

PENGARUH BENDING FIBER OPTIK SINGLE CORE PADA SUDUT

Dzakwan zaki, A.R. Walad Mahfuzhi *

Teknik Informatika, Universitas Muhammadiyah Bengkulu
Jalan Bali, Kampung Bali, Kota Bengkulu, Bengkulu, Indonesia
walad@umb.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan infrastruktur jaringan Fiber to The Home (FTTH) di Indonesia semakin masif, namun instalasi kabel serat optik di lapangan sering menghadapi kondisi tekukan (bending) akibat keterbatasan ruang dan jalur pemasangan. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan kehilangan daya optik (bending loss) yang berdampak pada penurunan kualitas transmisi dan layanan internet pelanggan. Studi ini menganalisis efek pembengkokan pada serat optik inti tunggal terhadap redaman sinyal dan kualitas transmisi. Fokus utama adalah mengukur dan membandingkan nilai bending loss serta degradasi throughput akibat variasi sudut tekukan pada tiga merek kabel *precon drop cable*, dengan pengujian pada panjang gelombang 1550 nm. Pendekatan eksperimental dilakukan pada tiga merek kabel (Onolink GJYXCH-1B6A2, Spectra G657A1, Tarmoc TPC-PC-1C3S) menggunakan *Optical Power Meter* dan ONT GPON pada sudut tekukan 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90°. Hasil menunjukkan semua kabel berada dalam kategori kehilangan lentur baik ($\leq 0,5$ dB) sesuai standar ITU-T G.657. Onolink konsisten menghasilkan nilai negatif (-0,08 hingga -0,22 dB) yang mengindikasikan kualitas produksi melebihi spesifikasi baseline. Spectra sensitif pada sudut kecil dengan nilai 0,14 dB pada 15°, menurun hingga -0,07 dB pada 90°. Tarmoc stabil mendekati nol (0,03 dB pada 15°, -0,04 dB pada 90°). Degradasi *throughput* minimal (0,59–1,03%) dengan daya ONT Rx dalam kisaran aman (-28,54 hingga -30 dBm). Terdapat korelasi linier antara kehilangan lentur fisik dan kinerja aplikasi. Temuan ini memberikan rekomendasi praktis instalasi FTTH dengan toleransi tekukan hingga 90°, serta berkontribusi pada optimalisasi jaringan serat optik di lingkungan perkotaan Indonesia.

Kata kunci : *Bending Loss, Single Core Optical Fiber, Precon Drop Cable, Signal Damping, FTTH*

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi telekomunikasi di era modern ini menuntut adanya media transmisi yang mampu mentransfer data dengan kapasitas besar, kecepatan tinggi, dan jarak yang jauh. Serat optik hadir sebagai solusi unggulan atas kebutuhan tersebut. Sebagai pemandu gelombang cahaya yang terbuat dari silika atau plastik, serat optik menawarkan kecepatan transmisi yang sangat tinggi, bandwidth lebar, serta kekebalan terhadap gangguan elektromagnetik, menjadikannya tulang punggung infrastruktur jaringan komunikasi global saat ini [1], [2], [3].

Salah satu jenis serat optik yang paling banyak diimplementasikan adalah serat optik mode tunggal (single-mode fiber/SMF). SMF dirancang dengan inti yang sangat kecil sehingga hanya mampu melewatkan satu mode cahaya, yang secara signifikan mengurangi dispersi modal dan memungkinkan transmisi data jarak jauh dengan kualitas sinyal yang sangat baik [2], [4].

Keunggulan ini membuat SMF menjadi pilihan utama dalam jaringan telekomunikasi jarak jauh, termasuk infrastruktur Fiber to The Home (FTTH) yang semakin marak dibangun untuk memenuhi permintaan layanan pita lebar hingga ke rumah pelanggan [5].

Namun, dalam implementasinya di lapangan, serat optik seringkali harus melewati ruang terbatas, tikungan tajam, atau mendapatkan tekanan mekanis. Kondisi ini menyebabkan terjadinya pembengkokan (bending) pada serat, yang menjadi salah satu

penyebab utama hilangnya daya optik atau redaman [1], [6].

Redaman akibat pembengkokan ini dapat mengganggu performa jaringan, menyebabkan peningkatan bit error rate, penurunan kecepatan transmisi, dan pada kasus tertentu, dapat mengakibatkan terputusnya koneksi [2], [7]. Fenomena ini dikenal dengan istilah bending loss, yang terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu macrobending (lengkungan makro yang terlihat) dan microbending (lengkungan mikro akibat tekanan atau cacat material) [3], [1].

Memahami karakteristik bending loss menjadi krusial, tidak hanya untuk meminimalisir dampak negatifnya pada sistem komunikasi, tetapi juga untuk mengembangkannya menjadi sebuah teknologi sensor. Pelemahan daya yang terukur akibat pembengkokan dapat dikorelasikan dengan parameter fisis tertentu, seperti berat (beban), perubahan suhu, atau konsentrasi suatu zat, sehingga serat optik dapat difungsikan sebagai sensor yang presisi dan sensitive [4],[3].

Penelitian sebelumnya oleh Yusrizal menunjukkan bahwa diameter lengkungan dan jumlah lilitan secara signifikan mempengaruhi besar bending loss pada SMF [5].

Sementara itu, studi oleh Ramadhani menegaskan bahwa panjang gelombang operasi dan jenis serat juga berperan penting dalam menentukan besarnya redaman yang terjadi [2].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengukur dan membandingkan nilai bending

loss secara eksperimental pada tiga merek kabel precon drop cable single core (Onolink, Spectra, dan Tarmoc) pada variasi sudut tekukan 15° hingga 90° , serta menentukan merek kabel yang paling optimal untuk instalasi FTTH berdasarkan kesesuaiannya dengan standar ITU-T G.657 dan dampak minimalnya terhadap degradasi throughput jaringan."

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji fenomena bending loss pada serat optik, baik dari sisi karakterisasi rugi-rugi maupun aplikasinya sebagai sensor.

Formula dasar untuk menghitung kerugian akibat kelengkungan pada serat optik telah diverifikasi melalui berbagai pendekatan simulasi dan eksperimental. Ramadhani menggunakan model perhitungan bending loss berbasis OptiFiber yang mengacu pada model matematis kelengkungan, sementara Alghoul mengonfirmasi secara numerik bahwa bending loss memiliki ketergantungan kuat terhadap radius tekukan dan panjang gelombang.[2], [8].

Sejak saat itu, banyak studi eksperimental dan simulasi dilakukan. Yusrizal dalam penelitian eksperimentalnya menggunakan OTDR pada serat single-mode menemukan bahwa semakin kecil diameter lengkungan dan semakin banyak jumlah lilitan, maka nilai bending loss yang terjadi akan semakin besar. Pada diameter 10 mm dengan satu lilitan, tercatat loss sebesar 0,69 dB, sementara pada lima lilitan dengan diameter 25 mm, loss meningkat drastis menjadi 7,77 Db [5].

Sejalan dengan itu, studi simulasi oleh Ramadhani menggunakan perangkat lunak OptiFiber mengonfirmasi bahwa pada panjang gelombang 1550 nm, serat SMF-28 mengalami bending loss tertinggi sebesar 31,96 dB/km pada radius 20 mm, yang jauh lebih besar dibandingkan pada panjang gelombang 1310 nm (0,0125 dB/km) [2].

Veriyanti dan Saktioto juga menambahkan bahwa gangguan pembengkokan tidak hanya menyebabkan rugi daya tetapi juga memicu efek birefringence, di mana perubahan geometri serat menyebabkan dua sumbu polarisasi cahaya merambat dengan kecepatan berbeda [2].

Untuk mengatasi masalah bending loss, dikembangkanlah serat optik yang tidak sensitif terhadap tekukan. Rahadian dalam penelitiannya menganalisis pengaruh radius bending terhadap performansi jaringan FTTH dan menemukan bahwa semakin kecil radius tekukan, semakin besar rugi-rugi yang terjadi pada serat, sehingga penentuan radius minimum tekukan menjadi krusial dalam instalasi lapangan [9].

Sejalan dengan itu, Simatupang melalui simulasi MATLAB mengonfirmasi bahwa desain serat yang mempertimbangkan distribusi mode secara optimal

mampu menekan bending loss hingga nilai yang dapat ditoleransi sistem [3].

Sifat pelemahan daya akibat tekukan justru dimanfaatkan secara luas dalam pengembangan sensor. Simatupang melalui simulasi Matlab menunjukkan bahwa macrobending loss pada SMF-28e+ mencapai $1,817 \times 10^{-4}$ dB/mm pada radius 10 mm, sementara microbending menunjukkan perubahan koefisien transmisi hingga 59% pada tekanan 10 N, yang mengindikasikan potensi besar serat optik sebagai sensor gaya dan tekanan [3].

Dalam bidang rekayasa struktur, Widiyatmoko memanfaatkan macrobending pada serat optik yang dililitkan pada beban sebagai sensor deteksi beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bending loss memiliki korelasi linear terhadap perubahan beban yang diberikan, dengan sensitivitas yang dapat diatur melalui variasi jumlah lilitan dan diameter [4].

Ramadhani juga menegaskan bahwa selain menyebabkan rugi daya, pembengkokan pada serat optik berdampak pada perubahan karakteristik propagasi sinyal secara keseluruhan, yang mengonfirmasi pentingnya pengendalian sudut tekukan dalam setiap instalasi jaringan [4].

2.2. Prinsip Dasar Serat Optik Mode Tunggal (SMF)

Serat optik adalah pemandu gelombang dielektrik yang berfungsi mentransmisikan sinyal informasi dalam bentuk cahaya. Struktur dasarnya terdiri dari tiga lapisan utama: inti (core), selubung (cladding), dan lapisan pelindung (coating/jacket)[10], [7].

Cahaya merambat di dalam inti berdasarkan prinsip pemantulan internal total (total internal reflection), yang terjadi karena indeks bias inti (n_1) lebih besar daripada indeks bias selubung (n_2) [11].

Dalam jaringan telekomunikasi modern, terutama untuk aplikasi Fiber to The Home (FTTH), serat optik mode tunggal (Single-Mode Fiber/SMF) menjadi pilihan utama. SMF memiliki diameter inti yang sangat kecil (sekitar 8,3–10 μm) sehingga hanya merambatkan satu mode cahaya. Karakteristik ini menghilangkan dispersi modal dan memungkinkan transmisi data pita lebar dengan kapasitas besar hingga jarak puluhan kilometer [1].

Standar serat optik yang umum digunakan dalam jaringan akses adalah rekomendasi ITU-T G.652 (standar) dan G.657 (bending loss insensitive) [2].

2.3. Rugi-Rugi Daya dan Konsep Bending Loss

Redaman (attenuation) adalah penurunan kekuatan daya optik selama proses transmisi dari pengirim ke penerima. Redaman total dalam suatu link serat optik merupakan akumulasi dari berbagai sumber, seperti redaman intrinsik material (absorpsi dan hamburan), redaman akibat penyambungan (splice dan konektor), serta redaman akibat kondisi lingkungan seperti tekukan (bending) [12], [13].

Bending loss atau rugi-rugi tekuk adalah tambahan redaman yang terjadi ketika serat optik mengalami pembengkokan. Tekukan menyebabkan sebagian cahaya yang seharusnya terperangkap di inti bocor keluar dan hilang sebagai radiasi. Untuk mengatasi masalah ini, International Telecommunication Union (ITU-T) mengeluarkan standar G.657, yang mendefinisikan karakteristik serat optik yang tahan terhadap tekukan (bend-insensitive fiber) [14], [15].

Untuk mengukur dan mengevaluasi besarnya bending loss dalam suatu instalasi, pendekatan praktis yang digunakan adalah dengan membandingkan daya optik sebelum dan sesudah tekukan. Dalam penelitian ini, bending loss didefinisikan sebagai selisih antara redaman total yang terukur saat serat dalam kondisi ditekuk (Redaman Uji) dengan redaman dasar serat saat kondisi lurus tanpa gangguan (Baseline Insertion Loss). Secara matematis, dirumuskan sebagai berikut [6]:

$$\text{Bending Loss} = \text{Redaman Uji (dB)} - \text{Baseline Insertion Loss (1)}$$

Redaman Uji adalah nilai rugi-rugi total yang terbaca pada alat ukur (seperti Optical Power Meter/OPM atau OTDR) ketika serat optik diberi perlakuan tekukan dengan variasi diameter tertentu. Baseline Insertion Loss adalah nilai redaman inheren dari serat optik itu sendiri dalam kondisi ideal (lurus), yang merupakan akumulasi dari redaman material dan konektor [6].

Untuk menilai kualitas suatu link berdasarkan nilai bending loss yang diperoleh dari persamaan (1), digunakan standar acuan. Dalam penelitian ini, standar yang digunakan mengacu pada kategori performansi untuk serat bend-insensitive berdasarkan rekomendasi ITU-T G.657, seperti yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kategori Bending Loss Berdasarkan ITU-T G.657

Tabel 1. Kategori Bending Loss	
Kategori	Bending Loss
Baik	≤ 0.1 dB
Cukup	0.1-0.5 dB
Buruk	> 0.5 dB

2.4. Parameter Kinerja Jaringan: Throughput dan Packet Loss

Selain redaman daya, kualitas jaringan komunikasi data juga dinilai dari kemampuannya mentransfer data secara efektif. Beberapa parameter kinerja utama yang digunakan adalah [16]:

- Throughput: Merupakan ukuran kecepatan transfer data aktual yang berhasil dikirimkan dari pengirim ke penerima dalam satuan waktu (bps atau Mbps). Throughput mencerminkan bandwidth sebenarnya yang diterima pengguna setelah dikurangi berbagai hambatan seperti redaman, latency, dan packet loss [1].

- Packet Loss: Adalah jumlah paket data yang gagal mencapai tujuan selama proses transmisi. Packet loss yang tinggi dapat disebabkan oleh redaman berlebih, gangguan fisik pada kabel (termasuk tekukan yang terlalu tajam), atau kemacetan jaringan (congestion) [11], [7].

2.5. Analisis Degradasi Throughput Akibat Bending

Pengaruh bending loss tidak hanya berhenti pada pelemahan daya optik, tetapi juga berdampak pada kinerja jaringan di level protokol dan aplikasi. Peningkatan redaman akibat tekukan dapat menurunkan rasio signal-to-noise, yang pada akhirnya memicu peningkatan packet loss dan penurunan kecepatan transfer data efektif atau throughput [9].

Untuk mengukur seberapa besar penurunan kinerja ini, penelitian ini menggunakan parameter Degradasi Throughput. Parameter ini menghitung persentase penurunan kecepatan internet yang terjadi ketika serat optik dalam kondisi ditekuk, dibandingkan dengan kondisi normal (lurus/baseline). Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Degradasi (\%)} = \frac{\text{Baseline Speed} - \text{Bending Speed}}{\text{Baseline Speed}} 100\% \quad (2)$$

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan pengujian dan observasi langsung terhadap kabel fiber optik (FO) tiga merek berbeda. Fokus utama adalah menganalisis pengaruh variasi sudut bending terhadap redaman sinyal dan kualitas transmisi menggunakan perangkat pendukung seperti OPM dan ONT. Penelitian dilaksanakan secara mandiri di rumah dengan waktu fleksibel untuk memastikan akurasi data maksimal.

Penelitian dilaksanakan secara mandiri di rumah. Waktu pelaksanaan bersifat fleksibel/tidak terbatas waktu tertentu, sehingga pengujian dapat dilakukan sesuai kebutuhan dan kondisi terbaik untuk memastikan akurasi data.

3.1. Alat dan bahan yang digunakan:

- Fiber Optik: Jaringan FO memanfaatkan serat optik sebagai media penghantar sinyal cahaya dengan bandwidth besar dan loss sinyal rendah dibanding kabel tembaga.
- Jenis Kabel: Single Mode Fiber (SMF) dengan inti kecil untuk transmisi jarak jauh tanpa modal dispersion signifikan.
- Model Kabel: Kabel SMF outdoor tahan cuaca ekstrem, kelembaban, UV, dan tekanan mekanik.
- OPM (Optical Power Meter): Alat pengukur daya cahaya dalam dB untuk instalasi, pemeliharaan, dan troubleshooting jaringan FO.
- Cleaver dan Stripper: Cleaver memotong serat secara presisi untuk splicing atau konektorisasi; stripper menghilangkan lapisan pelindung.

- f. Fast Connector: Konektor cepat untuk penyambungan tanpa fusion splicing, praktis bagi teknisi.
- g. ONT (Optical Network Terminal): Mengonversi sinyal optik ke elektronik untuk perangkat end-user seperti router

3.2. Data yang digunakan meliputi:

- a. Spesifikasi teknis kabel FO tiga merek (data primer dari dokumentasi produk).
- b. Hasil pengujian redaman pada sudut bending (data eksperimen).
- c. Data performansi jaringan ONT: download speed degradasi dan Rx power level (data eksperimen speedtest)

3.3. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian mengikuti alur eksperimental bertahap seperti pada Gambar 1, dimulai dari input data hingga evaluasi hasil.



Gambar 1. Alur Prosedur Pengujian Kabel FO

Tahapan prosedur pengujian pada penelitian ini sebagai berikut:

- a. Input Data Spesifikasi: Pengumpulan parameter teknis (attenuation, diameter core, G.657 type) dari datasheet tiga merek precon drop cable sebagai baseline komparasi.
- b. Penarikan Kabel: Menarik kabel sejauh 50meter mensimulasikan kondisi lapangan.
- c. Uji Bending Sudut: Melakukan pengujian pada 15°, 30°, 45°, 60°, 90°.
- d. Pengukuran Redaman Optik: Akusisi bending loss menggunakan Optical Power Meter (OPM) pada setiap konfigurasi sudut.

- e. Evaluasi Performansi ONT: Pengukuran download speed degradasi dan Rx power level melalui speedtest.net setelah koneksi ke ONT GPON.
- f. Pengolahan dan Analisis Data: Perhitungan statistik (mean, degradasi %).

3.4. Analisis Data

Data diolah dengan langkah berikut:

- a. Mengolah hasil uji redaman untuk nilai rata-rata per sudut bending.
- b. Analisis perbandingan redaman dan RET antar tiga kabel.
- c. Menarik kesimpulan performa kabel terhadap bending.
- d. Analisis kuantitatif menggunakan statistik sederhana

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian bending loss dilakukan terhadap tiga merek kabel fiber optik precon drop cable SC/UPC dengan panjang 50 meter, yaitu Onolink (GJYXCH-1B6A2), Spectra (G657A1), dan Tarmoc (TPC-PC-1C3S). Pengukuran redaman dilakukan pada sudut bending 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90° menggunakan Optical Power Meter (OPM).

4.1. Data spesifikasi kabel fo

Penelitian ini menggunakan tiga merek kabel *precon drop cable* tipe *single-mode* dengan panjang 50 meter. Spesifikasi masing-masing kabel yang diperoleh dari pengukuran awal (*baseline insertion loss*) disajikan pada Tabel 2 hingga Tabel 4.

- a. Onolink

Tabel 2. Spesifikasi Onolink

Spesifikasi	Precon drop cable SC/UPC
Tipe kabel drop	Onolink / GJYXCH-1B6A2 / 1Core
Panjang	50 Meter
Insertion loss	0.23-0.21 dB
Rata-rata	0.220 dB
Return loss	52.8-50.5 dB

- b. Spectra

Tabel 3. Spesifikasi Spectra

Spesifikasi	Precon drop cable SC/UPC
Tipe kabel drop	LSZH / G657A1 / 1Core
Panjang	50 Meter
Insertion loss	0.01 -0.12 dB
Rata-rata	0.065 dB
Return loss	51.1-51.3 dB

- c. Tarmoc

Tabel 4. Spesifikasi Tarmoc

Spesifikasi	Precon drop cable SC/UPC
Tipe kabel drop	TPC-PC-1C3S
Panjang	50 Meter
Insertion loss	0.03-0.10 dB
Rata-rata	0.065 dB
Return loss	48.6-49.0 dB

4.2. Hasil Pengujian data

Pengukuran redaman uji dilakukan pada masing-masing kabel dengan variasi sudut tekukan 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90°. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 5 hingga Tabel 7.

a. Onolink

Tabel 5. Pengujian Onolink

Sudut	Redaman (dB)
15	00.14
30	00.09
45	00.05
60	00.01
90	00.00

b. Spectra

Tabel 6. Pengujian Spectra

Sudut	Redaman (dB)
15	00.20
30	00.10
45	00.07
60	00.03
90	00.00

c. Tarmoc

Tabel 7. Pengujian Tarmoc

Sudut	Redaman (dB)
15	00.09
30	00.06
45	00.04
60	00.03
90	00.00

4.3. Perhitungan Bending Loss

Bending loss dihitung berdasarkan Persamaan (1) yang telah dirumuskan pada sub-bab 2.2.2, yaitu selisih antara redaman uji dan *baseline insertion loss*. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti Hasil perhitungan *bending loss* untuk ketiga kabel pada setiap variasi sudut disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Bending Loss

Kabel	15°	30°	45°	60°	90°
Onolink	-0.08	-0.13	-0.17	-0.21	-0.22
Spectra	0.14	0.04	0.00	-0.04	-0.07
Tarmoc	0.03	-0.01	-0.03	-0.04	-0.07

Berdasarkan Tabel 8, kabel Onolink menghasilkan nilai *bending loss* negatif pada semua sudut pengujian, dengan rentang nilai dari (-0,08 dB) pada sudut 15° hingga (-0,22) dB pada sudut 90°. Kabel Spectra menunjukkan nilai positif pada sudut 15° (0,14 dB) dan 30° (0,04 dB), nilai (0,00 dB) pada sudut 45°, kemudian menurun menjadi negatif pada sudut 60° (-0,04 dB) dan 90° (-0,07 dB). Kabel Tarmoc menunjukkan nilai positif hanya pada sudut 15° (0,03 dB), dan bernilai negatif pada sudut lainnya, yaitu (-0,01 dB) pada sudut 30°, (-0,03 dB) pada sudut 45°, serta (-0,04 dB) pada sudut 60° dan 90°.

Fenomena nilai negatif pada *bending loss* mengindikasikan bahwa redaman uji lebih kecil dari *baseline insertion loss*. Secara teoritis, *bending loss* seharusnya bernilai nol atau positif karena tekukan idealnya hanya menambah redaman. Namun, nilai negatif yang muncul — terutama pada kabel Onolink secara konsisten di seluruh sudut — dapat dijelaskan melalui empat mekanisme fisis berikut.

- Pertama, ketidakidealan pengukuran *baseline (measurement uncertainty)* — kabel yang tampak "lurus" saat *baseline* mungkin masih mengandung lendutan alami akibat gravitasi atau tegangan sisa fabrikasi, sehingga *baseline* tercatat lebih tinggi dari kondisi ideal dan menghasilkan selisih negatif saat pengujian.
- Kedua, toleransi resolusi OPM sebesar $\pm 0,05$ –0,2 dB menjadikan nilai -0,08 hingga -0,22 dB berada dalam rentang *noise* instrumen atau variasi koneksi *fast connector*, bukan perbedaan yang signifikan secara fisis.
- Ketiga, *baseline* kabel Onolink (rata-rata 0,220 dB) jauh lebih tinggi dibanding Spectra dan Tarmoc (0,065 dB), mengindikasikan adanya tegangan residual pada kondisi lurus akibat proses produksi. Saat ditekuk, tegangan internal justru terlepas (*strain relief effect*) sehingga serat kembali ke posisi optimal dan kehilangan daya berkurang.
- Keempat, tekukan ringan pada SMF dapat meredam mode cladding yang sebelumnya merambat akibat konektor tidak sempurna, sehingga daya terukur di penerima justru lebih bersih dari kondisi *baseline (mode coupling effect)*.

Dengan mempertimbangkan keempat faktor tersebut, nilai negatif di bawah $\pm 0,2$ dB lebih tepat diinterpretasikan sebagai nilai mendekati nol dengan ketidakpastian pengukuran, bukan sebagai penguatan sinyal yang sesungguhnya. Seluruh nilai *bending loss* tetap berada dalam kategori "Baik" berdasarkan standar ITU-T G.657, sehingga validitas keseluruhan hasil penelitian ini tidak terganggu.

4.4. Pengkategorian Performa Bending Loss

Untuk menilai kualitas ketiga kabel, nilai *bending loss* pada Tabel 7 dikategorikan berdasarkan standar ITU-T G.657 yang telah dijabarkan pada Tabel 1 Hasil pengkategorian disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Pengkategorian Performa Bending Loss

Kabel	Sudut	Bendin Loss (dB)	Kategori
Onolink	15°	-0.08	Baik
Onolink	30°	-0.13	Baik
Onolink	45°	-0.17	Baik
Onolink	60°	-0.21	Baik
Onolink	90°	-0.22	Baik
Spectra	15°	0.14	Cukup
Spectra	30°	0.04	Baik
Spectra	45°	0.00	Baik
Spectra	60°	-0.04	Baik
Spectra	90°	-0.07	Baik

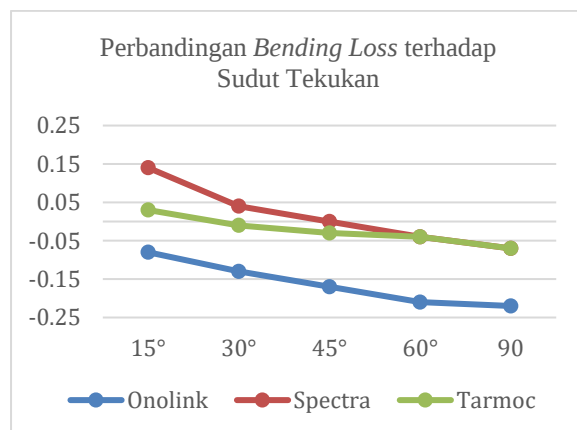
Kabel	Sudut	Bending Loss (dB)	Kategori
Tarmoc	15°	0.03	Baik
Tarmoc	30°	-0.01	Baik
Tarmoc	45°	-0.03	Baik
Tarmoc	60°	-0.04	Baik
Tarmoc	90°	-0.07	Baik

Berdasarkan Tabel 9, seluruh nilai *bending loss* berada pada kategori "Baik" ($\leq 0,1$ dB) sesuai standar ITU-T G.657, dengan satu pengecualian pada kabel Spectra di sudut 15° yang masuk kategori "Cukup" (0,1 – 0,5 dB). Namun demikian, nilai 0,14 dB tersebut masih jauh di bawah batas atas kategori cukup (0,5 dB), sehingga secara praktis kabel Spectra tetap layak digunakan untuk instalasi FTTH.

Kabel Onolink menunjukkan performa terbaik dengan *bending loss* negatif pada semua sudut. Fenomena ini dapat diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa kualitas produksi kabel Onolink melebihi spesifikasi pabrik, atau terdapat toleransi pengukuran yang konservatif pada saat penentuan *baseline insertion loss*.

Kabel Spectra (tipe G657A1) menunjukkan sensitivitas paling tinggi pada sudut kecil (15°), dengan *bending loss* 0,14 dB. Hal ini sesuai dengan karakteristik serat bend-insensitive yang masih rentan terhadap tekukan dengan radius sangat ketat, namun performanya stabil pada sudut $\geq 45^\circ$.

Kabel Tarmoc konsisten memberikan *bending loss* rendah ($\leq 0,03$ dB) di semua sudut pengujian, sehingga sangat cocok untuk instalasi yang memerlukan banyak tikungan. Pada sudut 90°, ketiga kabel menunjukkan *bending loss* mendekati nol (0,00 hingga -0,22 dB), membuktikan kecocokannya untuk aplikasi *outdoor precon cable*.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Bending Loss terhadap Sudut Tekukan

Hasil ini mengonfirmasi bahwa ketiga merek *precon drop cable* yang diuji memenuhi standar performa *bending loss* untuk aplikasi jarak pendek (50 m) dengan konfigurasi sudut tekukan hingga 90°

4.4. Pengaruh Bending Terhadap Kecepatan Jaringan

Untuk menganalisis dampak *bending loss* terhadap kualitas layanan internet, dilakukan pengukuran kecepatan *download* (DL speed) sebelum dan sesudah perlakuan tekukan. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Kecepatan Jaringan Bending

Kabel	Sudut	DL Speed Baseline	DL Speed Bending	ONT Rx Power (dBm)
Onolink	15°	51 Mbps	50.47 Mbps	28.54 dBm
Onolink	30°	51 Mbps	50.55 Mbps	28.54 dBm
Onolink	45°	51 Mbps	50.62 Mbps	28.54 dBm
Onolink	60°	51 Mbps	50.88 Mbps	28.54 dBm
Onolink	90°	51 Mbps	50.97 Mbps	28.54 dBm
Spectra	15°	51 Mbps	50.10 Mbps	28.54 dBm
Spectra	30°	51 Mbps	50.30 Mbps	28.54 dBm
Spectra	45°	51 Mbps	50.57 Mbps	28.54 dBm
Spectra	60°	51 Mbps	50.65 Mbps	28.54 dBm
Spectra	90°	51 Mbps	50.76 Mbps	28.54 dBm
Tarmoc	15°	51 Mbps	50.45 Mbps	30.00 dBm
Tarmoc	30°	51 Mbps	50.57 Mbps	30.00 dBm
Tarmoc	45°	51 Mbps	50.65 Mbps	30.00 dBm
Tarmoc	60°	51 Mbps	50.75 Mbps	30.00 dBm
Tarmoc	90°	51 Mbps	50.89 Mbps	30.00 dBm

Berdasarkan data pada Tabel 10, dilakukan perhitungan degradasi throughput menggunakan Persamaan (2) yang telah dirumuskan pada sub-bab 2.2.4 Hasil perhitungan degradasi *throughput* dirangkum pada Tabel 11.

Tabel 11. Degradasi Bending

Kabel	Rata-rata DL Bending	Rata Degradasi (%)	Maks Degradasi (%)	ONT Rx Power
Onolink	50.70 Mbps	0.59	1.04	-28.54 dBm
Spectra	50.48 Mbps	1.03	1.76	-28.54 dBm
Tarmoc	50.66 Mbps	0.66	1.08	-30.00 dBm

4.5. Korelasi Bending Loss dengan Degradasi Throughput

Hasil pengujian menunjukkan bahwa degradasi kecepatan *download* sangat tipis, berada pada rentang 0,06–1,76% dengan rata-rata 0,59–1,03% untuk ketiga kabel yang diuji. Pola degradasi ini berkorelasi langsung dengan hasil pengukuran *bending loss* menggunakan OPM pada Tabel 7.

Kabel Spectra yang menunjukkan *bending loss* tertinggi (0,14 dB pada sudut 15°) juga menghasilkan degradasi *throughput* maksimum (1,76%). Sebaliknya, kabel Onolink dengan *bending loss* negatif pada semua sudut (-0,08 hingga -0,22 dB) menghasilkan performa jaringan paling stabil dengan rata-rata degradasi hanya 0,59%. Temuan ini mengonfirmasi adanya hubungan linier antara *optical loss* fisik dan performansi pada *layer* aplikasi,

sebagaimana dijelaskan dalam penelitian sebelumnya [17], [18].

4.6. Stabilitas Daya Optik pada ONT

Nilai ONT Rx Power tetap stabil pada -28,54 dBm untuk kabel Onolink dan Spectra, serta -30,00 dBm untuk kabel Tarmoc di seluruh variasi sudut tekukan. Stabilitas ini mengindikasikan *margin power budget* yang memadai dalam sistem. Nilai daya optik tersebut berada dalam rentang operasional normal GPON ONT, yaitu antara -8 dBm hingga -28 dBm [17].

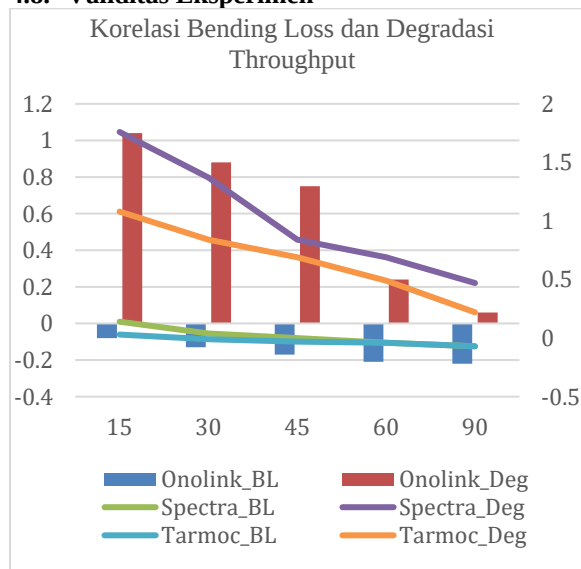
Stabilitas Rx Power ini menjelaskan mengapa *bending loss* di bawah 0,2 dB tidak terdeteksi secara signifikan oleh ONT, sehingga tidak memengaruhi aktivasi dan operasi normal perangkat terminal optik. Hal ini sejalan dengan konsep *power budget* yang menyatakan bahwa selama daya terima masih di atas sensitivitas receiver, koneksi akan tetap berjalan normal [17].

4.7. Kesesuaian dengan Standar Layanan FTTH Komersial

Maksimum degradasi *throughput* sebesar 1,76% masih jauh di bawah *threshold* layanan internet komersial yang dapat diterima, yaitu <5% untuk paket 50 Mbps [19].

Ketiga kabel *precon drop cable* (Onolink GJYXCH-1B6A2, Spectra G657A1, dan Tarmoc TPC-PC-1C3S) terbukti memenuhi persyaratan instalasi FTTH dengan sudut tekukan ekstrem hingga 90°, menjadikannya layak digunakan pada *deployment* lapangan dengan kondisi pemasangan yang menantang [19].

4.8. Validitas Eksperimen



Gambar 3. Korelasi Bending Loss dan Degradasi Throughput

Keterangan:

- BL = Bending Loss (dB) - untuk sumbu Y kiri
- Deg = Degradasi (%) - untuk sumbu Y kanan

Analisis lintas tabel antara *bending loss* (Tabel 8) dan degradasi *bending* (Tabel 11) mengungkap korelasi positif yang kuat antara *bending loss* fisik dan degradasi *throughput* jaringan. Kabel Spectra dengan *bending loss* positif tertinggi secara konsisten menunjukkan degradasi kecepatan tertinggi, sementara kabel Onolink dengan *bending loss* negatif justru menunjukkan performansi relatif lebih baik.

Gambar 3 memperlihatkan tren penurunan pengaruh *bending* seiring peningkatan sudut tekukan (15° → 90°), dengan kabel Onolink mempertahankan stabilitas performa terbaik untuk aplikasi instalasi jaringan FTTH outdoor.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa ketiga merek *precon drop cable* (Onolink GJYXCH-1B6A2, Spectra G657A1, dan Tarmoc TPC-PC-1C3S) memenuhi standar performa *bending loss* ITU-T G.657 dengan seluruh nilai berada pada kategori "Baik" ($\leq 0,1$ dB), kecuali kabel Spectra pada sudut 15° yang masuk kategori "Cukup" (0,14 dB). Terdapat korelasi positif antara *bending loss* fisik dan degradasi *throughput* jaringan, di mana kabel dengan *bending loss* tertinggi (Spectra) menunjukkan degradasi maksimum 1,76%, sementara kabel dengan performa terbaik (Onolink) hanya mengalami degradasi rata-rata 0,59%. Daya terima ONT tetap stabil pada rentang -28,54 dBm hingga -30,00 dBm di seluruh variasi sudut, mengindikasikan *margin power budget* yang memadai dalam sistem. Degradasi *throughput* maksimum 1,76% masih jauh di bawah *threshold* layanan internet komersial (<5%), sehingga ketiga kabel layak digunakan untuk instalasi FTTH dengan sudut tekukan hingga 90° tanpa risiko signifikan terhadap kualitas sinyal.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian dengan variasi panjang kabel yang lebih beragam (100 m, 200 m, 500 m) serta radius tekukan yang berbeda untuk mendapatkan pemetaan performa yang lebih komprehensif, dan menambahkan analisis pengaruh suhu lingkungan terhadap *bending loss* karena faktor termal dapat mempengaruhi karakteristik redaman serat optik di lapangan.

Penelitian ini menyarankan kepada teknisi jaringan, institusi pendidikan, serta praktisi telekomunikasi agar memperbaiki prosedur pengukuran *baseline insertion loss* menggunakan mandrel khusus dan OPM grade laboratorium untuk hasil yang lebih presisi, serta menghindari pemasangan kabel Spectra pada sudut tekukan di bawah 15° mengingat nilai *bending loss*-nya tertinggi pada sudut tersebut, sehingga pemilihan dan pemasangan kabel *precon drop cable* tidak hanya memenuhi standar ITU-T G.657 secara minimal, melainkan benar-benar diarahkan pada kualitas instalasi yang optimal guna menjamin layanan internet pelanggan tetap stabil dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Ibnu Prabowo, S. Aufar Ahmad, R. Fadhlurrahman, S. Afta Wijaksana, L. Narpulaela, and S. Andromeda, "ANALISIS HAMBATAN AKTUAL PADA KABEL SERAT OPTIK MENGGUNAKAN OPTICAL LIGHT SOURCE (OLS) DAN OPTICAL POWER METER (OPM)," *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.*, vol. 9, no. 3, pp. 3655–3660, May 2025, doi: 10.36040/JATI.V9I3.13350.
- [2] F. N. Ramadhani, S. Saktioto, Z. Zulkarnain, D. Defrianto, and M. M. Fadhali, "Analysis of bending losses in single-mode optical fiber for determining optical signal quality," *Sci. Technol. Commun. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 123–128, Jun. 2025, doi: 10.59190/STC.V5I3.324.
- [3] J. W. Simatupang, F. Syamsuri, R. Bramasto, F. C. Anam, and R. H. Y. Ardanta, "ANALISIS PERHITUNGAN KERUGIAN DAYA PADA LENDUTAN SERAT OPTIK DENGAN SIMULASI MATLAB," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 24, no. 1, pp. 13–24, Apr. 2022, doi: 10.24912/TESLA.V24I1.15371.
- [4] B. Widiyatmoko *et al.*, "Macrobending loss in wrapped fiber optic for load detections," *Appl. Opt.*, vol. 61, no. 13, p. 3786, May 2022, doi: 10.1364/AO.451825.
- [5] R. Yusrizal *et al.*, "Analisa Bending Loss pada Fiber Optic Single-Mode:," *J. Kolaboratif Sains*, vol. 6, no. 7, pp. 620–629, Jul. 2023, doi: 10.56338/JKS.V6I7.3793.
- [6] R. Purba and C. E. Suharyanto, "PERANCANGAN JARINGAN FIBER TO THE HOME (FTTH) DENGAN TEKNOLOGI GPON DI WILAYAH TANJUNG UMA KOTA BATAM," *Comput. Sci. Ind. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 104–110, Jan. 2021, Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://ejournal.upbatam.ac.id/index.php/comasi_ejournal/article/view/3069
- [7] Y. Yustini, A. A. Asril, H. N. Nawi, R. Hafizt, and A. Warman, "Implementasi dan Performansi Jaringan Fiber To The Home dengan Teknologi GPON," *J. Teknol. Elekterika*, vol. 18, no. 2, p. 59, Nov. 2021, doi: 10.31963/ELEKTERIKA.V18I2.3032.
- [8] N. A. Alshatwi, M. O. Madi, and S. A. Amhammed, "Numerical Calculation of Attenuation Mechanisms in Single-Mode Optical Fibres," *Univ. Zawia J. Nat. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 19–28, Mar. 2026, doi: 10.26629/UZJNS.2026.03.
- [9] H. A. Rahadian, S. T. . M. T. . I. Dr. Fakhriy Hario Partiansyah, and S. T. . M. T. . I. Ir. Ali Mustofa, "Analisis Pengaruh Radius Bending Terhadap Performansi Jaringan Transmisi Serat Optik pada Jaringan Fiber to the Home (FTTH)," Nov. 2024.
- [10] M. Nurus, O. Nurdiawa, and M. Martanto, "Analisis Jaringan Akses Fiber to The Home Menggunakan Teknologi Gigabit Passive Optical Network," *J. Janitra Inform. dan Sist. Inf.*, vol. 3, no. 2, pp. 56–66, Oct. 2023, doi: 10.25008/JANITRA.V3I2.168.
- [11] M. Y. Ibrahim and N. Nawaningtyas, "Evaluasi Kinerja Jaringan FTTH Berbasis ODC dan GPON Berdasarkan Power Link Budget di RT 015 Tanjung Duren Utara," *sudo J. Tek. Inform.*, vol. 4, no. 2, pp. 112–123, Jun. 2025, doi: 10.56211/SUDO.V4I2.945.
- [12] R. A. A. Arditya, J. A. Razaq, and Sunardi, "Analisis Kualitas Jaringan Internet Berbasis Fiber Optic Dengan Metode Action Research," *J. FASILKOM*, vol. 14, no. 2, pp. 478–483, Aug. 2024, doi: 10.37859/JF.V14I2.7138.
- [13] M. Fani and D. Octamilanov, "Implementasi Jaringan Dan Uji Kelayakan Fiber To The Home (FTTH) Pada Cluster Rananta," *J. Appl. Multimed. Netw.*, vol. 8, no. 1, pp. 101–111, Aug. 2024, doi: 10.30871/JAMN.V8I1.7952.
- [14] M. Kusumawardani, I. Mahfudi, A. D. Salsabila, H. Darmono, C. Setiadi, and D. Rahmayanti, "Rancang bangun jaringan RT/RW dengan teknologi gigabit passive optical network (GPON) berbasis fiber to the home (FTTH)," *J. ELTEK*, vol. 24, no. 1, pp. 17–24, Apr. 2026, doi: 10.33795/ELTEK.V24I1.8739.
- [15] M. Gani, B. Darussalam, A. Fauzi, G. M. Suranegara, and D. W. Lestariningsih, "Analisis Gangguan Transmisi Fiber Cut dan Pengembangan Solusi untuk Meningkatkan Availability Sistem Komunikasi Fiber Optik Section Banua Hanyar – Bati Bati," *Ranah Res. J. Multidiscip. Res. Dev.*, vol. 6, no. 3, pp. 374–388, Apr. 2024, doi: 10.38035/RRJ.V6I3.828.
- [16] H. P. Fitrian, R. N. A. Muntaha, M. H. Hidayat, B. Nugraha, A. R. Priatna, and A. A. Arifin, "Analisis Performa Sistem Transmisi Data Menggunakan Fiber Optik Pada Jaringan Metropolitan Area Network (MAN)," *J. Komputer, Inf. dan Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 14–14, 2026, doi: 10.53697/JKOMITEK.V6I1.3603.