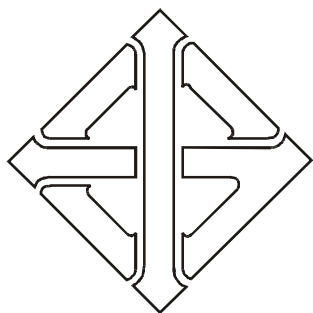




มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

THAI INDUSTRIAL STANDARD

มอก. 2052 – 2548

เคเบิลใยนำแสง

เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร

OPTICAL FIBER CABLES –

PART 3 : SECTIONAL SPECIFICATION – OUTDOOR CABLES

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม

ICS 33.180.10

ISBN 974-9904-65-6

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เคเบิลใยนำแสง

เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร

มอก. 2052 – 2548

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400

โทรศัพท์ 0 2202 3300

ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 122 ตอนที่ 125ง

วันที่ 29 ธันวาคม พุทธศักราช 2548

คณะกรรมการวิชาการคณะที่ 892

มาตรฐานเคเบิลใยแก้วนำแสง

ประธานกรรมการ

รศ.ดร.อธิคม ฤกษ์บุตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

กรรมการ

นายปราโมทย์ ศรีสุขสันต์

ผศ.อภิรักษ์ มัณยทานนท์

นายวันชัย เจียรวัฒนวิทย์

นางสาวธันวดี วงศ์ธีรฤทธิ

นายบุญเลิศ กิ่งเพชรรุ่งเรือง

นายอาคม แรกตั้ง

นายสุรชัย ฟางสะอาด

นายสมบูรณ์ หอตระกุล

นายสันติ พูลเสมอ

นายสมบัติ ศิริประยุक्त

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การไฟฟ้านครหลวง

บริษัท กสท. โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน)

บริษัท ทศท. คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

บริษัท ฮิตาชิบางกอกเคเบิล จำกัด

บริษัท ทู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

บริษัท สยามไฟเบอร์ออปติกส์ จำกัด

บริษัท ไทยไฟเบอร์ออปติกส์ จำกัด

กรรมการและเลขานุการ

นายทิวากรณ์ จิตชนะวงศ์

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร นี้ ได้ประกาศใช้ครั้งแรกเป็นมาตรฐานเลขที่ มอก. 2052-2543 ในราชกิจจานุเบกษาฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 121 ตอนที่ 33 ง วันที่ 22 เมษายน พุทธศักราช 2547 โดยการพิมพ์ซ้ำ IEC 60794-3(2001-09) Optical fibre cables – part 3 : specification – outdoor cables ต่อมาได้พิจารณาเห็นสมควรแปล IEC ดังกล่าวเป็นภาษาไทย จึงยกเลิกมาตรฐานเดิมและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3:ข้อกำหนดคุณลักษณะ – เคเบิลภายนอกอาคาร นี้ ขึ้นใหม่

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดขึ้นโดยรับ IEC 60794-3(2001-09) Optical fibre cables – part 3 : specification – outdoor cables มาใช้ในระดับเหมือนกันทุกประการ(identical) ทั้งเนื้อหาและโครงสร้าง โดยใช้ IEC ฉบับภาษาอังกฤษเป็นหลัก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้เป็นเล่มหนึ่งในอนุกรมมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเคเบิลเส้นใยนำแสง ซึ่งมีทั้งหมด 6 เล่ม คือ

มอก. 2050-2548	เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 1-1 ข้อกำหนดคุณลักษณะทั่วไป
มอก. 2051-2543	สายเคเบิลเส้นใยนำแสง ข้อกำหนดคุณลักษณะทั่วไป – วิธีดำเนินการทดสอบสายเคเบิลนำแสงพื้นฐาน
มอก. 2052-2548	เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่มที่ 3 ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร
มอก. 2165-2548	เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่มที่ 3-10 ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร – ข้อกำหนดคุณลักษณะเป็นรายการกลุ่ม สำหรับเคเบิลเส้นใยนำแสงโทรคมนาคมติดตั้งในท่อร้อยสายและฝังดินโดยตรง
มอก. 2166-2548	เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่มที่ 3-20 ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร – ข้อกำหนดคุณลักษณะเป็นรายการกลุ่ม สำหรับเคเบิลใยนำแสงโทรคมนาคมแขวนในอากาศที่สามารถรับน้ำหนักตัวเองได้
มอก. 2167-2548	เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3-30 เคเบิลนอกอาคาร – ข้อกำหนดคุณลักษณะเป็นรายการกลุ่ม สำหรับเคเบิลเส้นใยนำแสงโทรคมนาคมสำหรับผ่านทะเลสาบและแม่น้ำ

คณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้พิจารณามาตรฐานนี้แล้ว เห็นสมควรเสนอรัฐมนตรีประกาศตาม มาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511

สารบัญ

คำนำ

1. ขอบข่าย	1
2. เอกสารอ้างอิง	1
3. บทนิยาม	3
4. สัญลักษณ์	3
5. เส้นใยนำแสง	4
5.1 ทัวไป	4
5.2 การลดทอนสัญญาณ	4
5.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณ	4
5.2.2 การลดทอนสัญญาณแบบคงที่และแบบไม่ต่อเนื่อง	4
5.3 ความยาวคลื่นตัด	4
5.4 การเคลือบสีเส้นใยนำแสง	4
5.5 การกระจายของค่าโหมดโพลาริเซชัน หรือ PMD	4
5.6 ความยาวคลื่นตัดของเคเบิลต่อเส้น	5
6. ส่วนประกอบของเคเบิล	5
6.1 แบบการเคลือบแน่นครั้งที่สอง หรือ การเคลือบป้องกัน	6
6.2 แบบผิวย่น	6
6.3 แบบแกนนำร่อง	6
6.4 แบบท่อ	6
6.5 แบบแถบ	7
7. การสร้างเคเบิลเส้นใยนำแสง	8
7.1 ทัวไป	8
7.2 การจัดวางส่วนประกอบของเคเบิล	9
7.3 การเติมเต็มในแกนเคเบิล	9
7.4 ส่วนรับแรงดึง	10
7.5 ส่วนป้องกันความชื้น	10
7.6 เปลือกและเกราะของเคเบิล	10
7.6.1 เปลือกใน	10
7.6.2 เกราะป้องกัน	11
7.6.3 เปลือกนอก	11
7.6.4 เคเบิลที่มีการป้องกันภายนอกสำหรับผ่านทะเลสาบและแม่น้ำ	11

7.7	การทำเครื่องหมายบนเปลือกหุ้ม	11
7.8	ก๊าซไฮโดรเจน	11
8.	เงื่อนไขในการติดตั้งและใช้งาน	12
8.1	ทั่วไป	12
8.2	คุณสมบัติเฉพาะของส่วนประกอบต่าง ๆ ของเคเบิลเพื่อการเชื่อมต่อ	12
8.2.1	การทดสอบสำหรับวัตถุประสงค์ทั่วไป	12
8.2.2	การทดสอบท่อ	12
8.2.3	การทดสอบแถบ	12
9.	การทดสอบเคเบิลเส้นใยนำแสง	15
9.1	สมรรถนะเมื่อถูกดึง	16
9.2	สมรรถนะเมื่อติดตั้ง	16
9.2.1	การโค้งงอเมื่อถูกดึง	16
9.2.2	การโค้งงอซ้ำ	16
9.2.3	การกระแทก	16
9.2.4	การคดงอ	16
9.2.5	การบิด	16
9.2.6	แรงดันของน้ำ	16
9.2.8	การทนต่อการขูดขีดของเปลือก	16
9.3	การโค้งงอของเคเบิล	16
9.4	การบีบอัด	16
9.5	วัฏจักรอุณหภูมิ	16
9.6	การเร่งอายุ	16
9.6.1	การเข้ากันได้ของการเคลือบเส้นใย	17
9.6.2	เคเบิลสำเร็จรูป	17
9.7	การซึมผ่านของน้ำ (เฉพาะเคเบิลที่ใส่วัสดุกันน้ำ)	17
9.8	การทนต่อแรงอัดอากาศ (สำหรับเคเบิลที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ)	17
9.9	การทดสอบไฟฟ้า (สำหรับเคเบิลที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ)	17
9.10	เงื่อนไขพิเศษของการติดตั้งสายเคเบิลในอากาศ	17
9.10.1	การสั่นสะเทือนจากแรงลมปะทะ	17
9.10.2	การทนต่อกระสุนปืน	17

10. การประกันคุณภาพ	18
ภาคผนวก ก. คำแนะนำเกี่ยวกับข้อกำหนดทางสถิติของค่าการกระจาย PMD ของเคเบิลเส้นใยนำแสง	19
ก.1 บทนำ	19
ก.2 เครื่องมือ	20
ก.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	20
ก.4 วิธีทดสอบ	20
ก.5 การคำนวณ	20
ก.5.1 เคเบิลตัวที่ประกอบด้วยเคเบิลแต่ละส่วนต่อกัน	20
ก.5.2 วิธีที่ 1 : ค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ	21
ก.5.3 วิธีที่ 2 : ค่า DGD สูงสุด	26
ก.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PMD ของเคเบิลต่อ ที่ได้จากวิธีการที่ 1 กับสมรรถนะของระบบดิจิทัล	29
ก.6 ผลลัพธ์	30
ก.6.1 ข้อมูลที่ต้องจัดหาในการทดสอบแต่ละครั้ง	30
ก.6.2 ข้อมูลที่ต้องจัดหาเมื่อมีการร้องขอ	30
ก.7 เอกสารอ้างอิง	30
ตารางที่ 1 มิติสูงสุดของเส้นใยนำแสงแบบแถบ	14
รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของแถบที่มีลักษณะเป็นแบบการเชื่อมต่อผนังเส้นใยนำแสงเข้าด้วยกัน	8
รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของแถบที่มีลักษณะเป็นแบบการบรรจุรวมกันเป็นรูปแคปซูล	8
รูปที่ 3 ภาพตัดขวางทางเรขาคณิตของเส้นใยนำแสงแบบแถบ	13
รูปที่ ก.1 แนวเส้นกราฟที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันแกมมา	28



ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 3428 (พ.ศ. 2548)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. 2511

เรื่อง ยกเลิกมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สายเคเบิลใยแก้วนำแสง ข้อกำหนดคุณลักษณะเป็นรายเรื่อง - สายเคเบิลนอกอาคาร

และกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร

โดยที่เป็นการสมควรปรับปรุงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สายเคเบิลใยแก้วนำแสง ข้อกำหนดคุณลักษณะเป็นรายเรื่อง - สายเคเบิลนอกอาคาร มาตรฐานเลขที่ มอก. 2052-2543

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศยกเลิกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3229 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สายเคเบิลใยแก้วนำแสง ข้อกำหนดคุณลักษณะเป็นรายเรื่อง - สายเคเบิลนอกอาคาร ลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547 และออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร มาตรฐานเลขที่ มอก. 2052-2548 ขึ้นใหม่ ดังมีรายละเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ทั้งนี้ให้มีผลตั้งแต่วันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2548

สุริยะ จึงรุ่งเรืองกิจ

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เคเบิลเส้นใยนำแสง

เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร

1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ใช้กับเคเบิลเส้นใยนำแสงและส่วนประกอบเคเบิลเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่ประสงค์ใช้งานในเครือข่ายโทรคมนาคมสาธารณะ ในการใช้งานอื่นๆ ที่ต้องใช้เคเบิลเส้นใยนำแสงที่มีสมบัติเป็นไปในทำนองเดียวกัน อาจพิจารณาใช้ข้อกำหนดนี้ได้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ครอบคลุมข้อกำหนดสำหรับเคเบิลเส้นใยนำแสงที่ใช้ติดตั้งในท่อร้อยสายสำหรับฝังดินโดยตรง เคเบิลเส้นใยนำแสงแขวนในอากาศ และเคเบิลเส้นใยนำแสงผ่านทะเลสาบและแม่น้ำ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ไม่ครอบคลุมข้อกำหนดทั้งหมด สำหรับการใช้งานเคเบิลเส้นใยนำแสงแขวนในอากาศที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณที่มีสายส่งไฟฟ้ากำลังเหนือพื้นดิน ในกรณีเช่นนี้ อาจจำเป็นต้องมีข้อกำหนดและวิธีทดสอบเพิ่มเติม ยิ่งไปกว่านั้น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ไม่ครอบคลุมไปถึงเคเบิลเส้นใยนำแสงที่มีส่วนประกอบเป็นตัวนำสำหรับต่อเชื่อมสายดิน และเคเบิลเส้นใยนำแสงที่ต่อเชื่อมกับตัวนำเฟสหรือตัวนำสายดินของสายส่งกำลังเหนือพื้นดิน

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ไม่ครอบคลุม ถึงวิธีการซ่อมแซมหรือความสามารถในการซ่อมแซมเคเบิล ในกรณีของเคเบิลเส้นใยนำแสงผ่านทะเลสาบและแม่น้ำ รวมทั้งไม่ครอบคลุมถึงเคเบิลเส้นใยนำแสงที่ใช้กับเครื่องขยายสัญญาณได้น้ำ

2. เอกสารอ้างอิง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ จัดทำขึ้นโดยอาศัยเอกสารอ้างอิงที่ได้แสดงไว้ในส่วนนี้เป็นแนวทาง ซึ่งเอกสารเหล่านี้มีทั้งที่ได้ระบุและมิได้ระบุเวลาที่จัดทำไว้ อย่างไรก็ตาม ผู้ที่ต้องการดำเนินการตามมาตรฐานอุตสาหกรรมนี้ ควรสืบค้นข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่เป็นฉบับปัจจุบัน

IEC 60189 (all part), Low-frequency cables and wires with PVC insulation and PVC sheath

IEC 60304:1982, Standard colours for insulation for low-frequency cables and wires

IEC 60708-1:1981, Low-frequency cables with polyolefin insulation and moisture barrier polyolefin sheath
– Part 1: General design details and requirements

IEC 60793 (all parts), Optical fibres

IEC 60793-1-21:2001, Optical fibres – Part 1-21: Measurement and test procedures – Coating geometry measuring methods

IEC 60793-1-32:2001, Optical fibres – Part 1-32: Measurement and test procedures – Coating strippability

IEC 60793-1-40:2001. Optical fibres – Part 1-40: Attenuation measurement methods

IEC 60793-1-44:2001. Optical fibres – Part 1-44: Cut-off wavelength measurement methods

IEC 60793-2:2003, Optical fibres – Part 2: Product specifications

IEC 60793-2-10:2002, Optical fibres – Part 2-10 Product specifications – Sectional specification for category A1 multimode fibres

IEC 60793-2-20:2001, Optical fibres – Part 2-20 Product specifications – Sectional specification for category A2 multimode fibres

IEC 60793-2-30:2002, Optical fibres – Part 2-30 Product specifications – Sectional specification for category A3 multimode fibres

IEC 60793-2-40:2002, Optical fibres – Part 2-40 Product specifications – Sectional specification for category A4 multimode fibres

IEC 60793-2-50:2005, Optical fibres cables – Part 2-50 Product specifications – Sectional specification for class B single mode fibres

มอก. 2050-2548 เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 1-1 ข้อกำหนดคุณลักษณะทั่วไป

มอก. 2051-2543 เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 1-2 ข้อกำหนดคุณลักษณะทั่วไป – ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นฐานของเคเบิล

IEC 60811-5-1:1990, Common test methods for insulating and sheathing material of electric cables – Part 5: Methods specific to filling compounds – Section 1: Drop point – Separation of oil – Lower temperature brittleness – Total acid number – Absence of corrosive components – Permittivity at 23°C – DC resistivity at 23°C and 100°C

IEC/TR 61282-3:2001, Guidelines for the calculation of PMD in fibre optic systems

IEC/TR 61941-3:2000, Optical fibres– Polarization mode dispersion measurement techniques for single-mode optical fibres

ITU-T Recommendation K.25:2000, Protection of optical fibre cables

TIA/EIA-598-A: 1995, Optical fibre cables colour coding

ITU Recommendation G.652: 2003, Series G Transmission systems and media, digital systems and networks
Transmission media characteristics – optical fibre cables

ITU Recommendation G.653: 2003, Series G Transmission systems and media, digital systems and networks
Transmission media characteristics – optical fibre cables

ITU Recommendation G.654: 2004, Series G Transmission systems and media, digital systems and networks
Transmission media characteristics – optical fibre cables

ITU Recommendation G.655: 2003, Series G Transmission systems and media, digital systems and networks
Transmission media characteristics – optical fibre cables

3. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 3.1 การประวิงของกลุ่มที่ต่างกัน (differential group delay, DGD) มีหน่วยเป็นพิโกวินาที
หมายถึง ความสัมพันธ์ของการประวิงเวลา ระหว่างสองแกนหลักที่เป็นแกนโพลาไรเซชันของสัญญาณแสงโหมด
พื้นฐานของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงในตำแหน่งปลายของเคเบิลเส้นใยนำแสงที่เกิดจากที่มีความยาวคลื่น
เฉพาะในขณะเวลานั้น
- 3.2 ค่าการกระจายของค่าโหมดโพลาไรเซชัน (polarization mode dispersion value, PMD) มีหน่วยเป็นพิโกวินาที
หมายถึง ค่าเฉลี่ยของ DGD ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ
- 3.3 สัมประสิทธิ์การกระจายโหมดโพลาไรเซชัน (polarization mode dispersion coefficient, PMD) มีหน่วยเป็น
พิโกวินาทีต่อรากที่สองของกิโลเมตร ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)
หมายถึง ค่า PMD ของเคเบิลเส้นใยนำแสงหารด้วยรากที่สองของความยาวเคเบิลในหน่วยของกิโลเมตร
- 3.4 เคเบิลแต่ละส่วน (cable section)
หมายถึง เคเบิลที่ผลิตขึ้นในแต่ละล้อ
- 3.5 เคเบิลต่อ (link)
หมายถึง เคเบิลแต่ละส่วนที่นำมาต่อกันเป็นความยาวเดียวกัน
หมายเหตุ ค่า PMD ของเคเบิลต่อ คำนวณได้จากสมการที่แสดงไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ หรืออาจ
หาได้จากการวัดจริง

4. สัญลักษณ์

- λ_{cc} หมายถึง ความยาวคลื่นตัดของเคเบิลเส้นใยนำแสง (cabled fibre cut-off wavelength)
- SZ หมายถึง วิธีการตีเกลียวท่อที่สอดเส้นใยนำแสงไว้แล้วภายในเคเบิลแบบกลับทิศทางซ้ายขวาเป็นช่วง ๆ อย่าง
ต่อเนื่อง

5. เส้นใยนำแสง

5.1 ทัวไป

ให้ใช้เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่เป็นไปตามข้อกำหนดใน IEC 60793-2

5.2 การลดทอนสัญญาณ (attenuation)

5.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณ (attenuation coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณสูงสุดของเคเบิล จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยนำแสงที่ใช้ ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ใน มอก.2050 ข้อ 5.1 ทั้งนี้ค่าจำเพาะของสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณจะขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ทำกับผู้รับใช้

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณให้เป็นไปตาม IEC 60793-1-40 วิธี A B หรือ C

5.2.2 การลดทอนสัญญาณแบบคงที่และแบบไม่ต่อเนื่อง (attenuation uniformity – attenuation discontinuities)

ค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยนำแสงที่ใช้ ต้องไม่มีจุดที่แสดงค่าแบบไม่ต่อเนื่องเกินกว่า 0.10 เดซิเบล ทั้งนี้วิธีการทดสอบที่เหมาะสมกำลังอยู่ในระหว่างการพิจารณา

5.3 ความยาวคลื่นตัด (cut-off wavelength)

ค่าความยาวคลื่นตัดเคเบิลเส้นใยนำแสง (λ_{cc}) ต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นที่ใช้งาน

5.4 การเคลือบสีเส้นใยนำแสง

ในกรณีที่มีการเคลือบสีบนเปลือกหุ้มชั้นแรกของเส้นใยนำแสงเพื่อการระบุ สีที่เคลือบต้องแสดงสีที่ถูกต้องตลอดอายุการใช้งานของเคเบิล และการเลือกสีที่ใช้ต้องตรงตามข้อกำหนดของ IEC 60304 หรือ TIA/EIA-598-A ในบางกรณี การเคลือบสีอาจต้องกระทำเพื่อยอมให้แสงบางส่วนทะลุผ่านเปลือกหุ้มชั้นแรกของเส้นใยนำแสงได้อย่างเพียงพอ เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการการส่งแสงเข้าไปหรือรับแสงออกจากเส้นใยนำแสงได้ อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว อาจกระทำได้โดยการปกปิดเปลือกหุ้มที่เคลือบสีออกก็ได้

5.5 การกระจายของค่าโหมดโพลาริเซชัน หรือ PMD

ค่า PMD ของเคเบิลเส้นใยนำแสง กำหนดโดยวิธีทางสถิติไม่ใช่กำหนดจากเส้นใยนำแสงเส้นใด เส้นหนึ่ง ตามที่ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก. การวัดค่า PMD ของเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นของเคเบิล อาจกระทำด้วยวิธีการใด ๆ ก็ได้ ที่กำหนดใน มอก. 2051 การวัดเส้นใยนำแสงก่อนการผลิตเป็นเคเบิลเพื่อใช้ในการรวบรวมข้อมูลทางสถิติสามารถได้เมื่อการออกแบบ และกระบวนการผลิตเคเบิลมีสภาพเสถียร รวมทั้งทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ PMD ของเส้นใยนำแสงก่อนการผลิตและหลังการผลิตเป็นเคเบิล ข้อกำหนดต่อไปนี้ใช้ได้เฉพาะเคเบิลต่อที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลของเคเบิลเท่านั้น ในกรณีที่ต้องการรวมข้อมูลนี้เข้ากับส่วนอื่นของเคเบิลต่อ เช่น อุปกรณ์ และภาคขยายทางแสง ให้เป็นไปตาม IEC 61282-3

ในการวัดค่าของ PMD สามารถเลือกใช้วิธีการใดวิธีการหนึ่งต่อไปนี้

(ก) วิธีที่ 1

ผู้ทำแจ้งค่า PMD ที่ออกแบบ (PMD_Q) โดยกำหนดค่า PMD_Q เป็นค่าทางสถิติสูงสุดของสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลเส้นใยนำแสงหลายลวดของเคเบิลต่อ ทั้งนี้ค่า PMD_Q ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.5 พิโกวินาทีต่อรากที่สองของกิโลเมตร โดยมีค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าเกินค่าที่กำหนดนี้เท่ากับ 10^{-4} สำหรับเคเบิลต่อเป็นจำนวนอย่างน้อย 20 ลวด เว้นแต่จะกำหนดไว้เป็นอย่างอื่น ในการคำนวณค่า PMD_Q ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้ทำ รายละเอียดที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PMD ที่ออกแบบและสมรรถนะการทำงานของระบบในการส่งสัญญาณดิจิทัล แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

(ข) วิธีที่ 2

กำหนดให้เคเบิลเส้นใยนำแสงมีค่า PMD ที่เกิดจากสัญญาณแสงในช่วงของความยาวคลื่นใช้งานที่เดินทางจากปลายถึงปลาย (end - to - end) มีค่าเท่ากับ I_{tot} โดยมีค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าเกินค่าที่กำหนดนี้ไม่เกินค่า P_F ทั้งนี้ค่าของ P_F สามารถคำนวณได้จากเคเบิลต่อจำนวนไม่น้อยกว่า 40 ลวดเป็นระยะทางประมาณ 400 กิโลเมตร โดยค่าความน่าจะเป็น P_F มีค่าสอดคล้องกับ $P_F \leq 6.5 \times 10^{-8}$ สำหรับค่า $I_{tot} = 25$ พิโกวินาที เว้นแต่จะกำหนดไว้เป็นอย่างอื่น อนึ่ง การกำหนดค่าของ P_F และ I_{tot} รวมทั้งวิธีการเฉพาะทางสถิติที่ใช้ในการกำหนดและหาค่าเหล่านี้ อาจขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำได้

หมายเหตุ ค่าของ P_F (6.5×10^{-8} สำหรับค่า $I_{tot} = 25$ พิโกวินาที สอดคล้องกับเวลาที่มากกว่า 25 พิโกวินาที ซึ่งเท่ากับ 0.002 นาฬิกา/ปี/กิโลเมตร/วงจร

5.6 ความยาวคลื่นตัดของเคเบิลต่อสั้น (jumper cable cut-off wavelength)

ในกรณีที่กำหนดค่าความยาวคลื่นตัดของเคเบิลต่อสั้น (λ_{cc}) ค่าดังกล่าวต้องวัดตามวิธีใน IEC 60793-1-44 โดยจัดเส้นใยนำแสงให้เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง X มิลลิเมตร ค่าความยาวคลื่นตัดของเคเบิลต่อสั้นต้องมีค่าต่ำกว่าความยาวคลื่นใช้งาน (ในการใช้งานเคเบิลต่อเส้นที่สั้นกว่า 2 เมตร อาจต้องกำหนดค่าความยาวคลื่นตัดให้ต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น)

หมายเหตุ บางครั้งจะกำหนดค่า $X = 152$ มิลลิเมตร

6. ส่วนประกอบของเคเบิล

โดยทั่วไป เคเบิลเส้นใยนำแสงประกอบไปด้วยส่วนประกอบสำคัญหลายอย่าง ขึ้นอยู่กับการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน สภาพแวดล้อมการใช้งาน และกระบวนการผลิต รวมไปถึงการป้องกันเส้นใยนำแสงในระหว่างการติดตั้ง เคลื่อนย้ายและการผลิตเป็นเคเบิล

ให้เลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบ ให้เข้ากันได้กับส่วนประกอบอื่นๆ เมื่อต้องสัมผัสกัน วิธีการทดสอบการเข้ากันได้ที่เหมาะสมจะกำหนดไว้เป็นกลุ่ม หรือตามรายละเอียดของข้อกำหนดคุณลักษณะ

ส่วนประกอบของการนำแสง (optical element) คือส่วนป้องกันเส้นใยนำแสงซึ่งได้บรรจุเส้นใยนำแสงไว้ และออกแบบเพื่อทำหน้าที่หลักของแกนเคเบิล (cable core) ซึ่งอาจประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ที่จะกล่าวถึงต่อไป ส่วนประกอบของการนำแสง และเส้นใยนำแสงแต่ละเส้น ต้องมีการระบุความแตกต่างได้อย่างเด่นชัด ตัวอย่างเช่น โดยการใช้สี การจัดเรียงลำดับตำแหน่งอย่างเหมาะสม การทำเครื่องหมาย รวมไปถึงสิ่งที่กำหนดไว้ในรายละเอียดของข้อกำหนดคุณลักษณะ

การทดสอบอาจกระทำกับส่วนประกอบของเคเบิล ทั้งที่อยู่ในรูปแบบก่อนนำมาประกอบเป็นเคเบิลหรือจากเคเบิลสำเร็จรูปที่ผลิตได้ โดยทั่วไปการทดสอบจะกระทำกับส่วนป้องกันเส้นใยนำแสงที่อยู่ในเคเบิลสำเร็จรูป เว้นแต่จะกำหนดไว้เป็นอย่างอื่น (การทดสอบในกรณีนี้ ใช้ได้เฉพาะกับเคเบิลสำเร็จรูป ที่ส่วนประกอบของเคเบิลผลิตมาจากผู้ทำรายเดียวกันกับผู้ทำเคเบิลเท่านั้น สำหรับการทดสอบส่วนประกอบก่อนการผลิตเคเบิล จะกระทำก็ต่อเมื่อส่วนประกอบนั้นได้มาจากผู้ทำรายอื่น แต่ทั้งนี้มิได้หมายถึงการยกเว้นการทดสอบเคเบิลสำเร็จรูป)

แบบต่าง ๆ ของส่วนประกอบของการนำแสงสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- 6.1 แบบการเคลือบแน่นครั้งที่สอง หรือการเคลือบป้องกัน (tight secondary coating or buffer) ถ้าต้องการเคลือบแน่นครั้งที่สอง วัสดุเคลือบที่ใช้จัดอยู่ในประเภทพอลิเมอร์ โดยเคลือบเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ และวัสดุเคลือบนี้ต้องปกกออกได้โดยง่ายเมื่อมีการต่อเส้นใยนำแสง โดยปกติเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการเคลือบครั้งที่สองจะมีค่าอยู่ระหว่าง 800 ไมโครเมตร กับ 900 ไมโครเมตร ตามที่ตกลงกันไว้ระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร และค่าการเยื้องศูนย์กลางของการเคลือบไม่เกิน 75 ไมโครเมตร นอกจากตกลงกันไว้เป็นอย่างอื่นระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

สีที่ใช้ในการเคลือบแน่นครั้งที่สองต้องมีความทนทาน สามารถแสดงสีได้อย่างถูกต้องชัดเจนตลอดอายุการใช้งานของเคเบิล

- 6.2 แบบผิวย่น (ruggedized fibre)

การเพิ่มส่วนป้องกันเส้นใยนำแสงแบบเคลือบแน่นครั้งที่สอง ทำได้โดยการหุ้มเส้นใยนำแสงด้วยส่วนรับแรงดึงชนิดโพลีเอทิลีนเป็นจำนวนหนึ่งรอบหรือมากกว่า ภายในเปลือกหุ้มเคเบิล (เช่นเคเบิลชนิดกระจาย (fan-out cable))

- 6.3 แบบแกนนำร่อง (slotted core)

แกนนำร่องเกิดจากการหล่อขึ้นด้วยวัสดุที่เหมาะสม (เช่น พอลิเอทิลีน หรือ พอลิโพรพิลีน) เพื่อให้ได้ร่องที่มีโครงสร้างและจำนวนตามต้องการ โดยร่องเหล่านี้จะจัดให้มีลักษณะเป็นเกลียวเวียนรอบจุดศูนย์กลางหรือสลับซ้ายขวาไปมาแบบ SZ ตามแนวแกน เส้นใยนำแสงจำนวนหนึ่งเส้นหรือมากกว่า หรือส่วนประกอบอื่นของเคเบิล จะจัดวางไว้ในแต่ละร่อง ที่อาจเติมตัวเติมไว้หรือไม่ก็ได้

โดยปกติแกนนำร่องจะประกอบด้วยแกนกลาง ซึ่งอาจเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ ส่วนที่เป็นร่องจะยึดติดแน่นอย่างเหมาะสมกับแกนกลางนี้ เพื่อให้เคเบิลมีสภาพเสถียรต่ออุณหภูมิ และสภาวะแรงดึงที่กระทำต่อแกนนำร่อง

รูปแบบโครงสร้างของร่องต้องมีลักษณะสม่ำเสมอ และต้องมีลักษณะที่ทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าสมรรถนะทางแสงและทางกลของเคเบิล เป็นไปตามข้อกำหนดของเคเบิลเส้นใยนำแสง

- 6.4 แบบท่อ (tube)

เส้นใยนำแสงที่เคลือบแล้วหนึ่งเส้นหรือมากกว่า หรือส่วนประกอบอื่นของเคเบิล จะบรรจุ (อย่างหลวมหรือไม่ก็ได้) อยู่ในท่อ ภายในท่ออาจบรรจุไว้ด้วยวัสดุกันน้ำหรือไม่ก็ได้ในการเสริมความแข็งแรงของท่อ อาจกระทำได้ด้วยส่วนประกอบของผนังท่อ

ในกรณีที่ต้องการทดสอบสมบัติที่เหมาะสมของท่อ ให้ประเมินความต้านทานการคดงอของท่อจากการทดสอบตามมอก.2051 วิธี G7

ตัวเติมในท่อต้องเป็นไปตาม มอก. 2051 วิธี E14 หรือวิธี E15

6.5 แบบแถบ (ribbon)

แถบเส้นใยนำแสงเกิดจากการนำเส้นใยนำแสงหลายเส้นมาประกอบเรียงกันเป็นแนวของเส้นตรง

การจัดวางเรียงเส้นใยนำแสงหลายเส้นเป็นแถบต้องจัดให้มีลักษณะขนานกัน จะไขว้ข้ามกันไม่ได้โดยปกติแถบที่สร้างขึ้นมักมีจำนวนเส้นใยนำแสงเท่ากับ 2, 4, 6, 8, 10, 12 หรือ 24 เส้น ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้

จุดมุ่งหมายของการออกแบบแถบเส้นใยนำแสง ต้องทำให้เส้นใยนำแสงภายในแถบที่อยู่ใกล้กัน ยึดติดกัน และแนวแกนกลางของเส้นใยนำแสงทั้งหมดมีลักษณะเป็นเส้นตรง ขนานกัน และอยู่ในระนาบเดียวกัน

หากมิได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น แถบเส้นใยนำแสงแต่ละแถบต้องระบุความแตกต่างกันอย่างเด่นชัดด้วยการพิมพ์เครื่องหมาย หรือการให้สีที่เป็นเอกลักษณ์กับเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้อ้างอิงในแถบ และ/หรือด้วยวิธีการให้สีเฉพาะตามวัสดุที่ใช้ทำแถบ

โดยปกติโครงสร้างของแถบจะมีลักษณะเป็นแบบการเชื่อมต่อผนังเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกัน (edge-bonded) หรือการบรรจุรวมกันเป็นรูปแคปซูล (encapsulated) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่ใช้ยึดเส้นใยนำแสง (ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของแถบแตกต่างกัน)

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างแบบการเชื่อมต่อผนังเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกันที่มีสารที่ใช้ยึดเส้นใยนำแสงส่วนเกินแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยนำแสงที่อยู่ติดกัน ในขณะที่รูปที่ 2 แสดงโครงสร้าง การบรรจุรวมกันเป็นรูปแคปซูลที่มีสารที่ใช้ยึดเส้นใยนำแสงห่อหุ้มผนังด้านนอกสุดของเส้นใยนำแสงทุกเส้นโครงสร้างของแถบทั้งสองลักษณะนี้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้



หรือ



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของแถบที่มีลักษณะเป็นแบบการเชื่อมต่อผนังเส้นใยนำแสงเข้าด้วยกัน
(ข้อ 6.5)



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของแถบที่มีลักษณะเป็นแบบการบรรจุรวมกันเป็นรูปแคปซูล
(ข้อ 6.5)

เนื่องจากการทดสอบเส้นใยนำแสงก่อนและหลังการผลิตเป็นเคเบิลสำเร็จรูป ให้ข้อมูลไม่เพียงพอที่จะแสดงสมบัติทั้งหมดของเคเบิลได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องวัดหาค่าตัวแปรเสริมบางค่าจากแถบเส้นใยนำแสง โดยค่าตัวแปรเสริมต่าง ๆ เหล่านี้ จะได้กล่าวถึงต่อไป

7. การสร้างเคเบิลเส้นใยนำแสง

7.1 ทัวไป

การออกแบบและผลิตเคเบิล มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เคเบิลมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 20 ปี การลดทอนสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นใช้งานของเคเบิลที่ติดตั้งแล้ว ต้องมีค่าไม่เกินค่าที่ตกลงกันไว้ระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำวัสดุต่างๆ ที่นำมาใช้ในการทำเป็นเคเบิล ต้องไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ เมื่อนำเคเบิลมาใช้งาน

โดยปกติเส้นใยนำแสงที่บรรจุอยู่ในเคเบิลมักเป็นชนิดเดียวกัน แต่ในความเป็นจริงเคเบิลบางชนิดอาจเป็นแบบผสม (hybrid) ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นใยนำแสงหลายชนิด หรืออาจเป็นเส้นใยนำแสงชนิดเดียวกันแต่มาจากแหล่งผลิตที่ต่างกัน

เคเบิลต้องไม่มีการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงตลอดความยาวที่ส่งมอบ นอกจากตกลงไว้เป็นอย่างอื่นระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

เคเบิลต้องสามารถบ่งชี้ความแตกต่างของเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นที่อยู่ภายในได้ตลอดความยาวของเคเบิล

ในการป้องกันไม่ให้เส้นใยนำแสงในเคเบิลที่ใช้ติดตั้งในอากาศ เกิดการยืดตัวมากเกินไปเนื่องมาจากผลของสภาพแวดล้อม เช่น การปะทะจากแรงลม หรือการปะทะจากลูกเห็บ การสร้างของเคเบิล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ส่วนรับแรงดึง ต้องเลือกให้เหมาะสม เพื่อจำกัดอัตราการยืดตัวความเครียด (strain) ไม่ให้มีค่าเกินกว่าค่าที่ตกลงกันไว้ระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

7.2 การจัดวางส่วนประกอบของเคเบิล

ส่วนประกอบของการนำแสงที่กล่าวถึงในข้อ 6. อาจจัดวางในลักษณะต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ก) จัดวางส่วนประกอบของการนำแสงแบบไม่ตีเกลียว (ในการประเมินสมบัติความต้านทานต่อการคดงอสำหรับท่อเดี่ยว จะกระทำขึ้นในกรณีที่มีความต้องการเท่านั้น)
- ข) จัดวางโดยการรวมกลุ่มส่วนประกอบของการนำแสงเข้าด้วยกันด้วยวิธีตีเกลียวรอบศูนย์กลาง หรือวิธีการตีเกลียวกลับทิศทางซ้ายขวาเป็นช่วง ๆ (SZ) (ในกรณีของเส้นใยนำแสงแบบแถบอาจจัดวางรวมกันเป็นชั้นที่มีจำนวนสองชั้นหรือมากกว่า)
- ค) จัดวางเป็นกลุ่มแบบผสมในแกนนำร่อง ด้วยเส้นใยนำแสงแบบเคลือบแน่น แบบแถบหรือแบบท่อ
- ง) จัดวางเป็นกลุ่มแบบผสมในท่อ ด้วยเส้นใยนำแสงแบบเคลือบแน่นหรือแบบแถบ

ถ้ามีการระบุไว้ในข้อกำหนด ตัวนำทองแดงหุ้มฉนวนในโครงสร้างแบบเส้นเดี่ยว เส้นคู่ หรือสี่เส้นอาจจัดวางพร้อมกับส่วนประกอบของการนำแสง

การกำหนดค่ารัศมีต่ำสุดของเคเบิลที่โค้งงอ ต้องทำให้เกิดอัตราการยืดตัวความเครียด ไม่มากไปกว่าค่าสูงสุดตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

7.3 การเติมเต็มในแกนเคเบิล

ในกรณีที่มีการระบุไว้ในข้อตกลง ส่วนประกอบของแกนเคเบิลต้องเติมให้เต็มด้วยวัสดุกันน้ำตลอดความยาว หรืออาจเติมเป็นช่วง ๆ ตามความเหมาะสมก็ได้ วัสดุกันน้ำที่ใช้ต้องเชื่อมต่อออกจากเคเบิลได้ง่าย โดยไม่ต้องใช้สารอื่นที่ก่อให้เกิดอันตราย เคเบิลต้องผ่านการทดสอบการหยดของวัสดุกันน้ำ ตาม มอก.2051 วิธีทดสอบ E14 วัสดุกันน้ำต้องเข้ากันได้กับส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเคเบิล ในกรณีที่มีการใช้ตัวเติม (filling compound) ตัวเติมที่นำมาใช้ต้องมีความเหมาะสมโดยต้องผ่านการทดสอบตามข้อดังต่อไปนี้

- ก) ปริมาณน้ำมันที่แยกออกมาจากสารเติมเต็มต้องเป็นไปตาม IEC 60811-5-1 ข้อ 5. หรือสารเติมเต็มต้องผ่านการทดสอบตาม มอก.2051 วิธี E 15
- ข) เคเบิลที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ ตัวเติมต้องผ่านการทดสอบการกัดกร่อนตาม IEC 60811-5-1 ข้อ 8.
- ค) ถ้าเลือกทดสอบเฉพาะเรื่องปริมาณน้ำมันที่แยกออกมาตามข้อ 7.3 ก) ตัวเติมต้องไม่เปลี่ยนเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนด การกำหนดค่าจุดหยด (drop point) เป็นไปตาม IEC 60811-5-1 ข้อ 4.

7.4 ส่วนรับแรงดึง (strength member)

ต้องออกแบบเคเบิลให้มีส่วนรับแรงดึงเพียงพอสำหรับการติดตั้งและการใช้งาน เพื่อป้องกันไม่ให้เส้นใยนำแสงยืดตัวมากกว่าค่าสูงสุดที่ได้ตกลงกันไว้ระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

ส่วนรับแรงดึงอาจเป็นโลหะหรือโลหะ และอาจเป็นส่วนประกอบในแกนเคเบิล และ/หรืออาจอยู่ได้เปลือกและ/หรือในเปลือกของเคเบิลก็ได้

หากมีการระบุไว้ในข้อกำหนด เคเบิลในอากาศอาจมีสายสะพานแยกออกเคเบิลได้ ตำแหน่งและชนิดของสายสะพานขึ้นอยู่กับวิธีการติดตั้งและสภาพแวดล้อม โดยพิจารณาจากข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ ยกตัวอย่างเช่น สายสะพานและแกนเคเบิล อาจขึ้นรูปเป็นโครงสร้าง “รูปเลข 8” (figure 8) หรือเคเบิลมัดไปกับสายสะพานที่เป็นคนละส่วนกับเคเบิลด้วยลวดรัด (lashing wire) หรือวิธีการอื่นที่เหมาะสม เป็นต้น

7.5 ส่วนป้องกันความชื้น (moisture barrier)

หากมีการระบุไว้ในข้อกำหนด ส่วนป้องกันความชื้นอาจทำได้โดยใช้เปลือกโลหะตลอดความยาวของเคเบิลหรือโดยวิธีใช้เทปโลหะห่อรอบแกนเคเบิล โดยขอบของโลหะต้องทับซ้อนและติดแน่นกับเปลือกตลอดความยาวของเคเบิล

สำหรับการสร้างอื่นที่จะนำมาใช้ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

ในกรณีที่ใช้เปลือกโลหะตลอดความยาวของเคเบิล วัสดุที่ใช้และความหนาของเปลือกขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

โลหะที่นำมาใช้ทำส่วนป้องกันความชื้นไม่จำกัดชนิดของโลหะ อาจเป็นแถบอะลูมิเนียม หรือเหล็ก หรือทองแดง หรือทองแดงเจือ แบบเคลือบหรือไม่เคลือบก็ได้ แถบโลหะเหล่านี้อาจผลิตเป็นแผ่นเรียบ หรือผลิตเป็นลอนตามข้อกำหนดของการสั่งซื้อ ทั้งนี้อาจยอมให้มีการเชื่อมต่อแถบโลหะในเคเบิลได้ โดยหลังการเชื่อมต่อต้องมั่นใจว่าคุณลักษณะทางไฟฟ้ามีความต่อเนื่องตลอดเคเบิลสำเร็จรูป

ในกรณีที่ใช้ส่วนป้องกันความชื้น ชนิดของแถบอะลูมิเนียม ขนาดของการทับซ้อน และความหนาของแถบอะลูมิเนียม ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 60708-1 ความหนาของแถบอาจลดลงได้โดยให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ การติดแน่นระหว่างแถบอะลูมิเนียมและเปลือกให้เป็นไปตาม IEC 60708-1 ข้อ 14.2 โดยทำขึ้นตัวอย่างหนึ่งขึ้นมาจากปลายสายเคเบิลสำเร็จรูปแต่ละด้าน เพื่อใช้ตรวจสอบให้แน่ใจว่าการทับซ้อนของแถบยึดติดกันและเป็นไปตามข้อกำหนดต่างๆ ในข้อนี้

อาจตรวจสอบประสิทธิผลของส่วนป้องกันความชื้น ด้วยวิธีทดสอบอื่นตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

7.6 เปลือกและเกราะของเคเบิล (cable sheath and armouring)

7.6.1 เปลือกใน (inner sheath)

เคเบิลอาจมีเปลือกในซึ่งขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ เมื่อต้องการมีการสร้างแบบเฉพาะหรือเพื่อวัตถุประสงค์ของการผลิต แกนเคเบิล หรือหน่วยย่อยในแกนเคเบิล หรือทั้งสองอย่าง อาจมีเปลือกในหุ้มทับโดยเปลือกในทำจากพอลิเอทิลีน เว้นแต่ตกลงกันไว้เป็นอย่างอื่น

7.6.2 เกราะป้องกัน (armouring)

ถ้าต้องการเสริมความแข็งแรงหรือป้องกันความเสียหายจากภายนอกให้กับเคเบิล เคเบิลต้องมีเกราะป้องกัน

7.6.3 เปลือกนอก (outer sheath)

เคเบิลต้องมีเปลือกนอกแบบไม่มีตะเข็บทำจากพอลิเอทิลีน ชนิดที่คงสภาพอยู่ได้ในสภาวะอากาศที่มีรังสีอัลตราไวโอเล็ต และมีสมบัติตรงตาม IEC 60708-1 ข้อ 22. นอกจากตกลงกันไว้เป็นอย่างอื่นระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

การพิจารณากำหนดค่าความหนาของเปลือก เส้นผ่านศูนย์กลางรวมของเคเบิลและค่าเบี่ยงเบนต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมและเงื่อนไขในการติดตั้ง ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

7.6.4 เคเบิลที่มีการป้องกันภายนอกสำหรับผ่านทะเลสาบและแม่น้ำ

ส่วนป้องกันชั้นนอกสุด อาจเป็นชั้นของพอลิโพรพิลีน หรือเปลือกนอกที่ทำจากพอลิเอทิลีน หรือวัสดุที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

หากมีการระบุไว้ในข้อกำหนด เปลือกนอกต้องมีสีที่สามารถมองเห็นได้ง่ายในขณะที่มีการเคลื่อนย้ายเคเบิลระหว่างการติดตั้งหรือซ่อมบำรุง

7.7 การทำเครื่องหมายบนเปลือกหุ้ม (sheath marking)

หากมีการระบุให้ทำเครื่องหมายบนเคเบิลตามวิธีที่ตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ วิธีทั่วไปที่ใช้คือการทำลายูนูน (embossing) ประทับรอยด้วยความร้อน (sintering) สร้างรอยพิมพ์ (imprinting) ติดด้วยแผ่นฟอลล์ยความร้อน (hot foil) และพิมพ์บนผิวด้านนอก (surface printing) เป็นต้น

การทำเครื่องหมายอาจทำเป็นแถวเดียวหรือสองแถว ถ้าเป็นแบบแถวเดียวต้องทำเครื่องหมายในแนวนอนให้ต่อเนื่องตลอดความยาวของเคเบิล ถ้าเป็นแบบสองแถวการทำเครื่องหมายต้องให้อยู่บนผิวด้านหนึ่งของเคเบิล ในลักษณะตรงกันข้ามกันของเส้นรอบวง และต้องปรากฏให้เห็นตลอดความยาวของเคเบิล

เครื่องหมายของเคเบิลต้องทนต่อการขีดข่วน ตาม มอก. 2051 วิธีทดสอบ E2B

เคเบิลที่มีการทำเครื่องหมายแบบสองแถว การทดสอบการทนต่อการขีดข่วนของเครื่องหมายให้กระทำกับแถวใดแถวหนึ่งเท่านั้น

7.8 ก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen gas)

ให้เป็นไปตามคำแนะนำที่ได้แสดงไว้ในมอก. 2050 ภาคผนวก ง.

8. เงื่อนไขในการติดตั้งและใช้งาน

8.1 ทัวไป

เงื่อนไขในการติดตั้งและใช้งาน ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

8.2 ลักษณะเฉพาะของส่วนประกอบต่าง ๆ ของเคเบิลเพื่อการเชื่อมต่อ

การทดสอบต่อไปนี้ มีเจตนาเพื่อให้เห็นลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันไปของส่วนประกอบของเคเบิล เพื่อวัตถุประสงค์ในการเชื่อมต่อ

8.2.1 การทดสอบสำหรับวัตถุประสงค์ทั่วไป

หากมิได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น การทดสอบเหล่านี้ให้ใช้กับส่วนประกอบของการนำแสงทุกชนิด

8.2.1.1 มิติ

ให้ใช้วิธีทดสอบต่อไปนี้ตามความเหมาะสม

- เส้นผ่านศูนย์กลางของการเคลือบแน่นครั้งที่สอง ให้ใช้ IEC 60793-1-21 วิธีทดสอบ B
- ท่อ แกนนำร่อง และเส้นใยนำแสงที่มีการเสริมส่วนป้องกัน ให้ใช้ IEC 60793-1-21 หรือ IEC 60189 วิธีทดสอบ B
- แฉบ ให้ใช้ มอก. 2051 วิธีทดสอบแบบ G2 , G3 หรือ G4

8.2.1.2 การทดสอบการโค้งงอ (bend test)

หากกำหนดให้มีการทดสอบ ให้ใช้ มอก. 2051 วิธี G1

8.2.1.3 สภาพลอกได้ (strippability)

การทดสอบสภาพลอกได้สำหรับเส้นใยนำแสงที่มีการเคลือบ ครั้งแรกหรือ ครั้งที่สอง ให้ใช้วิธีของ IEC 60793-1-32

8.2.2 การทดสอบท่อ

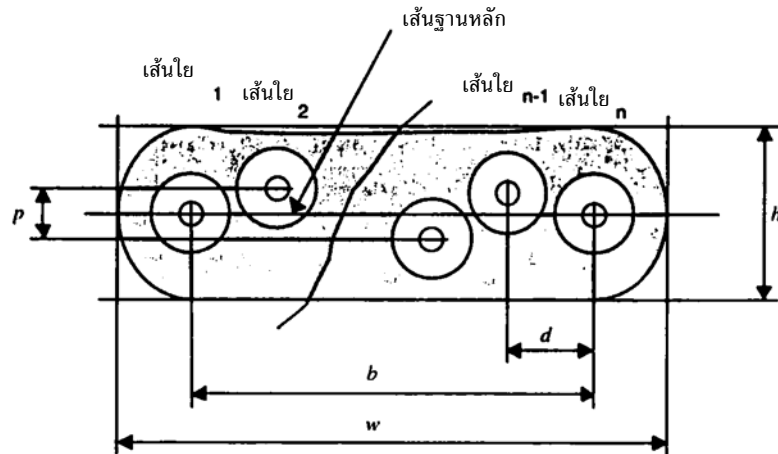
8.2.2.1 การคดงอของท่อ

ให้ใช้ มอก.2051 วิธีทดสอบข้อ G7

8.2.3 การทดสอบแฉบ

8.2.3.1 มิติ

ภาพตัดขวางของเส้นใยนำแสงแบบแฉบ ที่มีมิติของการจัดวางในลักษณะต่าง ๆ ดังรูปที่ 3



เมื่อ

- b ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางกับจุดศูนย์กลางของเส้นใยนำแสงที่อยู่ด้านนอกสุด
- d ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางกับจุดศูนย์กลางของเส้นใยนำแสงที่อยู่ติดกัน
- h ความสูงของแถบ
- p ความเรียบของโครงสร้างแถบ
- w ความกว้างของแถบ

รูปที่ 3 ภาพตัดขวางทางเรขาคณิตของเส้นใยนำแสงแบบแถบ
(ข้อ 8.2.3.1)

หากไม่มีการระบุไว้ในรายละเอียดของข้อกำหนดระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ ให้ใช้มิติสูงสุดตามโครงสร้างทางเรขาคณิตของเส้นใยนำแสงแบบแถบ เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มิติสูงสุดของเส้นใยนำแสงแบบแถบ
(ข้อ 8.2.3.1)

หน่วยเป็นไมโครเมตร

จำนวน เส้นใย นำแสง	ความกว้าง <i>w</i>	ความสูง <i>h</i>	การจัดวางเส้นใยแก้วนำแสง		
			การจัดตามแนวนอน		ความเรียบ <i>p</i>
			เส้นใยนำแสง ที่อยู่ติดกัน <i>d</i>	เส้นใยนำแสง ที่อยู่นอกสุด <i>b</i>	
2	700	480	280	280	–
4	1 220	480	281	835	50
6	1 770	480	282	1 385	50
8	2 300	480	283	1 920	50*
10	2 850	480	284	2 450	50*
12	3 400	480	285	2 980	75*
24	6 800	480	286	ต่อหน่วย**	75**
* ค่าที่กำหนดไว้ชั่วคราว					
** ค่าต่อหน่วยซึ่งวัดจากแถบเส้นใยนำแสงที่ได้จัดแยกออกมา					

ผู้ใช้และผู้ทำอาจตกลงเพิ่มเติมกันเอง เพื่อสร้างข้อกำหนดที่เข้มงวดกว่านี้ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการหรือเทคนิคที่ใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง

มิติและโครงสร้างทางเรขาคณิตสามารถตรวจสอบได้ตาม มอก.2051 วิธี G2 เพื่อสร้างกระบวนการผลิตที่ได้รับการควบคุมอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยขนาดความกว้างและความสูงของแถบสามารถควบคุมและตรวจสอบครั้งสุดท้ายได้ด้วยเครื่องวัดแบบช่อง (aperture gauge) ตาม มอก.2051 วิธี G3 หรือใช้เครื่องวัดแบบหน้าปัด (dial gauge) ตาม มอก. 2051 วิธี G4 หรือวัดด้วยวิธีตรวจพินิจด้วยสายตา

8.2.3.2 ข้อกำหนดทางกล

8.2.3.2.1 สภาพแยกได้ของเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นออกจากแถบ

หากมีการกำหนดให้เส้นใยนำแสงสามารถแยกออกจากกันได้ แถบเส้นใยนำแสงต้องออกแบบให้มีการสร้างที่สามารถแยกออกจากแถบเป็นกลุ่มย่อย หรือเป็นเส้นใยนำแสงเดี่ยวได้ ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

- การทดสอบความสามารถในการแยกเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นออกจากแถบ ใช้วิธีทดสอบการฉีก (การทำให้แยกออกจากกัน) ตาม มอก. 2051 วิธี G5 หรือใช้วิธีที่เป็นข้อตกลงระหว่างผู้ทำกับผู้รับ

- การแยกต้องทำได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์พิเศษ
- การแยกต้องไม่ทำให้เส้นใยนำแสงเสียสภาพการนำแสง และสมบัติทางกลอย่างถาวร
- สี่ที่ใช้ระบุเส้นใยนำแสงต้องไม่เปลี่ยนแปลงและมีสภาพดี สามารถแสดงความแตกต่างของเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นได้

8.2.3.2.2 การปกกแถบ

วัสดุที่ใช้เคลือบเส้นใยนำแสงแต่ละเส้น และสารที่ใช้ในการประสานแถบ ต้องปกกออกได้โดยง่าย วิธีการปกกนี้ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ทำกับผู้ใช้อหรือตามที่แสดงไว้ในรายละเอียดของข้อกำหนด

8.2.3.2.3 การบิด

การทดสอบสมบัติทางกลและการเป็นหนึ่งเดียวของเส้นใยนำแสงแบบแถบ ใช้วิธีทดสอบการบิดที่แสดงไว้ใน มอก. 2051 วิธี G6

8.2.3.2.4 ในกรณีที่ต้องการทดสอบสมบัติทางกลเพิ่มเติมนอกเหนือจากที่ระบุไว้ในข้อกำหนดนี้ หรือที่กำหนดไว้ใน IEC 60793 และ IEC 60794 ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ทำกับผู้ใช้

8.2.3.3 ข้อกำหนดสภาพแวดล้อม

8.2.3.3.1 การแช่น้ำ

อยู่ระหว่างการพิจารณา

8.2.3.3.2 ในกรณีที่ต้องการให้มีข้อกำหนดสภาพแวดล้อมอื่น ให้เป็นไปตามข้อตกลง ระหว่างผู้ทำกับผู้ใช้

9. การทดสอบเคเบิลเส้นใยนำแสง

ค่าตัวแปรเสริมที่กำหนดไว้ในมาตรฐานนี้ อาจเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากความไม่แน่นอนในการวัด ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัด หรือความคลาดเคลื่อนในการสอบเทียบเครื่องมือวัดเนื่องจากการขาดมาตรฐานที่เหมาะสม เงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาและยอมรับได้ในส่วนของความเที่ยงตรงของการวัดค่าการลดทอนสัญญาณตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ต้องมีความผิดพลาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 เดซิเบล

หากมีข้อความปรากฏให้เห็นว่า “ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการลดทอนสัญญาณ” (no change in attenuation) ให้ความหมายว่าไม่ต้องสนใจค่าการลดทอนสัญญาณที่วัดได้ หากค่าที่ได้มีความแตกต่างไปจากเดิมไม่ว่าจะเป็นค่าบวก หรือค่าลบเนื่องมาจากความไม่แน่นอนในการวัด

จำนวนของเส้นใยนำแสงที่ทดสอบ ซึ่งเป็นจำนวนที่ตกลงกันไว้ระหว่างผู้ทำกับผู้ใช้ให้ถือเป็นตัวแทนในการทดสอบเคเบิลชนิดนั้น ๆ

สำหรับการทดสอบกับเคเบิลรูปเลข 8 การทดสอบจะต้องกระทำกับเคเบิลที่มีสายสะพานรวมอยู่ด้วย เว้นแต่จะมีข้อกำหนดเฉพาะเกี่ยวกับการติดตั้ง เคเบิลรูปเลข 8 อาจทดสอบโดยไม่มีสายสะพานได้

9.1 สมรรถนะต่อแรงดึง (tensile performance)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E1

9.2 ความสามารถในการติดตั้ง (installation capability)

เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการติดตั้งที่จำเพาะ การทดสอบอาจเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่ง ดังต่อไปนี้

9.2.1 การโค้งงอภายใต้การดึง (bending under tension)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E13

9.2.2 การโค้งงอซ้ำ (repeated bending)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E6

9.2.3 การกระแทก (impact)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E4

9.2.4 การคดงอ (kink)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม IEC 90794 วิธี E10 โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดของการทดสอบขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ผลิต

9.2.5 การบิด (torsion)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม IEC 60749-1-2 วิธี E7

9.2.6 แรงดันน้ำ (hydrostatic pressure)

การทดสอบเคเบิลสำหรับการผ่านทะเลสาบและแม่น้ำให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี F10

9.2.7 สมรรถนะการม้วน (coiling performance)

การทดสอบเคเบิลสำหรับการผ่านทะเลสาบและแม่น้ำให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E20

9.2.8 การทนต่อการขีดข่วนของเปลือก (sheath abrasion resistance)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E2A

9.3 การโค้งงอของเคเบิล (cable bend)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธีที่ 1 ใน E11

9.4 การบีบอัด (crush)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E3

9.5 วัฏจักรอุณหภูมิ (temperature cycling)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม IEC 6079-1-2 วิธี F1

9.6 การเร่งอายุ (ageing)

9.6.1 การเข้ากันได้ของการเคลือบเส้นใย (fibre coating compatibility)

เมื่อเส้นใยนำแสงสัมผัสกับวัสดุกันน้ำที่เป็นสารเติมเต็ม สารที่เคลือบผิวเส้นใยนำแสงต้องสามารถเข้ากันได้กับวัสดุกันน้ำ โดยการทดสอบหลังจากการเร่งอายุเส้นใยนำแสงในเคเบิลหรือเส้นใยนำแสงในวัสดุกันน้ำอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อแสดงว่าแรงกระทำที่ใช้ในการปกสารเคลือบผิวเส้นใยนำแสง ต้องมีค่าคงที่ตามการทดสอบ โดยวิธี E5 ของ มอก.2051-2543 นอกจากนี้ ในกรณีที่มีการกำหนดไว้ ต้องมีการทดสอบเพื่อแสดงว่า

- มิติตามโครงสร้างของเส้นใยแก้วและโครงสร้างอื่นๆ มีค่าคงที่
- สารเคลือบผิวเส้นใยแก้วนำแสง มีความสามารถในการส่งผ่านสัญญาณแสง (ซึ่งวิธีการทดสอบอยู่ระหว่างการพิจารณา)

9.6.2 เคเบิลสำเร็จรูป (finished cable)

ยังไม่กำหนด

9.7 การซึมผ่านของน้ำ (เฉพาะเคเบิลที่ใส่วัสดุกันน้ำ)

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี F5B

การทดสอบด้วยวิธีทดสอบตามเงื่อนไขอื่น อาจนำมาใช้ได้ เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ใช้

สำหรับวิธีทดสอบเคเบิลที่ใช้ผ่านทะเลสาบและแม่น้ำ อยู่ระหว่างการพิจารณา

9.8 การทนต่อแรงอัดอากาศ (สำหรับสายเคเบิลที่ไม่ใส่วัสดุเติมเต็มกันน้ำเท่านั้น)

สำหรับเคเบิลที่ไม่ใส่ตัวเติมและมีโครงสร้างสำหรับป้องกันแรงอัดจากอากาศ การทดสอบการทนต่อแรงอัดอากาศของเคเบิลใช้ มอก. 2051 วิธี F8

9.9 การทดสอบฟ้าผ่า (สำหรับเคเบิลที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ)

หากมีการระบุไว้ในข้อกำหนด สมบัติของเคเบิลที่โดนฟ้าผ่าต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของ ITU-T ตามเอกสารแนะนำ K.25 หรือตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ทำ

9.10 เงื่อนไขพิเศษของการติดตั้งเคเบิลในอากาศ

เงื่อนไขในการประเมินสมบัติที่เหมาะสมของเคเบิลที่ต้องการติดตั้งในอากาศด้วยวิธีพิเศษ ให้เป็นไปตามรายละเอียดในการทดสอบต่อไปนี้ (เงื่อนไขนี้ ไม่สามารถใช้ได้กับการทดสอบเคเบิลที่ติดตั้งผ่านทะเลสาบและแม่น้ำ)

9.10.1 การสั่นสะเทือนจากแรงลมปะทะ (aeolian vibration)

ให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 วิธี E19

9.10.2 การทนต่อกระสุนปืน

ให้ปฏิบัติตาม มอก. 2051 ใช้วิธี E13

10. การประกันคุณภาพ

การรับรองรายละเอียดต่างๆ ที่ระบุไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ให้เป็นไปตามวิธีทดสอบตามที่กำหนดไว้ในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกันของ IEC 60794 อนึ่ง ในการทดสอบสมบัติทั้งหมด ไม่จำเป็นต้องกระทำกับทุกความยาว (ล้อ) ของเคเบิล จำนวนครั้งของการทดสอบให้ขึ้นอยู่กับข้อตกลง ระหว่างผู้ทำกับผู้ใช้

ผู้ทำต้องเป็นผู้รับผิดชอบในการจัดให้มีการประกันคุณภาพโดยวิธีควบคุมคุณภาพ เพื่อให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการให้มีการทดสอบเฉพาะด้วยวิธีการอื่นต้องระบุไว้ในข้อตกลงให้ชัดเจนเป็นข้อสำคัญในระหว่างการสั่งซื้อระหว่างผู้ซื้อกับผู้ทำ

ภาคผนวก ก.

คำแนะนำเกี่ยวกับข้อกำหนดทางสถิติ PMD ของเคเบิลใยนำแสง

ก.1 บทนำ

PMD (polarization mode dispersion) หรือ การกระจายของค่าโหมดโพลาไรซ์เป็นค่าทางสถิติที่เกิดจากการสุมตัวอย่างแบบอนุกรม โดยมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณเป็นแบบสุมตามเวลาและค่าความยาวคลื่น การเปลี่ยนแปลงค่า PMD ในเคเบิลใยนำแสงสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบแมกซ์เวล (Maxwell probability density function) ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ PMD (PMD coefficient) ซึ่งหมายถึงค่า PMD เฉลี่ยที่วัดได้ในช่วงของแถบความยาวคลื่นหารด้วยรากที่สองของความยาวเส้นใย (สำหรับเส้นใยที่เกิดการส่งผ่านระหว่างโหมดหรือ mode coupled fibre)

ค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันด้วยเคเบิลหลายเส้นที่มีความยาวเท่ากัน คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยที่เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลทุกเส้นที่ประกอบกันขึ้นเป็นเคเบิลต่อเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลแต่ละส่วน (ล๊อ) มีลักษณะการกระจายเป็นแบบสุม ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อมีการกระจายเป็นแบบสุมด้วย อย่างไรก็ตาม การแจกแจงฟังก์ชันที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ จะมีค่าการแจกแจงน้อยกว่าค่าการแจกแจงของเคเบิลแต่ละส่วน อันเป็นผลมาจากค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเมื่อเชื่อมต่อกันเป็นเคเบิลต่อ

วิธีที่ 1 เป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของเคเบิลต่อ ด้วยการกำหนดค่า PMD ไว้ในการออกแบบ ค่าดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้คำนวณค่าขอบเขตสูงสุดทางสถิติของค่า PMD ของเคเบิลต่อที่ประกอบขึ้นด้วยเคเบิลอย่างน้อย 20 เส้น ค่าขอบเขตสูงสุดนี้แสดงถึงค่าสูงสุดของ PMD ที่มีความเป็นไปได้จริงในระบบได้ดีกว่าค่า PMD ที่ได้จากการณืที่แย่มากที่สุด

เนื่องจากวิธีที่ 1 แสดงถึงค่าขอบเขตสูงสุดทางสถิติของค่า PMD ของเคเบิลต่อ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการวัดค่า PMD ที่ยอมรับได้สำหรับเคเบิลที่ติดตั้ง เพื่อตรวจสอบว่าค่าที่ได้ยังคงอยู่ภายในขอบเขตของค่าสูงสุดที่ทางผู้ทำได้กำหนดไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าขอบเขตสูงสุดนี้สามารถนำไปคำนวณหาผลกระทบของระบบที่มีต่อสมบัติการทำงานของ การสื่อสารข้อมูลทั่วไปได้

วิธีที่ 2 ทำการรวมค่าฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) ของค่า PMD ของเคเบิลต่อกับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwell Probability density function) เพื่อคำนวณหาค่าโดยประมาณของค่าความน่าจะเป็น ที่ค่า PMD ของเส้นใยที่เกิดจากความยาวคลื่นที่กำหนดจะมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ การคำนวณนี้จะใช้กับระบบที่มีความยาว 400 กิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วยเคเบิล 40 เส้น

รายละเอียดทั่วไปสำหรับวิธีทดสอบทั้งสองวิธี แสดงไว้ในข้อย่อ ก.5.1 โดยที่ข้อย่อ ก.5.2 อธิบายรายละเอียดที่ใช้ในวิธีที่ 1 ข้อย่อ ก.5.3 อธิบายรายละเอียดที่ใช้ในวิธีที่ 2 และข้อย่อ ก.5.4 แสดงแนวทางในการนำผลที่ได้จากวิธีที่ 1 ไปใช้ในการออกแบบระบบแบบดิจิทัล

ภาคผนวกนี้แสดงนิยามสำหรับการคำนวณค่าทางสถิติที่เป็นข้อกำหนดของ PMD ในเคเบิลเส้นใยนำแสง

ก.2 เครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่า PMD ในเคเบิลแต่ละเส้น เป็นไปตามข้อกำหนด IEC 61941

ก.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การเตรียมส่วนของเคเบิลเพื่อการวัดและทดสอบ ให้เป็นไปตามข้อกำหนด IEC 61941

ก.4 วิธีทดสอบ

กระบวนการทดสอบที่สมบูรณ์เพื่อวัดค่า PMD ใช้วิธีการทดสอบตามที่ระบุไว้ในข้อกำหนด IEC 61941

ก.5 การคำนวณ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ PMD ในเคเบิลแต่ละเส้น ใช้วิธีการคำนวณตามที่กำหนดไว้ใน IEC 61941 เมื่อวัดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นของเคเบิลแล้ว ให้ใช้วิธีการคำนวณในข้อย่อต่อไปนี้ เพื่อหาค่าที่ต้องการตามข้อกำหนดของมาตรฐานนี้ ในการคำนวณสมบัติโดยรวมของระบบ ให้ใช้วิธีการที่ระบุไว้ใน IEC 61282-3 เพื่อพิจารณาข้อกำหนดของเคเบิลร่วมกับค่าอื่น ๆ ที่ได้จากอุปกรณ์เชิงแสงที่อาจมีขึ้น ในระบบ

ก.5.1 เคเบิลต่อที่ประกอบด้วยเคเบิลแต่ละส่วนต่อกัน

หลักการทั่วไปของวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อทั้งสองวิธีที่กล่าวถึงในมาตรฐานอุตสาหกรรมฉบับนี้ คือการคำนวณหารากกำลังสองเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ PMD มีหน่วยเป็นพิโกวินาทีต่อรากที่สองกิโลเมตร ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$) ในเคเบิลแต่ละเส้นที่มีความยาวเท่ากันและเชื่อมต่อกันเป็นเคเบิลต่อ โดยกำหนดให้

- i เป็นจำนวนนับมีค่าสูงสุดเท่ากับ M เมื่อ M เป็นจำนวนเคเบิลทั้งหมดที่นำมาต่อเป็นเคเบิลต่อ
- x_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของสายเคเบิลเส้นที่ i ที่ประกอบเป็นเคเบิลต่อ ค่าสัมประสิทธิ์ PMD นี้ หน่วยเป็นพิโกวินาทีต่อรากที่สองกิโลเมตร ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)
- l_i เป็นความยาวของเส้นใยนำแสงในเคเบิลเส้นที่ i
- X_M เป็นค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ หน่วยเป็นพิโกวินาทีต่อรากที่สองกิโลเมตร ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของเคเบิล จำนวน M เส้น ทำได้ด้วยสมการ

$$X_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M x_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^M l_i}} \quad (1)$$

สำหรับเคเบิลต่อนี้เกิดจากการเชื่อมต่อกันของเคเบิลที่มีความยาวเท่ากันทุกเส้น กล่าวคือ $l_i = l_c$ เมื่อ l_c เป็นค่าคงที่ สมการที่ (1) จะสามารถลดรูปได้เป็น

$$X_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M x_i^2}{M}} \quad (2)$$

เนื่องจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของสายเคเบิลเชื่อมโยงเป็นค่าเฉลี่ย ค่าที่ได้จึงมีค่าความผันแปรน้อยกว่าค่าความผันแปรที่เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของสายเคเบิลแต่ละส่วน (x_i)

ก.5.2 วิธีที่ 1 : ค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ (PMD design value)

ก.5.2.1 การหาค่าการแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distribution) ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ

สมการที่ (2) แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ สามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลแต่ละเส้น (x_i) ที่ประกอบกันขึ้นเป็นเคเบิลต่อ ค่าการแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distribution) ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ ขึ้นอยู่กับการแจกแจงของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลและจำนวนของเคเบิลที่ประกอบกันขึ้นเป็นเคเบิลต่อ

วิธีการที่ใช้ในการประมาณการแจกแจงของค่าสัมประสิทธิ์ PMD มี 3 วิธี โดยแบ่งเป็นวิธีการประมาณเชิงตัวเลขด้วยการคำนวณ 1 วิธี (วิธี (ก)) และวิธีการประมาณเชิงวิเคราะห์อีก 2 วิธี (วิธี (ข) และวิธี (ค)) โดยวิธีการประมาณเชิงวิเคราะห์ในส่วนของวิธี (ข) ใช้การสมมติค่าฟังก์ชันเชิงวิเคราะห์แบบเจาะจง (specific analytic function) สำหรับการแจกแจงค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลในขณะที่วิธี (ค) จะไม่มีการสมมติค่าดังกล่าว แต่จะอ้างถึงส่วนขยายของทฤษฎีบทค่าจำกัดสู่ส่วนกลาง (central limit theorem) แทน

(ก) วิธีคำนวณแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo) [1]

วิธีการแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo) สามารถใช้หาค่าความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density) f_{link} ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อที่เกิดจากเคเบิลหลายเส้นเชื่อมต่อกัน โดยไม่ต้องทำการสมมติรูปแบบฟังก์ชัน (functional form) วิธีการนี้จะจำลองกระบวนการสร้างเคเบิลต่อ โดยการสุ่มหาค่าจากเคเบิลที่วัดค่าแล้วเป็นจำนวนหลาย ๆ ครั้ง ค่าสัมประสิทธิ์ PMD จะวัดเป็นจำนวนที่มากพอที่จะแสดงลักษณะที่เป็นมูลเหตุของการแจกแจงข้อมูลที่ได้นี้จะนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเส้นใยแต่ละเส้นที่เชื่อมต่อกันเป็นเคเบิลต่อ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ ทำโดยการสุ่มเลือกค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลที่วัดได้ทั้งหมดออกมาเป็นจำนวนเท่ากับ M ค่า แล้วแทนค่าดังกล่าวเข้าไปในสมการที่ (2) เพื่อหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ย จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อที่คำนวณได้จะนำมาบรรจุไว้ในตารางหรือในรูปแบบของฮิสโทแกรม (histogram) ที่ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างเคเบิลอื่น ๆ กระบวนการนี้จะดำเนินการซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งได้ค่าที่มีจำนวนมากพอที่จะสร้างฮิสโทแกรมจากการแจกแจงค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อที่มีความหนาแน่นสูง ($0.001 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$)

จากทฤษฎีบทค่าจำกัดสู่ส่วนกลาง (central limit theorem) ฮิสโทแกรมของค่าสัมประสิทธิ์ PMD จากเคเบิลต่อ มีแนวโน้มที่จะบรรจบกัน (converge) กับค่าการแจกแจงที่สามารถอธิบายได้ด้วยค่าตัวแปรเสริมที่น้อยที่สุดสองตัว ด้วยเหตุนี้ฮิสโทแกรมจึงมีความสอดคล้องกับสมการอิงตัวแปรเสริม (parametric equation) ที่แสดงระดับความน่าจะเป็น ที่มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง โดยค่าตัวแปรเสริมทั้งสองจะแสดงค่าการแจกแจงของค่ากลาง และค่าการเปลี่ยนแปลงรอบ ๆ ค่ากลาง การเลือกค่าการแจกแจงความน่าจะเป็นจะสัมพันธ์กับรูปร่างของฮิสโทแกรม โดยทั่วไปค่าการแจกแจงควรจะรวมค่าของลอการิทึม (ในกรณี ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ จะเป็นลักษณะเกาส์เซียน (Gaussian) หรือรูประฆังคว่ำ) หรือค่าที่ได้มาจากการแจกแจงแบบแกมมา (Gamma distribution)

(ข) วิเคราะห์การแจกแจงแบบแกมมา (Gamma distribution) [2]

การแจกแจงแบบแกมมา สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ PMD ที่วัดได้จากเคเบิลแต่ละเส้นและจากเคเบิลต่อที่เชื่อมต่อกัน ถ้ากำหนดให้ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ที่วัดได้จากเคเบิลยกกำลังสองหรือค่า x_i มีการแจกแจงแบบตัวแปรสุ่มแกมมา (gamma random variable) ค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density) ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลจะหาได้จาก

$$f_{\text{cable}}(x, \alpha, \beta) = \frac{2\beta^\alpha x^{2\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-bx^2) \quad (3)$$

เมื่อ

x คือ ค่าสัมประสิทธิ์ PMD ที่เป็นไปได้ของสายเคเบิล

$\Gamma(\alpha)$ คือ ฟังก์ชันแกมมา (Gamma Function) โดยที่

α และ β เป็นตัวแปรที่ใช้ควบคุมรูปร่างของค่าความหนาแน่น

เทคนิคการหาแนวเส้นกราฟที่มีลักษณะความโค้งเหมาะสมของสมการที่ (3) กับกลุ่มข้อมูลค่า PMD ของเคเบิลที่วัดได้จากเทคนิคการวัดมาตรฐานทั่วไป เช่น วิธีหาค่าสูงสุดที่ควรจะเป็น (maximum likelihood) สามารถใช้ หาค่าของ α และ β ที่เหมาะสมได้

ค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density) ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD (X_M) ของเคเบิลต่อที่ประกอบด้วยสายเคเบิลจำนวน M เส้นเชื่อมต่อกัน จะมีรูปแบบในทำนองเดียวกับสมการที่ (3) โดยการแทนที่ α และ β ด้วย $M\alpha$ และ $M\beta$ ดังนี้

$$f_{link}(X_M; M, \alpha, \beta) = \frac{2(M\beta)^{M\alpha} X_M^{2M\alpha-1}}{\Gamma(M\alpha)} \exp(-M\beta X_M) \quad (4)$$

โดยที่ค่าของ α และ β เป็นค่าที่ได้จากเทคนิคการหาแนวเส้นกราฟที่มีลักษณะความโค้งเหมาะสมของสมการที่ (3) กับกลุ่มข้อมูลของค่า PMD ของเคเบิลที่วัดได้

(ค) วิธีวิเคราะห์จากแบบจำลองอิสระ (Model – independent analytic method) [2]

วิธีที่จะนำเสนอในข้อนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากกว่าวิธี (ข) เนื่องจากวิธีนี้ไม่ต้องมีการตั้งสมมติฐานเพื่อหารูปแบบของฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) สำหรับอธิบายค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลเส้นใยที่วัดได้

หลังจากวัดค่าสัมประสิทธิ์ PMD (x_i) ของเคเบิลเส้นใยแก้วเป็นจำนวน N เส้นแล้ว ให้คำนวณหาค่าเฉลี่ย (mean) ค่าความแปรปรวน (variance) และ ค่าโมเมนต์ที่สาม ของค่ากำลังสอง (third moment of their square) จากสมการต่อไปนี้

$$\mu_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad \mu_2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - \mu_1)^2, \quad \mu_3 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - \mu_1)^3 \quad (5)$$

จากทฤษฎีบทค่าจำกัดสู่ส่วนกลางในเอกสารอ้างอิง [3] เมื่อกำหนด ให้ X_M เป็นค่าตัวแปรที่สุ่มมาจากกลุ่มข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของสายเคเบิลที่เกิดจาก เคเบิลจำนวน M เส้นประกอบกันเป็นเคเบิลต่อ และกำหนดให้ u เป็นค่าที่เป็นไปได้ของ X_M ค่าการแจกแจงของสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อจะประมาณได้ด้วย

$$F_{link}(u; M) = \phi(z(u)) + tM^{-1/2}(1-z(u)^2) \phi(z(u)) \quad (6)$$

เมื่อ

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad \phi(z) = \int_{-\infty}^z \mu(y) dy$$

และ

$$z(u) = \frac{(u^2 - \mu_1)}{\sqrt{\mu_2}} \quad t = \frac{\mu_3}{6\mu_2^{3/2}}$$

สำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function) ของสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อโดยประมาณ หาได้จากการหาค่าอนุพันธ์เทียบกับค่า u ในสมการที่ (6)

ก.5.2.2 การหาค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ ที่หาได้ด้วยวิธีการที่อธิบายไว้ในข้อ ก.5.2.1 สามารถนำไปคำนวณหาค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบได้ สำหรับเคเบิลต่อที่ประกอบด้วยเคเบิลจำนวน M เส้น ค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ (PMD_Q) คือค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ (X_M) ที่มีค่ามากกว่าค่าความน่าจะเป็น Q กล่าวคือ

$$P\{X_M > PMD_Q\} = Q \quad (7ก)$$

ในกรณีของค่า $N > M$ ค่าความน่าจะเป็นที่ X_N มีค่ามากกว่าค่า PMD_Q จะมีค่าน้อยกว่า Q กล่าวคือ

$$P\{X_N > PMD_Q\} < Q \quad (7ข)$$

ตัวอย่างเช่น หากสมมติให้ $N > 20$ (เคเบิลต่อประกอบด้วยเคเบิลไม่น้อยกว่า 20 เส้น) และให้ $Q = 10^{-4}$ ค่าความน่าจะเป็นที่ค่า PMD ของเคเบิลต่อมีค่ามากกว่าค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ จะมีค่าน้อยกว่า 0.0001 อย่างไรก็ตาม ผู้ซื้อและผู้ขายควรมีความเห็นตรงกันในการกำหนดค่าของ M และ Q ขึ้นมา รายละเอียดที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ แสดงวิธีการหาค่า PMD_Q โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของค่า PMD ของเคเบิลที่ได้จากวิธีการ (ค)

ก.5.2.2.1 การหาค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบจากการคำนวณมอนติคาร์โลตามวิธี (ก)

วิธีคำนวณเชิงตัวเลขที่ใช้เพื่อกำหนดระดับความน่าจะเป็น $Q = 10^{-4}$ ต้องใช้การจำลองแบบมอนติคาร์โลกับข้อมูลเคเบิลที่สุ่มขึ้นมาที่มีจำนวนมากกว่า 10^4 ตัวอย่าง ซึ่งต้องใช้เวลาในการทำงานพอสมควร โดยเริ่มจากการสร้างฮิสโทแกรมของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ จากนั้นสร้างแนวทางเดินของเส้นกราฟ (fit curve) ด้วยสมการอ้างอิงตัวแปรเสริม (parametric equation) บนพื้นฐานของรูปร่างฮิสโทแกรมแนวเส้นกราฟที่ได้นี้จะแสดงค่าการแจกแจงของฟังก์ชันความน่าจะเป็น โดยทั่วไปค่าการแจกแจงของเส้นกราฟควรมีลักษณะสอดคล้องกับการแจกแจงแบบแกมมา (gamma distribution) หรือเมื่อคิดจากค่าลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ควรมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ (gaussian) ค่าของ PMD_Q ในช่วงของค่า Q_{th} ที่ต้องการ สามารถหาได้จากกราฟการแจกแจง นี้

ก.5.2.2.2 การหาค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบจากการแจกแจงแกมมาตามวิธี (ข)

ค่าการประมาณของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของสายเคเบิลต่อ (X_Q) ที่ประกอบด้วยเคเบิล จำนวน M เส้น ที่ค่า $Q = 10^{-4}$ หาได้จากสมการ

$$X_Q = \frac{2.004 + 0.975 \sqrt{M\alpha}}{\sqrt{M\beta}} \quad (8)$$

เมื่อค่า α และ β หาได้จากวิธีการ (ข) ในกรณีที่ $N > M = 20$ (จำนวนเคเบิล) ค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบจะมีค่าเป็น

$$PMD_Q = \frac{0.448 + 0.975 \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\beta}} \quad (9)$$

จากการสุ่มตัวอย่างข้อมูลของเคเบิลจำนวน 288 ตัวอย่างดังที่กล่าวไว้ในรายงานตามเอกสารอ้างอิง [4] จะได้ค่า $\alpha = 0.979$, $\beta = 48.6$ และ $PMD_Q = 0.20 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$

ก.5.2.2.3 การหาค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ โดยใช้วิธี (ค)

วิธีการคำนวณที่แสดงในวิธี (ค) สามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิล ต่อ (X_Q) ของเคเบิลต่อที่ประกอบขึ้นด้วยเคเบิลจำนวน M เส้น โดยค่าของ X_Q ที่มีค่า Q ตามต้องการ หาได้จากสมการ

$$X_Q \approx \left[\mu_1 + z_Q \left(\frac{\mu^2}{M} \right)^{1/2} + \frac{\mu_3}{6\mu_2 M} (z_Q^2 - 1) \right]^{1/2} \quad (10)$$

เมื่อ z_Q คือควอไทล์ (Quartile) ลำดับที่ Q ของการแจกแจงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard normal distribution) ในกรณีที่ $N > M = 20$ (จำนวนเคเบิล) และกำหนดค่า $Q = 10^{-4}$, $z_Q = 3.72$ ค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ จะมีค่าเป็น

$$PMD_Q \approx \left[\mu_1 + 0.830 \sqrt{\mu_2} + 0.107 \frac{\mu_3}{\mu_2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

จากการสุ่มตัวอย่างข้อมูลของเคเบิลเส้นใยนำแสงจำนวน 288 ตัวอย่างดังที่กล่าวไว้ในรายงานตามเอกสารอ้างอิง [4] เมื่อ

$$\mu_1 = 2.02 \times 10^{-2}, \quad \mu_2 = 7.43 \times 10^{-4}, \quad \mu_3 = 8.26 \times 10^{-5}$$

ค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ เมื่อคำนวณจากสมการที่ (11) จะมีค่าเป็น $PMD_Q = 0.23$ พิโกวินาทีต่อรากที่สองของกิโลเมตร

ก.5.3 วิธีการที่ 2 : ค่า DGD สูงสุด

ก.5.3.1 การรวมค่าตัวแปรจากเส้นทางและฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบแมกซ์เวลล์

ค่า DGD (I) (มีหน่วยเป็น $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$) จะเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มไปตามเวลาและค่าความยาวคลื่น ตามฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwell probability density function):

$$f_M(I; X_M) = 2 \left(\frac{4}{\pi X_M^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{I^2}{\Gamma(3/2)} \exp \left[-\frac{4}{\pi} \left(\frac{I}{X_M} \right)^2 \right] \quad (12)$$

เมื่อ X_M เป็นค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของสายเคเบิลเชื่อมโยงที่ประกอบขึ้นจากสายเคเบิลจำนวน M เส้น ตามสมการที่ (1) หรือ (2)

ในการที่จะรวมการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อการเปลี่ยนแปลงแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwell variation) ให้เป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบระบบ ต้องทำ การกำหนดเคเบิลต่ออ้างอิงขึ้นมาเสียก่อน ข้อมูลที่ได้จากเคเบิลต่ออ้างอิง จะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเคเบิลต่ออื่นๆ เคเบิลต่ออ้างอิงจะกำหนดด้วยตัวแปรเสริม 2 ตัว คือ (1) ความยาวของเคเบิลต่อทั้งหมด (LR) และ (2) ความยาวของเคเบิลแต่ละล๊อต (l_c) ซึ่งมักจะสมมติให้มีค่าคงที่สำหรับเคเบิลในทุกๆ ล๊อต

ค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อจะมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแต่ละระวิงเนื่องจากเป็นค่าเฉลี่ย สถิติการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของค่าที่วัดได้ในเคเบิลแต่ละระวิงที่ทำการสุ่มมาจากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด สามารถนำมาใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ในเคเบิลต่อได้ ถ้าความยาวของเคเบิลแต่ละระวิงที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในเคเบิลต่ออ้างอิง แต่ถ้าจำนวนของระวิง (n_R) มีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ตามสมการที่ (2) นั่นคือ ค่าความน่าจะเป็นที่จะมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนด จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้เมื่อค่าความยาวของเคเบิลแต่ละระวิงที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า l_c

หากกำหนดให้ $f_{\text{link}}(X_i)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (ฮิสโทแกรม) ของค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ ที่หามาจากการวิเคราะห์การแจกแจงค่าสัมประสิทธิ์ PMD ที่วัดได้ประกอบการคำนวณตามสมการที่ (2) และให้ I เป็นค่า PMD (มีหน่วยเป็น $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$) ที่ต้องใช้ในการออกแบบระบบ ค่าความน่าจะเป็น P_F ของโอกาสที่จะมีค่ามากกว่าค่า I คือ

$$P_F = \sum_i f_{\text{link}}(X_i) \left[1 - \int_0^I f_M(y; X_i) dy \right] \quad (13)$$

ค่าการแจกแจงของค่า PMD จากปลายถึงปลายของเคเบิลต่อหรือค่า I_{tot} (มีหน่วยเป็น ps) คือค่าผลคูณของรากที่สองของความยาวเคเบิลต่ออ้างอิงกับค่า I :

$$I_{tot} = I \sqrt{L_R} \quad (14)$$

ช่วงเวลาดำเนินการก่อนการเสื่อมสภาพ (risk) หรือค่า T_r (มีหน่วยเป็น min/year/km/circuit) จะสมมติให้เป็นช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มการใช้งานไปจนถึงเวลาที่ค่า PMD ของเส้นใยหรือความยาวคลื่นที่มีจำนวนเท่ากับสองประกอบกันขึ้นเป็นวงจร มีค่ามากกว่าค่า I_{tot} ดังนั้น เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นจากสมการที่ (13) ช่วงเวลาในการเสื่อมสภาพ จะมีค่าเป็น

$$T_r = 2 \times P_F \times 60 \times 24 \times 365 \times 25 / L_R \quad (15)$$

ในกรณีที่ความยาวของเคเบิลต่อ มีค่าน้อยกว่าความยาวสายเคเบิลอ้างอิง จะอนุญาตให้ I_{tot} มีค่าคงที่เท่ากับ 21 ps แต่ถ้าความยาวของเคเบิลต่อมีค่ามากกว่าเคเบิลอ้างอิง ค่าที่ใช้ในการออกแบบควรมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นดังนี้

$$I_{link} = I_{tot} \sqrt{\frac{L_{link}}{L_R}} \quad (16)$$

เมื่อ L_{link} เป็นความยาวของ เคเบิลต่อ ที่มีค่ามากกว่า L_R และ

I_{link} เป็นค่า PMD ของเคเบิลต่อจากปลายถึงปลาย ที่มีค่ามากกว่า I_{tot}

ก.5.3.2 ตัวอย่างการใช้ฟังก์ชันแกมมา (gamma function)

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบแกมมาที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (3) และ (4) สามารถนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลและของเคเบิลต่อได้ตามลำดับ

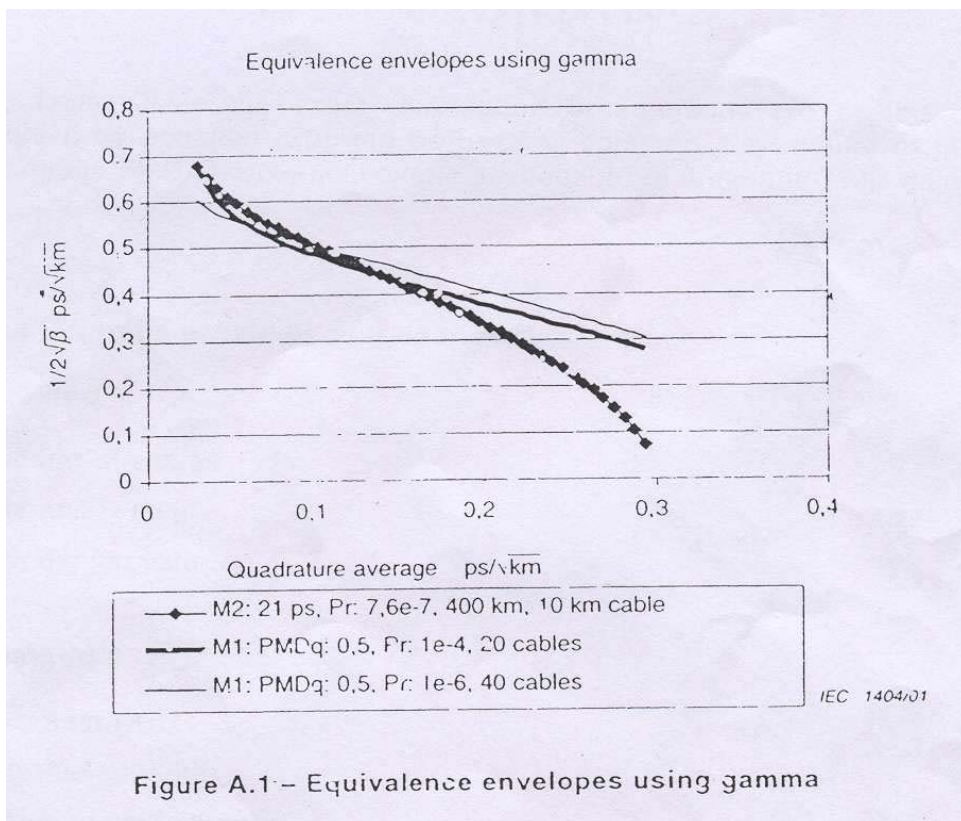
ค่าสัมประสิทธิ์ PMD เฉลี่ย (X_M) ของเคเบิลต่อที่ประกอบด้วยเคเบิลที่มีความยาวเท่ากันจำนวน M เส้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2) และเมื่อต้องการแสดงด้วยฟังก์ชัน ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบแกมมา (gamma density function) ค่าเฉลี่ย (mean) ของสัมประสิทธิ์ PMD ของ เคเบิลต่อ จะมีค่าเป็น

$$E\{X_M\} \cong \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \left(1 - \frac{1}{8M\alpha}\right) \quad (17)$$

ในกรณีที่ $M\alpha$ มีค่าสูงมากเข้าใกล้ค่าอนันต์ ($M\alpha \rightarrow \infty$) สมการที่ (17) มีแนวโน้มที่จะมีค่าลู่เข้าหาค่าของ $\sqrt{\alpha/\beta}$ ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของ X_M มีแนวโน้มที่จะเป็นศูนย์ สำหรับค่า $M\alpha > 5$ ค่าของ X_Q ในช่วง 99.99 % จะสามารถประมาณได้ดังนี้

$$X_Q = 0.975 \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} + \frac{2.004}{\sqrt{M\beta}} \quad (18)$$

ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ PMD ของเคเบิลต่อ ($E\{X_M\}$) (quadrature average) และค่า $2\sqrt{\beta}$ สามารถนำมาใช้ร่วมกันเพื่อพิจารณาหาแนวเส้นกราฟ (envelope) ในเงื่อนไขที่ค่า P_F มีค่าน้อยกว่า 7.6×10^{-7} ในช่วงเวลา 21 พิโกวินาที ของเคเบิลต่อยาว 400 กิโลเมตร ซึ่งประกอบขึ้นจากเคเบิลจำนวน 40 เส้น แต่ละเส้นยาว 10 กิโลเมตร รูปที่ ก.1 แสดงแนวเส้นกราฟรวม (combined envelope) สำหรับค่า P_F ดังกล่าว และสำหรับ $X_Q = 0.5$ พิโกวินาทีต่อรากที่สองของกิโลเมตร เคเบิลที่มีค่าตัวแปรเสริมเหล่านี้ต่ำกว่าแนวเส้นกราฟรวมถือว่าเป็นไปตามข้อกำหนดข้างต้น รูปภาพนี้แสดงให้เห็นถึงความใกล้เคียงกันระหว่างหลักการของวิธีการที่ 1 และ 2



รูปที่ ก.1 แนวเส้นกราฟที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันแกมมา
(ข้อ ก.5.3.2)

ก.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PMD ของเคเบิลต่อที่ได้จากวิธีการที่ 1 กับสมรรถนะของระบบดิจิทัล

ค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ เป็นค่าที่นิยมกำหนดใช้กัน ค่านี้สามารถวัดหาได้ด้วยวิธีการที่ได้แสดงไว้ใน IEC 61941 ดังนั้น วิธีการที่ 1 จึงมักเป็นวิธีที่ถูกอนุโลมให้นำมาใช้ได้ โดยการวัดค่า PMD ของเคเบิลต่อ แล้วนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบโดยผู้ผลิต แม้ว่าหลักการนี้เป็นไปอย่างตรงไปตรงมา แต่ก็อาจเกิดความยุ่งยากขึ้นได้ หากมีการนำความหมายของค่า PMD ที่ยอมรับได้นี้ไปใช้ในการหาสมรรถนะการทำงานของระบบ

ค่า PMD จัดเป็นตัวแปรทางสถิติที่เกิดจากตัวแปรสโตนัสติก (stochastic variable) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบแมกซ์เวล (Maxwell probability density function) โดยค่าเฉลี่ยของมันสามารถหาได้จากวิธีการที่ได้รับการรับรองแล้ว ความพยายามที่จะนำค่า PMD เข้าไปเกี่ยวข้องกับเรื่องของสมรรถนะการทำงานของระบบดิจิทัล จะมุ่งเน้นไปที่การทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่ค่าสูงสุดของข้อมูลค่า PMD มีค่ามากกว่าสัดส่วนของคาบเวลาบิต (bit period) ให้มีค่าน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการแจกแจงแมกซ์เวล (Maxwell distribution) ค่าความน่าจะเป็นที่ค่า PMD จะมีค่ามากกว่า 3 เท่าของค่าเฉลี่ยของมันคือ 4×10^{-5} ยิ่งไปกว่านั้น ในกรณีของการพิจารณาตัวประกอบการเสื่อมสภาพ (risk factor) ค่าความน่าจะเป็นที่ค่า PMD ที่วัดได้ในเส้นทางที่กำหนด จะมีค่ามากกว่าค่า PMD ที่ใช้ในการออกแบบ จะหาได้จากค่าระดับความน่าจะเป็น (Q) ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการตกลงกันเองระหว่าง ผู้ซื้อและผู้ผลิต ในกรณีที่ $Q = 10^{-4}$ ความน่าจะเป็นที่ค่า PMD ของสายเคเบิลเชื่อมโยง มีค่ามากกว่า PMD ที่ได้จากการออกแบบ จะมีค่าน้อยกว่า 10^{-4} ดังนั้น ค่าความน่าจะเป็นที่ค่า PMD ของสายเคเบิลเชื่อมโยงในช่วงที่กำหนด (I) ที่มีความยาว L_{link} จะมีค่ามากกว่า 3 เท่าของค่า PMD ของสายเคเบิลเชื่อมโยงที่ใช้ค่าที่ออกแบบ ซึ่งแสดงได้ด้วยเทอม $P_F\{I > 3 \times PMD_Q \sqrt{L_{link}}\}$ สามารถหาได้จากการคำนวณฟังก์ชันการแจกแจงของเคเบิลต่อ (F_{link}) ประสานกับค่า DGD ของค่าความหนาแน่นแมกซ์เวลเลียน (Maxwellian density) ในช่วงของการเชื่อมโยงดังกล่าว ดังนี้

$$P_F = \int_0^{\infty} (1 - F_{link}) f_{Maxwell} dX_M \quad (19)$$

ค่าขอบเขตสูงสุด (upper bound) ของค่าความน่าจะเป็นแบบแม่นยำตรง (exact probability) ที่ได้จากสมการที่ (19) สำหรับ $Q = 10^{-4}$ จะหาได้จาก

$$P_F = \{1 > 3 \times PMD_Q \sqrt{L}\} \leq 1.4 \times 10^{-4} \quad (20)$$

ค่าความน่าจะเป็นที่หาได้จากสมการที่ (19) หรือจากสมการที่ (20) สามารถนำไปใช้คำนวณช่วงเวลาต่อปีที่ค่า PMD บางค่าของวงจรเส้นใย (optical circuit) จะมีค่ามากกว่า 3 เท่าของค่า PMD ที่ได้จากการออกแบบ

ก.6 ผลลัพธ์

ก.6.1 ข้อมูลที่ต้องจัดหาในการทดสอบแต่ละครั้ง

ก.6.1.1 สำหรับวิธีการที่ 1

- M เป็นจำนวนเคเบิลเส้นใยนำแสง
- Q เป็นระดับความน่าจะเป็น
- PMD_Q เป็นค่า PMD ของเคเบิลต่อที่ได้จากการออกแบบ

ก.6.1.2 สำหรับวิธีการที่ 2

- DGD_{max} เป็นค่า DGD สูงสุด
- LR_{ef} เป็นความยาวอ้างอิง
- LC_{ab} เป็นความยาวเคเบิลที่กำหนด
- P_F เป็นค่าความน่าจะเป็น ที่ค่า DGD มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้

ก.6.2 ข้อมูลที่ต้องจัดหาเมื่อมีการร้องขอ

เทคนิคการคำนวณที่ใช้ และรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณดังกล่าว

ก.7 เอกสารอ้างอิง

- [1] GALLAGHER, D. et al., Simulation of System Length Limitations Induced by PMD, International Wire and Cable Symposium Proceedings, 1996, p. 27–36.
- [2] JACOBS, S. A. et al., Statistical Estimation of the PMD Coefficients of Fiber Paths, National Fiber Optic Engineers Conference, September 1997.
- [3] PATEL. J. and READ. C., Handbook of the Normal Distribution, Marcel Dekker, Inc., New York, 1982.
- [4] JACOBS, S. A. et al., Statistical Estimation of the PMD Coefficients for System Design, Electronics Letters, 1997, 33, p. 619–621.