solid

CALCULATED DIMENSIONS
FOR CABLES WITHOUT AN OVERALL JACKET
TABLE 05 - COMPRESSED STRANDING*

Aluminum & Copper Conductor Sizes; AWG or kcmil & Nominal O.D.; inches		15-kV Cable(175 Mils)		15-kV Cable(220 Mils)		25-kV Cable(260 Mils)		35-kV Cable(345 Mils)	
		Diameter-Mils		Diameter-Mils		Diameter-Mils		Diameter-Mils	
		Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding
2	0.283	695 + 30	775 + 50	785 + 30	865 + 50	--	--	--	--
1	0.322	730 + 30	810 + 50	820 + 30	900 + 50	900 + 30	980 + 50	--	--
1/0	0.362	770 + 30	850 + 50	860 + 30	940 + 50	940 + 30	1020 + 50	1110 + 30	1230 + 50
2/0	0.405	815 + 30	895 + 50	905 + 30	985 + 50	985 + 30	1065 + 50	1155 + 30	1275 + 50
3/0	0.456	865 + 30	945 + 50	955 + 30	1035 + 50	1035 + 30	1155 + 50	1205 + 30	1325 + 50
4/0	0.512	920 + 30	1000 + 50	1010 + 30	1090 + 50	1090 + 30	1210 + 50	1260 + 30	1380 + 50
250	0.558	980 + 30	1060 + 50	1070 + 30	1190 + 50	1160 + 30	1280 + 50	1335 + 30	1455 + 50
350	0.660	1080 + 30	1200 + 50	1170 + 30	1290 + 50	1260 + 30	1380 + 50	1435 + 30	1555 + 50
500	0.789	1210 + 30	1330 + 50	1300 + 30	1420 + 50	1390 + 30	1510 + 50	1565 + 30	1725 + 50
600	0.866	1295 + 30	1415 + 50	1385 + 30	1505 + 50	1475 + 30	1595 + 50	1650 + 30	1810 + 50
700	0.935	1365 + 30	1485 + 50	1455 + 30	1575 + 50	1545 + 30	1705 + 50	1720 + 30	1880 + 50
750	0.968	1400 + 30	1520 + 50	1490 + 30	1610 + 50	1580 + 30	1740 + 50	1755 + 30	1915 + 50
800	1.000	1430 + 30	1550 + 50	1520 + 30	1640 + 50	1610 + 30	1770 + 50	1785 + 30	1945 + 50
900	1.061	1490 + 30	1610 + 50	1580 + 30	1740 + 50	1670 + 30	1830 + 50	1845 + 30	2005 + 50
1000	1.117	1545 + 30	1705 + 50	1635 + 30	1795 + 50	1725 + 30	1885 + 50	1900 + 30	2060 + 50

* Compressed-Conductor Diameters = 97% of Concentric-Conductor Diameters as a minimum.

FOR CABLES WITHOUT AN OVERALL JACKET
TABLE 06 - COMPACT STRANDING

Aluminum & Copper Conductor Sizes; AWG or kcmil & Nominal O.D.; inches		15-kV Cable(175 Mils)		15-kV Cable(220 Mils)		25-kV Cable(260 Mils)		35-kV Cable(345 Mils)	
		Diameter-Mils		Diameter-Mils		Diameter-Mils		Diameter-Mils	
		Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding	Over Insulation	Over Shielding
2	0.268	680 + 30	760 + 50	770 + 30	850 + 50	--	--	--	--
1	0.299	710 + 30	790 + 50	800 + 30	880 + 50	880 + 30	960 + 50	--	--
1/0	0.336	745 + 30	825 + 50	835 + 30	915 + 50	915 + 30	995 + 50	1085 + 30	1205 + 50
2/0	0.376	785 + 30	865 + 50	875 + 30	955 + 50	955 + 30	1035 + 50	1125 + 30	1245 + 50
3/0	0.423	835 + 30	915 + 50	925 + 30	1005 + 50	1005 + 30	1085 + 50	1175 + 30	1295 + 50
4/0	0.475	885 + 30	965 + 50	975 + 30	1055 + 50	1055 + 30	1175 + 50	1225 + 30	1345 + 50
250	0.520	940 - 30	1020 + 50	1030 + 30	1110 + 50	1120 + 30	1240 + 50	1295 + 30	1415 + 50
350	0.616	1035 - 30	1155 + 50	1125 + 30	1245 + 50	1215 + 30	1335 + 50	1390 + 30	1510 + 50
500	0.736	1155 - 30	1275 + 50	1245 + 30	1365 + 50	1335 + 30	1455 + 50	1510 + 30	1630 + 50
600	0.813	1245 + 30	1365 + 50	1335 + 30	1455 + 50	1425 + 30	1545 + 50	1600 + 30	1760 + 50
700	0.877	1305 + 30	1425 + 50	1395 + 30	1515 + 50	1485 + 30	1605 + 50	1660 + 30	1820 + 50
750	0.908	1340 + 30	1460 + 50	1430 + 30	1550 + 50	1520 + 30	1640 - 50	1695 + 30	1855 + 50
800	0.938	1370 + 30	1490 + 50	1460 + 30	1580 + 50	1550 + 30	1710 + 50	1725 + 30	1885 + 50
900	0.999	1430 + 30	1550 + 50	1520 + 30	1640 + 50	1610 + 30	1770 + 50	1785 + 30	1945 + 50
1000	1.060	1490 + 30	1610 + 50	1580 + 30	1740 + 50	1670 + 30	1830 + 50	1845 + 30	2005 + 50

P. REFERENCED INDUSTRY STANDARDS

ASTM D 2765-68 (1978) Tests for Degree of Crosslinking in Crosslinked Ethylene Plastics as Determined by Solvent Extraction.

ICEA S-61-402 (3rd Edition - 1973) Thermoplastic-Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy.

ICEA S-66-524 (Revision No. 9 - April 1980) Cross-Linked-Thermosetting-Polyethylene-Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electric Energy.

ICEA Publication T-24-380 (1980) guide for Partial-Discharge Test Procedure.

ICEA Publication T-25-425 (1981) Guide for Establishing Stability of Volume Resistivity for Conducting Polymeric Components of Power Cables.

ICEA Publication P-45-482 (2nd Edition - 1979) Short Circuit Performance of Metallic Shielding and Sheaths of Insulated Cable.

ICEA Publication A-9-428 (1975) Standards Publication for Drum Diameters of Reels for Wires and Cables.

IEEE Standard No.82 Test Procedure for Impulse Voltage Tests on Insulated Conductors.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ อาจารย์ จงรักษ์ บุญเสียง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำปริญญาโทฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือแก่ในการทำปริญญาโทฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ คุณจิตเกษม เจตนาเจริญชัย แห่งบริษัทเฟลคอคจประเทศไทย ที่กรุณาเอื้อเพื่อเอกสาร และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำปริญญาโทฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท เฟลคอคจประเทศไทย และพนักงานทุกท่านที่อนุเคราะห์สถานที่, อุปกรณ์, ตัวอย่างสายไฟ และให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลองในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บริษัท สายไฟฟ้า-ไทยยาซากิ จำกัด ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างสาย และเอกสาร ที่เป็นประโยชน์ในการทำปริญญาโทฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

1. BRUCE S. Bernstein and John Mark, Electric Power Research Insitute, "WATER TREEING WORKSHOP" IEEE Electrical Insulation Magazine, May 1987, Vol. 3, No.3
2. J.C. Filippini and C.T. Meyer "Water Treeeing Test Using the Water needle Method, The Influence of the Magnitude of the Electric Field at the needle tip" IEEE transaction on Electrical insulation, Vol.23, No.2, April 1988
3. บริษัท ยาสากิ จำกัด, "PRESENT CABLE AND THEIR IMPROVEMENT, EXTRUDED POWER CABLE"
4. เอกสารจาก บริษัท เฟลตอดจ้ ประเทศไทย

