

PERANCANGAN DAN ANALISIS JARINGAN BACKHAUL SERAT OPTIK UNTUK KOMUNIKASI LTE PENUMPANG KERETA CEPAT JAKARTA – SURABAYA SUB CEPU – SURABAYA

DESIGN AND ANALYSIS OF OPTICAL FIBER BACKHAUL NETWORK FOR PASSENGERS' LTE COMMUNICATION ON JAKARTA – SURABAYA HIGH – SPEED TRAIN CEPU – SURABAYA SECTION

Ki Agus Farhan E.S¹, Dr. Ir. Erna Sri Sugesti, M.Sc.², Dr. Ir. Rina Pudji Astuti, M.T.³
^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
¹farhanervs@student.telkomuniversity.ac.id, ²ernasugesti@telkomuniversity.ac.id,
³rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Badan Pusat Statistik (BPS) menyampaikan bahwa jumlah penumpang kereta api mengalami kenaikan 1,1% setiap tahunnya. Dalam waktu dekat ini, pemerintah akan membangun proyek kereta cepat Jakarta – Surabaya. Operator jaringan seluler hendaknya dapat menyediakan kebutuhan pelanggan. Salah satu faktor penting untuk mendukung jaringan seluler adalah jaringan *backhaul* yang mampu membawa trafik data tersebut sesuai dengan standar teknologi jaringan seluler LTE. Tugas Akhir ini merancang jaringan *backhaul* fiber optik yang terdiri dari jaringan *backbone*, akses, dan *Evolved Packet Core* (EPC) untuk penumpang kereta dengan kecepatan maksimal 160 km/jam dari stasiun Cepu ke stasiun Pasar Turi Surabaya. Teknologi *backbone* optik yang digunakan adalah SDH STM-64 *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), teknologi jaringan akses menggunakan XG-PON1, dan teknologi *core network* LTE menggunakan EPC. Jaringan *backbone* optik yang telah ada disepanjang rel kereta dapat digunakan untuk menghemat biaya. Rancangan yang dibuat memperhatikan parameter *delay*, *rise-time budget*, *power link budget*, *Q-factor*, SNR, dan BER, sesuai standar ITU-T G.987, ITU-T G.691, ITU-T G.696.1, dan 3GPP TS23.203. Masing – masing elemen EPC yang dibutuhkan seperti HSS, MME, S/P-GW adalah satu buah berada dalam satu EPC yang sama. Parameter *delay* terpenuhi dengan nilai pada link terjauh sisi *downstream* yaitu 1,707611 ms, sedangkan pada sisi *upstream* 1,707562 ms. Parameter terendah LPB bernilai -21,62 dBm, *Q-factor* 7,62644, BER $1,18 \times 10^{-14}$ dan RTB 0.0460977867828442 ns untuk link akses *downstream*. Sedangkan parameter terendah untuk link akses *upstream* LPB -23,873 dBm, *Q-factor* 7,00755, BER $1,21 \times 10^{-12}$, dan RTB 0.046097828 ns. Pada link *backbone* nilai parameter terendah untuk LPB -23,502 dBm, *Q-factor* 7,93476, BER $1,04 \times 10^{-15}$ dan RTB 0.046097939 ns.

Kata kunci : *Backhaul*, *Backbone*, EPC, DWDM, XG-PON1, LTE, STM-64.

Abstract

The Central Statistics Agency explained the number of train passengers has increased by 1.1% annually. Soon, the government will develop the Jakarta - Surabaya high-speed train project. Cellular network operators should be able to provide customer needs. One of the important factors to support cellular networks is the backhaul network which can carry traffic data in accordance with LTE cellular network technology standards. This Final Project connects the optical fiber backhaul network consisting of backbone network, access, and Evolved Packet Core (EPC) for passenger trains with a maximum speed of 160 km / hour from Cepu station to Pasar Turi Surabaya station. Optical backbone technology used is SDH STM-64 Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), access network technology using XG-PON1, and LTE network core technology using EPC. The existing optical backbone network along the rail can be used to save costs. The design made takes into account parameter delays, rise time budgets, power link budgets, Q-factors, SNR, and BER, according to ITU-T standards G.987, ITU-T G.691, ITU-T G.696.1, and 3GPP TS23.203. Each of the required EPC elements such as HSS, MME, S / P-GW is one in the same EPC. The delay parameter is fulfilled with the value on the farthest link on the downstream side, which is 1,707611 ms, while on the upstream side is 1,707562 ms. The lowest parameters of LPB -23,873 dBm, *Q-factor* 8,50244, BER $9,28 \times 10^{-18}$, dan RTB 0.046097828 ns. On the backbone link the lowest parameter values for LPB -23,502 dBm, *Q-factor* 7,93476, BER $1,04 \times 10^{-15}$ dan RTB 0.046097939 ns.

Keywords: *Backhaul*, *Backbone*, EPC, DWDM, XG-PON1, LTE, STM-64.

1. Pendahuluan

Masyarakat perlu menentukan moda transportasi ketika hendak pergi keluar kota. Moda transportasi dipilih berdasarkan beberapa faktor seperti durasi perjalanan, total biaya, kenyamanan, keamanan, efektifitas, dan layanan yang dapat diperoleh. Transportasi massal yang dapat dipilih untuk keluar kota antara lain pesawat udara, kapal laut, bus, dan kereta api. Tahun 2019, Kereta api lebih banyak diminati masyarakat Indonesia dibandingkan dengan pesawat udara yang menurun peminatnya karena terpengaruh kebijakan bagasi berbayar [1]. Badan Pusat Statistik (BPS) menyampaikan bahwa jumlah penumpang kereta api mengalami kenaikan 1,1 persen setiap tahunnya [2][3]. Selain itu, penumpang kereta juga dapat menikmati layanan internet WiFi [4] maupun layanan jaringan seluler [5] sehingga dapat meningkatkan produktifitas selama perjalanan.

Pemerintah akan membangun proyek kereta cepat Jakarta - Surabaya. Proyek ini mempercepat waktu tempuh perjalanan dari Jakarta ke Surabaya menjadi 5,5 jam. Kereta cepat ini akan melaju dengan kecepatan 160 km/jam dengan menggunakan jalur kereta existing yang telah diremajakan [6]. Kereta cepat Jakarta – Surabaya mampu menampung 900 penumpang [7].

Proyek kereta cepat menjadi tantangan bagi penyelenggara jaringan seluler untuk memberikan pelayanan jaringan yang baik bagi para penggunanya yang berada di kereta cepat. Aplikasi seperti internet *mobile broadband*, *video call*, *voice over IP (VoIP)*, *streaming*, dan *real time gaming* [8] harus mampu dilayani oleh operator pada penumpang kereta cepat melalui jaringan seluler 4G LTE. Layanan – layanan tersebut memberikan beban trafik yang tinggi pada jaringan seluler. Layanan seperti *real time gaming* dan *VoIP* sensitif terhadap *delay*, sehingga perancangan sistem juga harus memperhatikan *delay*.

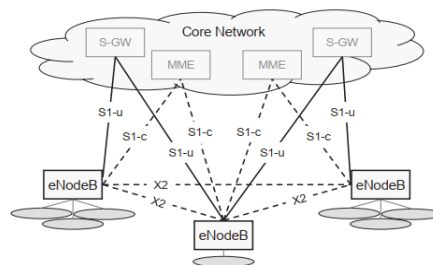
Penelitian [9] meneliti beberapa teknologi yang digunakan untuk mendukung komunikasi kereta api. Hasilnya teknologi LTE lebih baik dibandingkan dengan teknologi lainnya seperti GSM – R, TETRA, dan P25. Penelitian [10] merancang jaringan Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) 4G LTE untuk penumpang kereta cepat Jakarta – Surabaya jalur Cepu – Surabaya. Perancangan yang dilakukan memerlukan 19 site dengan masing – masing dua sel setiap site dengan *overlapping coverage* sebesar 1,7 km pada jari – jari *Remote Radio Unit (RRU)* dan *delay* trafik sebesar 0,0185 detik yang mampu untuk dapat melayani penumpang kereta cepat [10].

Tugas Akhir ini akan melakukan perancangan *backhaul* yang terdiri dari jaringan *backbone*, akses, dan *core network*. Jaringan *backbone* fiber optik menggunakan teknologi DWDM, jaringan akses optik menggunakan teknologi XG-PON1, serta teknologi EPC untuk *core network* LTE. Rancangan *backhaul* dapat mendukung layanan komunikasi LTE, mengatasi beban trafik, dan *delay* penumpang kereta cepat Jakarta – Surabaya berkecepatan 160 km/jam.

2. Dasar Teori dan Metodologi

2.1 Long Term Evolution

Long Term Evolution (LTE) adalah teknologi komunikasi seluler yang dikembangkan untuk paket data dan tidak mendukung layanan *circuit – switch* [11]. LTE diusulkan oleh 3rd *Generation Partnership Project (3GPP)* sebagai kelanjutan dari teknologi *High Speed Packet Access (HSPA)* yang juga dikenal sebagai teknologi 3.5G. Arsitektur jaringan LTE terbagi menjadi dua bagian yaitu, *radio-access network (RAN)* dan *core network* yang dapat dilihat pada Gambar 1 [11]. *Core network* pada LTE juga dikenal dengan istilah *Evolved Packet Core (EPC)* dan LTE RAN dikenal juga dengan *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*. Gabungan antara LTE RAN dan EPC disebut *Evolved Packet System (EPS)*. E-UTRAN bertanggung jawab untuk menangani seluruh fungsi yang berhubungan dengan radio seperti *scheduling*, *radio-resource handling*, *retransmission protocol*, *coding*, dan skema *multi-antenna*. Sedangkan EPC bertanggung jawab dengan fungsi selain *radio access* seperti *authentication*, *charging*, dan *setup connection* [11]. EPC terdiri dari beberapa komponen seperti *mobility management entity (MME)* yang berfungsi menangani *bearer* dengan *bearer* adalah suatu saluran yang menghubungkan *user equipment (UE)* dengan jaringan paket data, transisi *idle* atau aktif, dan kunci keamanan. *Serving-Gateway (S-GW)* berfungsi sebagai *user-plane node* yang menghubungkan EPC dengan LTE RAN. *Packet data network gateway (P-GW)* berfungsi menghubungkan EPC ke internet. *Policy and charging rules function (PCRF)* bertugas menangani *quality of service (QoS)* dan pembiayaan. *Home subscriber service (HSS)* berfungsi untuk menyimpan informasi pelanggan. Sedangkan untuk arsitektur LTE RAN hanya terdiri dari satu *node* yaitu *eNodeB* yang menangani fungsi radio dari satu atau beberapa *cell* [11].



Gambar 1. Arsitektur jaringan LTE [11]

2.2 Backhaul

Backhaul adalah elemen jaringan yang terletak diantara *eNodeB* dan elemen *core network* termasuk jaringan *backbone* yang menghubungkan antar sentral dan jaringan akses yang menghubungkan antara sentral dengan *eNodeB*. Elemen – elemen tersebut terhubung melalui beberapa *interface* yang akan dikirimkan dari *eNodeB* ke EPC seperti S1-U, S1-MME, X2-U, dan X2-C. *Interface* yang terpenting adalah trafik pengguna S1 *user plane* (U-plane), yang dikirimkan dari *eNodeB* ke S-GW dan P-GW, dan trafik kontrol S1 *control plane* (C-plane) antara *eNodeB* dan MME [12]. Persyaratan *delay* untuk backhaul bergantung kepada *end-to-end* (*e2e*) *delay* dari aplikasi pengguna dan *delay budget* yang ada pada *backhaul*. Tabel 1 [12] memberikan gambaran persyaratan *e2e* pada jaringan *backhaul* yang mengacu pada standar 3GPP TS23.203.

Tabel 1. Persyaratan *delay* dan *loss backhaul*

Plane	One Way Packet Delay		One Way Packet Delay Variation		Packet Loss Ratio	
	<i>e2e</i> Requirement	Backhaul Recommendation	<i>e2e</i> Requirement	Backhaul Recommendation	<i>e2e</i> Requirement	Backhaul Recommendation
U-Plane real time	50 ms	20 ms	± 10 ms	± 10 ms	10 ⁻³	10 ⁻⁴
U-Plane non-real time	300 ms	20 ms	none	none	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
C-Plane	100 ms	20 ms	none	none	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
M-Plane (of <i>eNodeB</i>)	-	100 ms	none	none	10 ⁻³	10 ⁻⁶

2.3 Evolved Packet Core

Dari jumlah pengguna dan trafik pengguna dapat dihitung jumlah elemen – elemen EPC. Jumlah HSS yang dibutuhkan dapat dicari menggunakan persamaan (1) [13]. Sedangkan untuk MME dapat dihitung berdasarkan beberapa pendekatan dengan mengambil nilai tertinggi dengan persamaan (2) [13]. Tf_c adalah trafik yang menuju ke MME yaitu trafik *control plane* S1-MME atau S1-C yang dapat dihitung menggunakan persamaan (4) [13] Jumlah S-GW dan P-GW dapat dihitung menggunakan persamaan (3) [13]

$$HSS_N = \frac{N_s}{S_{C-HSS}} \quad (1)$$

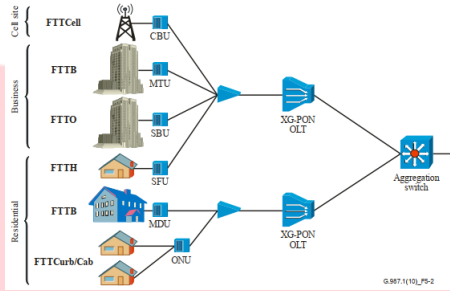
$$MME_N = \text{MAX} \left[\frac{N_s}{S_{C-MME}}; \frac{B}{B_C}; \frac{Tf_c}{Th_{C-MME}} \right] \quad (2)$$

$$S / P - GW_N = \text{MAX} \left[\frac{B}{B_C}; \frac{Tf_t}{Th_{C-S/P-GW}} \right] \quad (3)$$

$$Sig = \frac{N_s \times MS}{3600s} \quad (4)$$

2.4 XG-PON

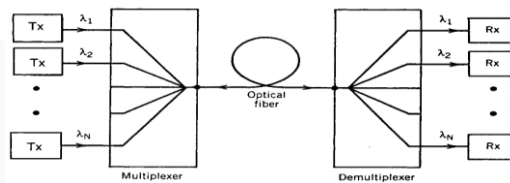
XG-PON dikeluarkan dengan standar dari ITU-G.987 dengan nama lain 10-gigabit-capable PON. XG-PON terbagi menjadi XG-PON1 dan XG-PON2 dimana XG-PON1 mampu mengirimkan data hingga 10 Gbps pada sisi *downstream* dan 2,5 Gbps pada sisi *upstream* atau biasa disebut NG-PON1, sedangkan XG-PON2 mampu mengirimkan data 10 Gbps baik pada sisi *downstream* maupun *upstream* dan sedang dikembangkan oleh ITU-T. XG-PON dapat digunakan untuk beberapa arsitektur jaringan, salah satunya adalah *fiber to the cell site* (FTTCell). Pada skema FTTCell *Optical Network Unit* (ONU) sebagai perangkat untuk mengubah sinyal optik ke sinyal listrik maupun sebaliknya dapat disebut *cell-site backhauling unit* (CBU). XG-PON dapat digunakan untuk jaringan *backhaul* seluler seperti 3G maupun 4G yang dapat dilihat pada Gambar 2 [14]. XG-PON dapat memberikan layanan *ethernet* untuk *point-to-point* maupun *point-to-multipoint* yang membuatnya cocok untuk digunakan sebagai teknologi *backhaul* LTE.



Gambar 2. Skema XG-PON [23]

2.5 Dense Wavelength Division Multiplexing

Dense wavelength division multiplexing (DWDM) merupakan teknologi *multiplexing* yang menggabungkan beberapa panjang gelombang berbeda kedalam satu fiber optik. Teknologi DWDM umumnya digunakan untuk komunikasi menggunakan kabel fiber optik untuk jarak jauh atau biasa disebut *long-haul communication*. DWDM merupakan pengembangan dari teknologi sebelumnya yaitu *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Teknologi DWDM ini serupa dengan teknologi *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM). Perbedaannya terletak pada spasi kanal CWDM yang lebih lebar dibandingkan dengan DWDM sehingga kanal CWDM yang tersedia lebih sedikit. Spasi kanal yang digunakan pada teknologi DWDM berdasarkan rekomendasi ITU-T G.694.1 adalah 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, dan 100 GHz. Teknologi DWDM bekerja pada panjang gelombang 1530 nm – 1625 nm. Jumlah panjang gelombang yang dapat ditransmisikan adalah 4,8,16,32, dan seterusnya. Gambar 3 [15] menunjukkan skema cara kerja dari WDM.



Gambar 3. Skema WDM [28]

2.6 Parameter Analysis

• **Rise Time Budget**

Rise-time budget merupakan metode dalam menentukan batasan dispersi cahaya pada suatu *link* serat optik. Degradasi total waktu transisi link digital untuk NRZ adalah tidak melebihi 70%, sedangkan untuk RZ tidak melebihi 35% dalam satu periode *bit*. Menghitung *rise-time budget* dapat dicari dengan persamaan (5) [16], σ_{ia} adalah dispersi intramodal yang terdiri dari dispersi *chromatic* (6) dan dispersi *waveguide* (7) [16], σ_{ie} adalah dispersi intermodal yang hanya terjadi pada jenis *multi-mode fiber*, sedangkan *single mode fiber* bernilai nol.

$$T_{sys} = \sqrt{T_{tx}^2 + \sigma_{ia}^2 + \sigma_{ie}^2 + T_{rx}^2} \tag{5}$$

$$\sigma_{ch} = \Delta\sigma \cdot L \cdot D_m \tag{6}$$

$$\sigma_{wg} = \Delta\sigma \cdot L \cdot D_{wg} \tag{7}$$

• **Link Power Budget**

Link Power budget atau *Power budget* didefinisikan sebagai total redaman yang dapat diterima dari suatu lintasan fiber optik mulai dari sumber hingga penerima. Tujuan *power budget* adalah untuk memastikan daya link tidak kurang dari yang dibutuhkan [16]. *Power budget* dapat dihitung menggunakan persamaan (8) [16], Kemudian perlu untuk menghitung daya terima oleh *photodetector* yang dapat dihitung menggunakan persamaan (9) [16].

$$\alpha_{tot} = L \cdot \alpha_f + N_c \cdot \alpha_c + N_s \cdot \alpha_s + S_p + SM \tag{8}$$

$$P_{rx} = P_{tx} - \alpha_{tot} \tag{9}$$

• **Signal to Noise Ratio**

Signal to Noise Ratio (SNR) adalah perbandingan tingkat daya sinyal dengan daya *noise* pada sistem yang dapat diekspresikan menggunakan persamaan (10) [16], I_p adalah *primary current* yang dapat dicari menggunakan persamaan (11) [16].

$$SNR = \frac{\frac{m^2}{2} \cdot I_p^2 \cdot M^2}{2 \cdot q \cdot (I_p + I_D) \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B_e + \frac{4 \cdot k_B \cdot T \cdot B_e}{RL}} \quad (10)$$

$$I_p = R \cdot P_{in} \quad (11)$$

- **Q-factor**

Q-factor merupakan nilai faktor kualitas yang menentukan baik atau buruk performansi sistem, Q-factor minimal yang dapat diterima untuk fiber optik adalah 6. Nilai Q-factor dapat dicari menggunakan persamaan (12) [16].

$$Q = \frac{10^{\frac{SNR}{20}}}{2} \quad (12)$$

- **Bit Error Rate**

Bit Error Rate (BER) adalah rasio perbandingan antara bit error dengan bit yang dikirimkan secara keseluruhan, BER dapat diekspresikan dengan persamaan (13) [16].

$$BER = \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (13)$$

- **Delay**

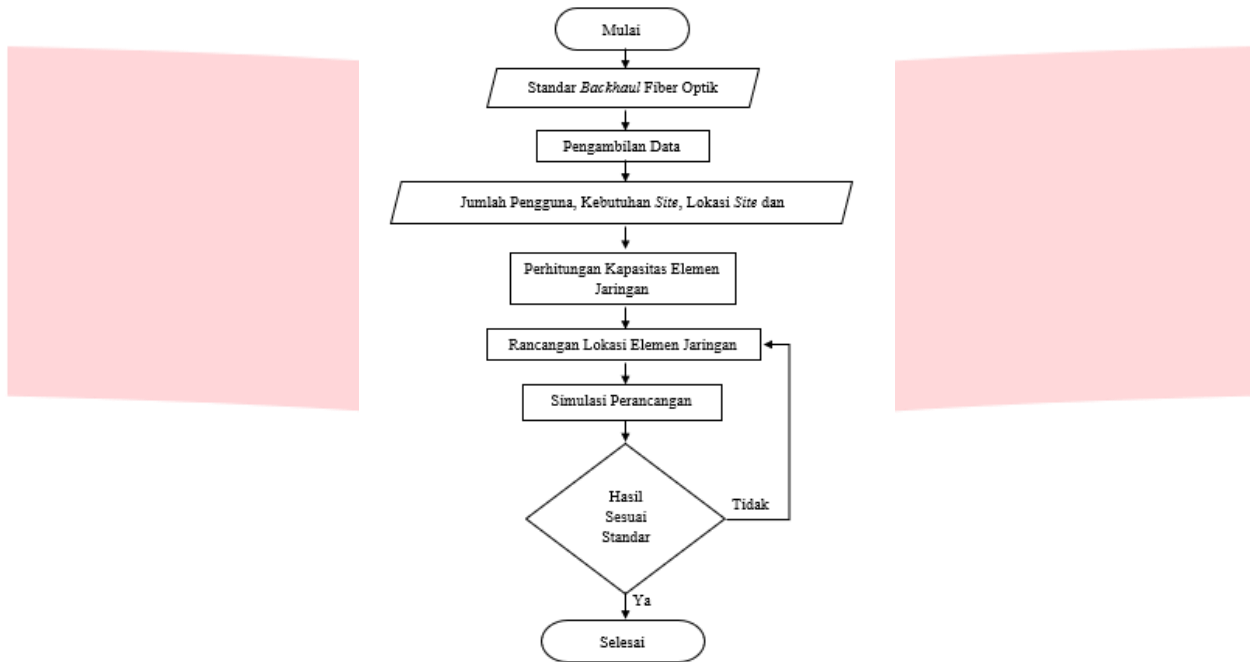
Delay atau latensi didefinisikan sebagai penundaan waktu yang dialami sistem dan menggambarkan waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan data dari sisi transmisi ke sisi penerima [17]. Delay bersifat penjumlahan dari setiap komponen – komponennya. Delay pada single mode fiber umumnya dipengaruhi oleh parameter effective group index of refraction (η_{eff}). Pada rekomendasi ITU-T G.652 η_{eff} untuk panjang gelombang 1310 nm adalah 1,4676 dan pada panjang gelombang 1550 nm adalah 1,4682 [17]. Kecepatan cahaya pada kabel fiber optik dapat dihitung dengan persamaan (14) [17]. delay sepanjang kabel optik dihitung menggunakan persamaan (15) [17]. Komponen lain yang dapat menambah delay adalah penguat optik. Komponen EDFA memiliki panjang sekitar 30 m yang menambah delay sebesar 147 ns [17]. Selain itu, transponder maupun muxponder memberikan delay sebesar 5-10 μs untuk setiap buahnya [17]. Terdapat, forward Error Correction (FEC) yang memberikan delay 15-150 μs bergantung dari algoritma yang digunakan, jumlah bit overhead, coding gain, dan waktu prosesnya [17]. Serialization delay atau network interface delay mendeskripsikan banyak waktu yang dibutuhkan untuk mengubah data bytes ke serial bit stream untuk ditransmisikan melalui kabel fiber optik. Pada data rate 2,5 Gbps dengan ukuran packet size 512 byte memberikan delay sebesar 27 μs , sedangkan data rate 10 Gbps dengan ukuran packet size 512 byte memberikan delay sebesar 0,4 μs .

$$V_\lambda = \frac{c}{\eta_{eff}} \quad (14)$$

$$\Delta_\lambda = \frac{L}{V_\lambda} \quad (15)$$

3. Perancangan Jaringan Backhaul

Terdapat beberapa tahapan dalam merancang jaringan backhaul. Pertama memperhatikan standar ITU-T G.987, ITU-T G.691, 3GPP TS23.203. Kemudian menghitung jumlah elemen jaringan yang diperlukan. Selanjutnya merancang posisi elemen backhaul seperti EPC, site, backbone dan akses menggunakan google earth. Setelah itu, melakukan perhitungan dan simulasi parameter backhaul fiber optik dari rancangan tersebut. Kemudian dari nilai parameter tersebut dibandingkan dengan standar yang telah disepakati, jika nilainya tidak sesuai, maka perlu dilakukan perancangan ulang. Apabila hasil sudah sesuai dengan standar, maka rancangan tersebut dapat digunakan. Adapun skema dari model sistem yang dirancang dalam Tugas Akhir ini tertera pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir perancangan

3.1 Perhitungan Jumlah EPC

Hasil perhitungan menggunakan persamaan (1), (2), (3) didapatkan jumlah masing – masing komponen EPC seperti pada Tabel 2. Dapat dilihat pada tabel tersebut bahwa untuk penumpang kereta cepat yang berjumlah 1000 orang, membutuhkan hanya masing – masing 1 buah elemen. Elemen EPC seperti HSS, MME, dan S/P-GW terletak dalam satu *rack* yang sama.

Tabel 2. Hasil perhitungan kapasitas EPC

Perangkat	Keterangan	Kapasitas	Jumlah Elemen
HSS	Berdasarkan <i>User</i>	0,000037036	1
MME	Berdasarkan <i>Subscriber</i>	0,0001	1
	Berdasarkan <i>Bearer</i>	0,0001	1
	Berdasarkan <i>Throughput</i>	0,000001543	1
S/P-GW	Berdasarkan <i>Bearer</i>	0,0001	1
	Berdasarkan <i>Throughput</i>	0,00222	1

3.2 Hasil Perancangan

Perancangan dibuat berdasarkan site yang telah dirancang peneliti [10], jalur *backbone* yang melintang sepanjang jalur kereta Surabaya Pasar Turi – Cepu, dan jumlah komponen EPC yang diperlukan yaitu satu buah dengan asumsi peletakan EPC berada di STO Surabaya. Hasil perancangan dapat dilihat pada Gambar 5. Pada gambar tersebut dapat dilihat terdapat 5 buah sentral, 5 buah ODC yang didalamnya terdapat *splitter*, dan maksimal 4 site masing – masing STO dengan mempertimbangkan jaraknya. Jarak dari perancangan dapat dilihat pada tabel 3(a) untuk jaringan *backbone* dan tabel 3(b) untuk jaringan akses.



Gambar 5. Rancangan jaringan *backhaul*

Tabel 3. Jarak (a) Link akses (b) link *backbone*

No	Backbone Link	Jarak (km)
1	Surabaya - Lamongan	45.9
2	Lamongan - Babat	29.5
3	Babat - Bojonegoro	36.9
4	Bojonegoro - Cepu	37.5

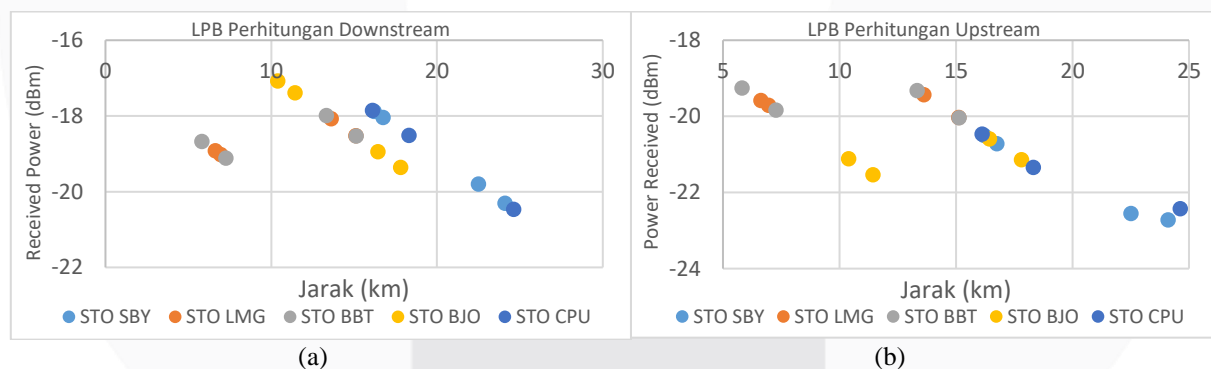
No	Asal STO	Site Tujuan	Total Jarak (km)
1	STO SBY	Site SBY395MM1	22.5
2		Site 12	16.2
3		Site 11	16.75
4		Site 10	24.1
5	STO LMG	Site GSK005MM1	16.621
6		Site LMG025ML	7.656
7		Site 9	7.293
8		Site 8	14.971
9	STO BBT	Site 7	14.663
10		Site 6	6.391
11		Site 5	7.997
12		Site 4	16.643
13	STO BJO	Site 3	17.81
14		Site 2	10.39
15		Site BJO014MM1	11.43
16		Site BJO009ML	16.43
17	STO CPU	Site 1	24.62
18		Site BJO069MM1	16.11
19		Site BJO137MM1	18.31

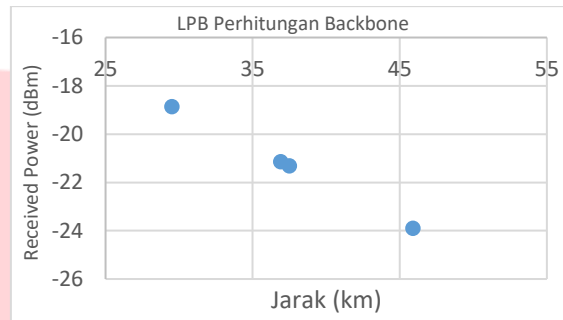
3.3 Hasil Perhitungan Parameter

Parameter LPB, *Q-factor*, BER, RTB, dan *delay* dihitung berdasarkan nilai terendah rancangan pada Gambar 5. Link akses *downstream* memiliki nilai LPB, *Q-factor*, BER, RTB terendah pada link terjauhnya yaitu STO Cepu – Site 1 sepanjang 24,62 km dengan nilai LPB sebesar -20,466 dBm, *Q-factor* 7.71929529906461, BER $5,94 \times 10^{-15}$, RTB 0.0460977867828442 ns dan *delay* 0.29129027999992801456 ms. Sedangkan pada link akses *upstream* memiliki nilai LPB, *Q-factor*, BER, dan RTB terendah dengan nilai LPB sebesar -22,72 dBm, *Q-factor* 7.45170556280097, BER $4,69 \times 10^{-14}$, RTB 0.046097828 ns dan *delay* 0.29124104002119799439 ms. Pada link *backbone* memiliki nilai LPB, *Q-factor*, BER, dan RTB terendah pada link terjauhnya yaitu STO Surabaya – STO Lamongan sepanjang 45,9 km dengan nilai LPB sebesar -23,9 dBm, *Q-factor* 7.96754011031568, BER $8,22 \times 10^{-16}$, RTB 0.046097939 ns, dan *delay* 0.39543459999986502185 ms. *Delay* paling besar untuk link *downstream* adalah link STO Surabaya – Site 1 sebesar 1,707611 ms. Sedangkan *delay* paling besar untuk link *upstream* adalah link Site 1 – STO Surabaya sebesar 1,707562 ms.

4. Analisis Perancangan dan Simulasi

4.1 Analisis LPB Perancangan Berdasarkan Perhitungan



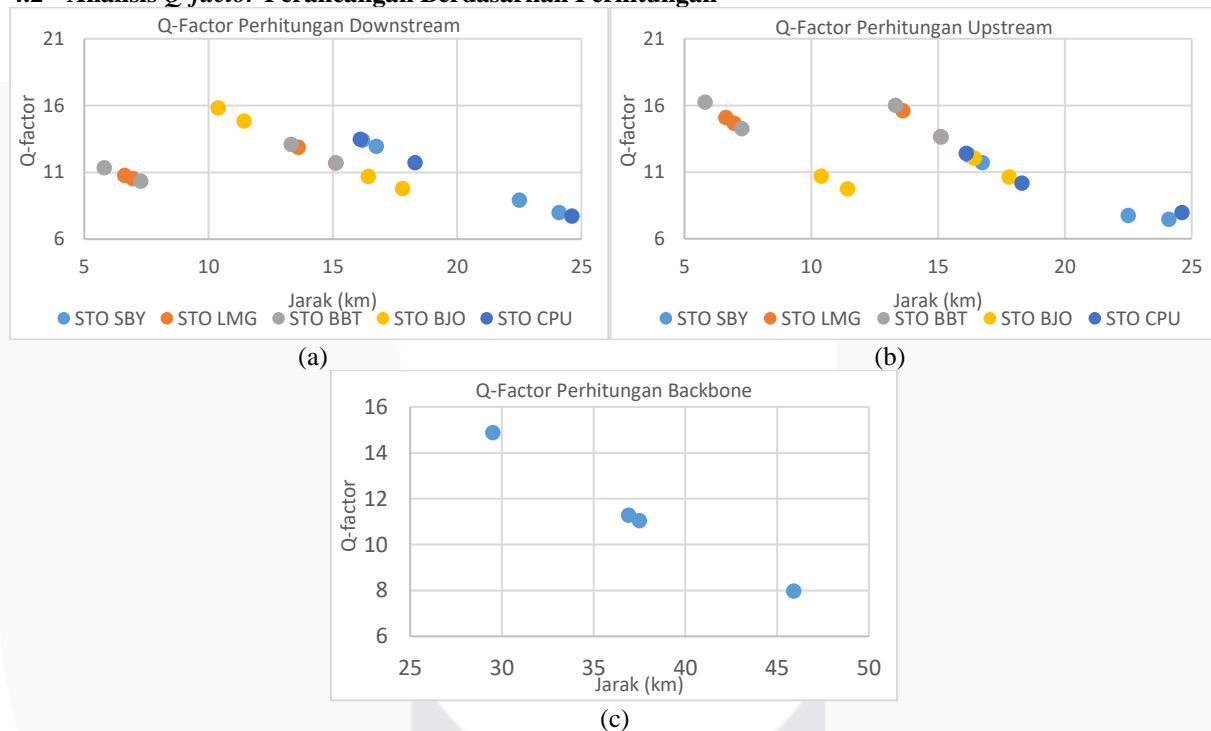


(c)

Gambar 6. LPB perhitungan (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

Berdasarkan persamaan (8) dan (9). Hasil dari perhitungan LPB ditunjukkan oleh Gambar 6. Nilai LPB terendah pada link akses *downstream* diakibatkan jarak link yang lebih jauh dibandingkan link akses *downstream* site lain. Pada link akses *upstream* nilai LPB terendah diakibatkan karena jarak yang jauh dan daya transmit yang berbeda. Sedangkan jarak terdekat link akses *upstream* dan *downstream* pada STO BBT dan STO LMG memiliki LPB yang cukup rendah karena ditambahkan perangkat *attenuator*. LPB link *backbone* mendapatkan nilai terendahnya akibat jarak yang lebih jauh dibanding link *backbone* lainnya. Namun, seluruh link pada perhitungan matematis memenuhi standar LPB yaitu -28 dBm [15]

4.2 Analisis Q-factor Perancangan Berdasarkan Perhitungan



(a)

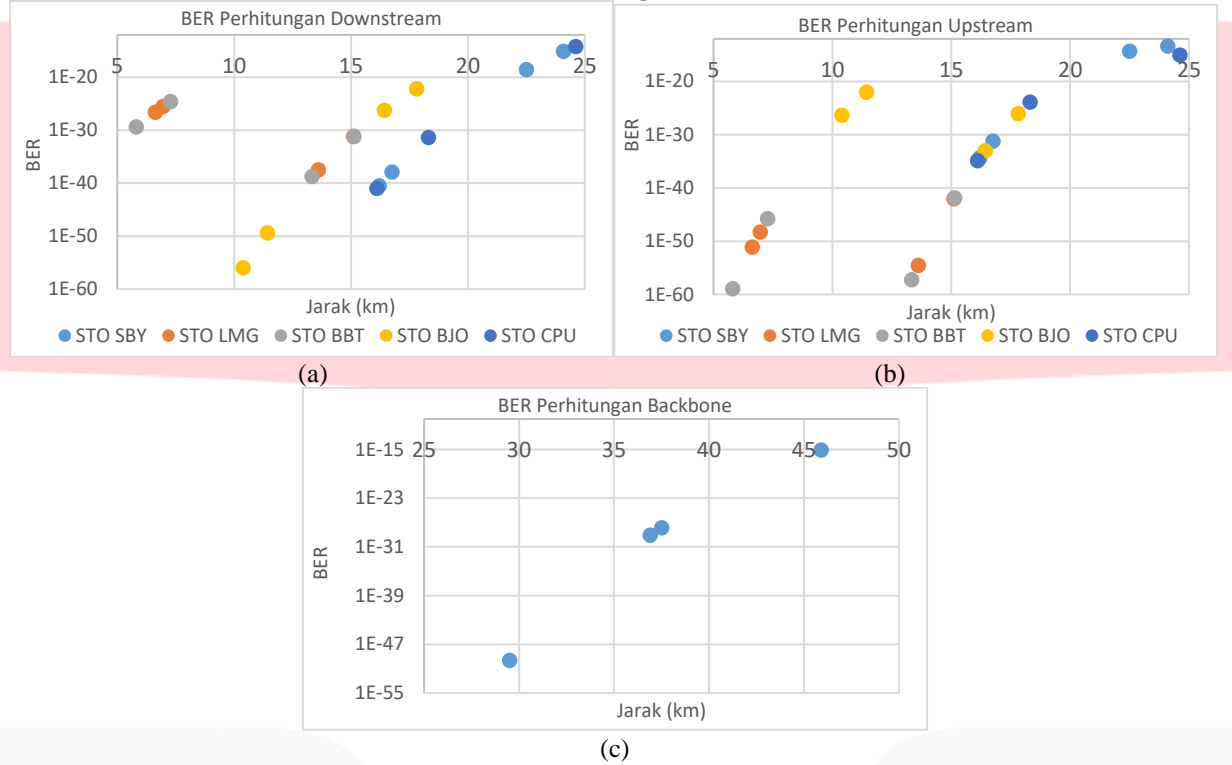
(b)

(c)

Gambar 7. Q-factor perhitungan (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

SNR perlu dihitung terlebih dahulu menggunakan persamaan (10) kemudian nilai *Q-factor* dihitung menggunakan persamaan (12). Hasil perhitungan matematis *Q-factor* dapat dilihat pada Gambar 7. Nilai *Q-factor* dipengaruhi oleh nilai LPB dan SNR. Nilai *Q-factor* yang didapatkan pada hasil perhitungan berbanding lurus dengan nilai SNR dan LPB. Pada link akses *downstream* nilai terendah terjadi karena dipengaruhi oleh jarak link yang terjauh jika dibandingkan dengan link akses *downstream* lainnya. Pada link akses *upstream* nilai terendah didapat karena jarak yang jauh dan perbedaan daya transmit. Jika diamati pada jarak terdekat link akses *upstream* dan *downstream* nilai *Q-factor* cukup kecil karena terdampak oleh *attenuator*. Pada sisi *backbone* nilai *Q-factor* terkecil didapatkan dari jarak link *backbone* yang terjauh.

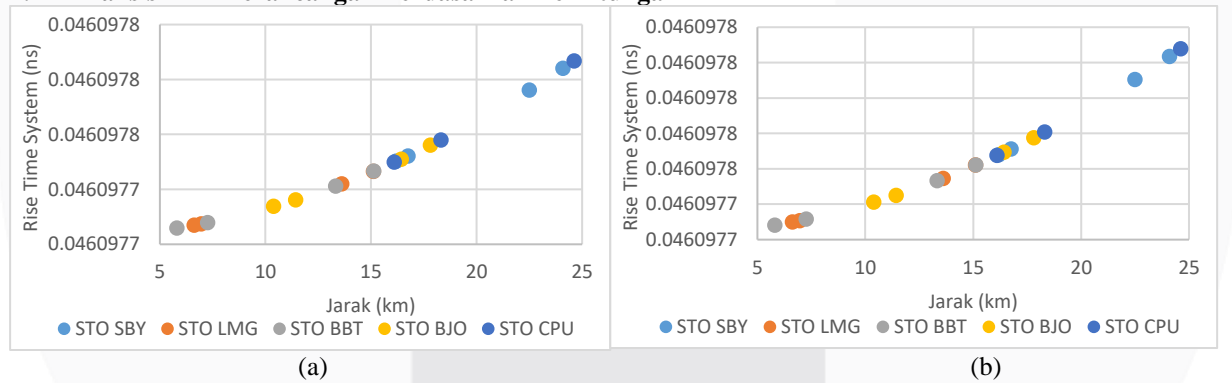
4.3 Analisis BER Perancangan Berdasarkan Perhitungan

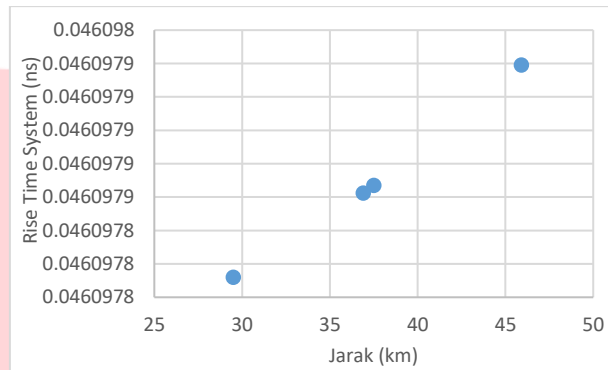


Gambar 8. BER perhitungan (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

BER dapat dihitung menggunakan persamaan (13). Hasil perhitungan BER dapat dilihat pada Gambar 8. Nilai BER berbanding terbalik dengan nilai *Q-factor*. Pada link akses *downstream* nilai BER terbesar terjadi karena jaraknya yang paling jauh diantara link akses *downstream* lainnya. Sedangkan, nilai BER terbesar pada link akses *upstream* terjadi karena jarak yang jauh dan perbedaan daya transmit. Pada jarak terdekat link akses *upstream* dan *downstream* nilai BER cukup besar dikarenakan pengaruh penggunaan *attenuator*. Pada link *backbone* nilai terbesar didapatkan karena pengaruh jarak yang paling jauh diantara link *backbone* lainnya. Namun, seluruh link memenuhi standar nilai BER yaitu 10^{-12} [15].

4.4 Analisis RTB Perancangan Berdasarkan Perhitungan



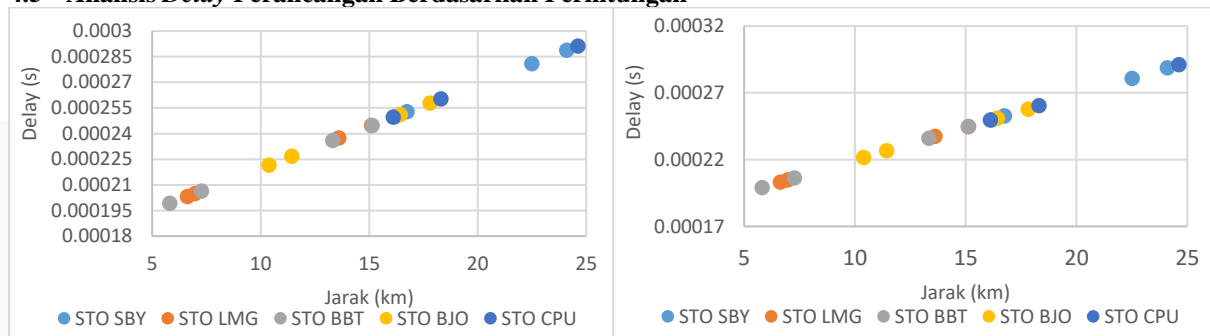


(c)

Gambar 9. RTB perhitungan (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

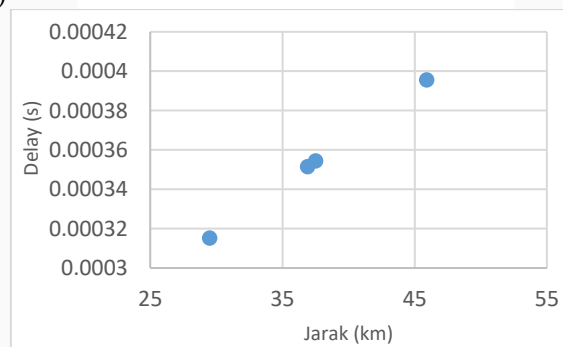
Hasil perhitungan RTB dapat dilihat pada Gambar 9. Besarnya RTB berbanding lurus dengan jarak. Semakin jauh jarak link optik, maka akan semakin besar RTB. Nilai RTB terbesar yang dirasakan pada link terjauh diakibatkan karena jaraknya yang paling jauh diantara link lain. Namun, nilai RTB setiap link pada rancangan jaringan *backhaul* masih berada dalam standar.

4.5 Analisis Delay Perancangan Berdasarkan Perhitungan



(a)

(b)



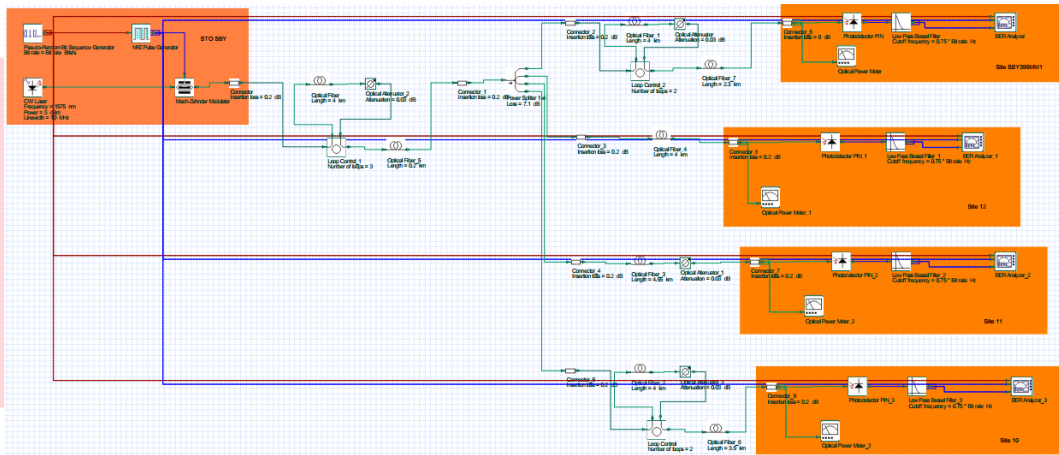
(c)

Gambar 10. *Delay* perhitungan (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

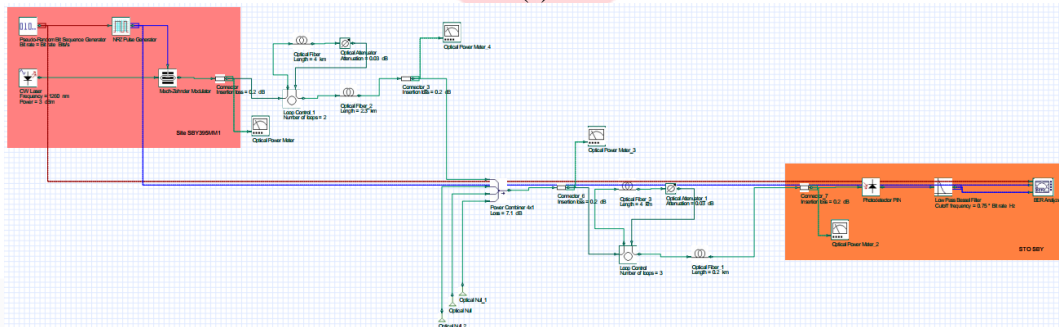
Hasil perhitungan *delay* dapat dilihat pada Gambar 10. Besarnya *delay* berbanding lurus dengan jarak. Semakin jauh jarak link optik, maka akan semakin besar *delay*. Faktor *delay* yang paling berpengaruh adalah panjang kabel optik dan panjang gelombang yang digunakan. *Delay* jaringan *backhaul* dihitung pada *site* terjauh hingga EPC (Site 1 – STO SBY) dengan nilai *delay* untuk *downstream* 1,707611 ms dan *upstream* 1.707562 ms. Nilai *delay* pada jaringan *backhaul* masih berada didalam standar 3GPP TS23.203

4.6 Model Sistem Simulasi

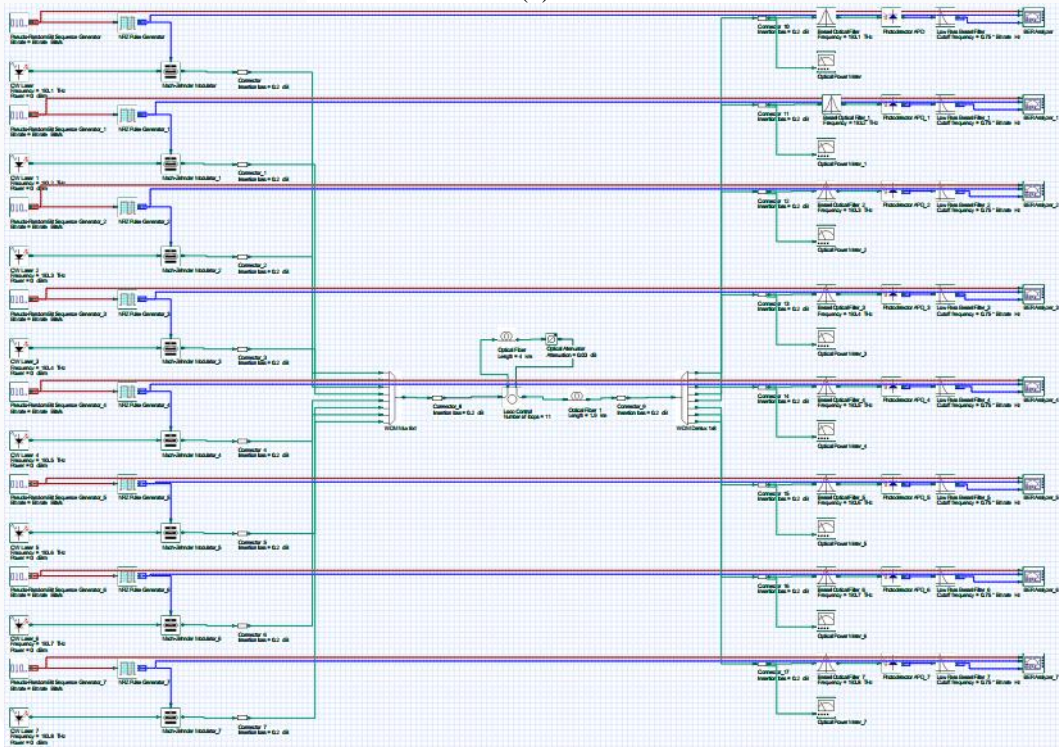
Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak optik. Model simulasi pada link *backhaul* terbagi menjadi tiga bagian, link akses *downstream*, link akses *upstream* dan link *backbone*. *Setup* simulasi sistem pada perangkat lunak optik dapat dilihat pada Gambar 11.



(a)



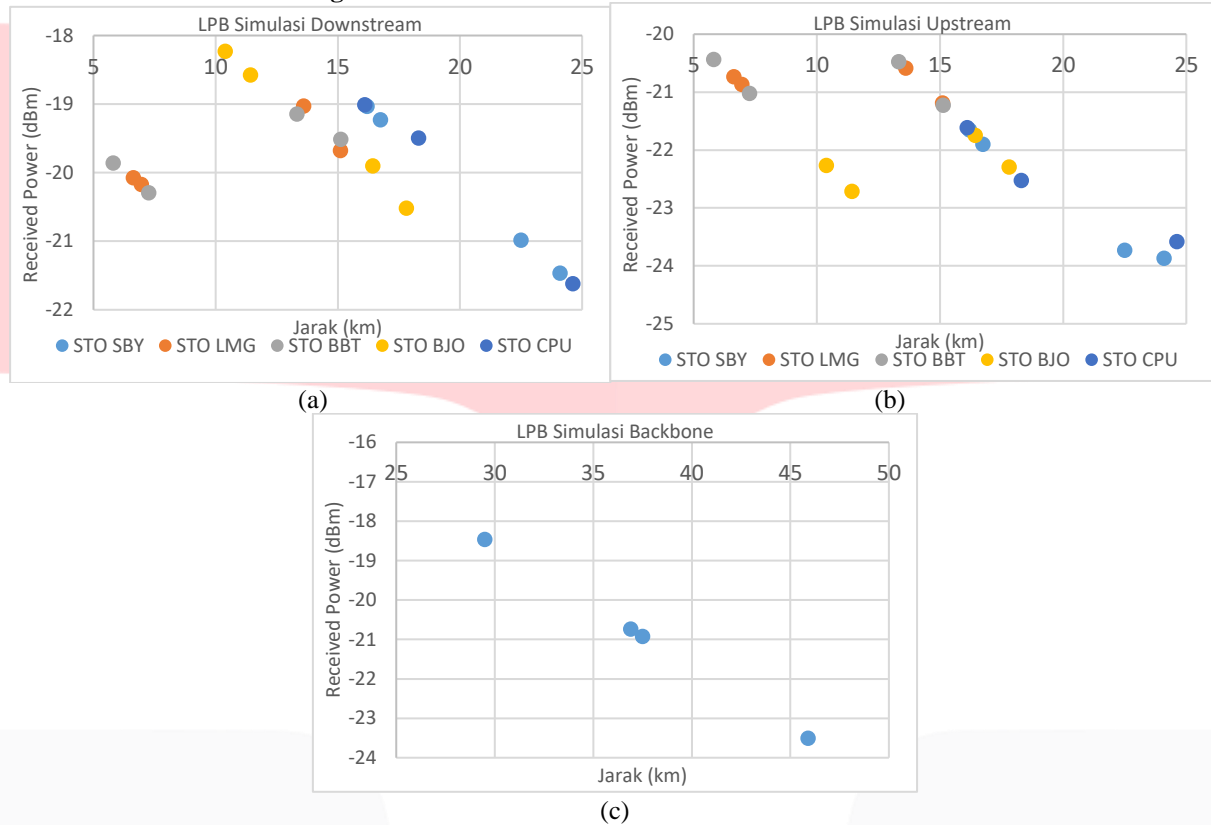
(b)



(c)

Gambar 11. Setup simulasi (a) link akses downstream (b) link akses upstream (c) link backbone

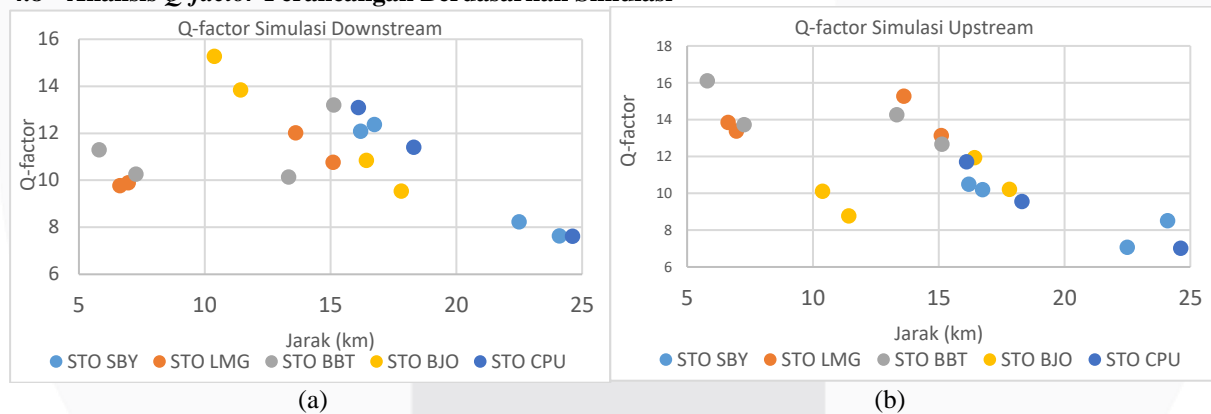
4.7 Analisis LPB Perancangan Berdasarkan Simulasi

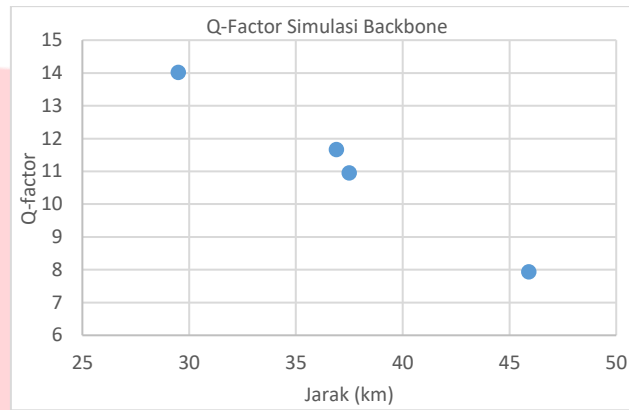


Gambar 12. LPB simulasi (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

Pada simulasi LPB, digunakan komponen *Optical Power Meter* untuk membaca daya terima pada *photodetector*. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 12. Nilai LPB terendah untuk link akses *downstream* adalah -21.62 dBm, link akses *upstream* terendah -23.873 dBm, dan untuk link *backbone* terkecil bernilai -23.502 dBm pada link STO SBY – STO LMG. Analisis pada simulasi LPB yang terjadi serupa dengan analisis pada perhitungan LPB.

4.8 Analisis Q-factor Perancangan Berdasarkan Simulasi



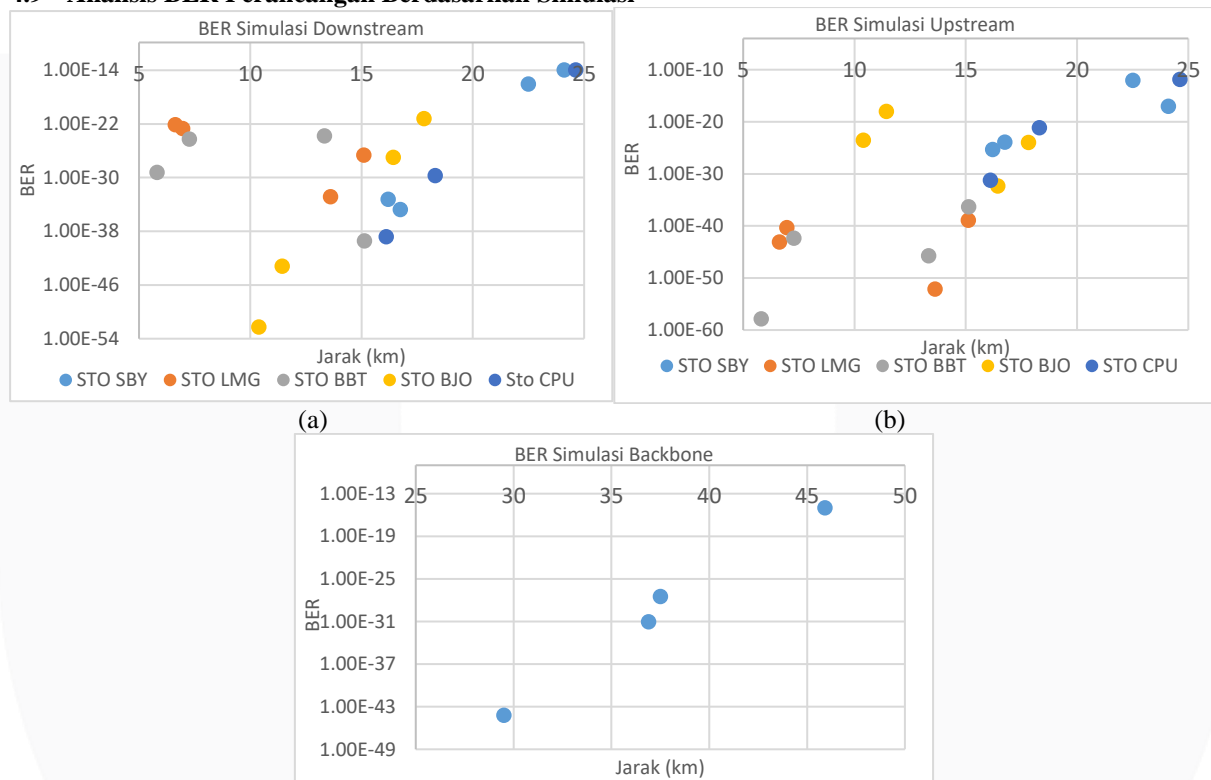


(c)

Gambar 13. *Q-factor* simulasi (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

Simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak optik membutuhkan komponen BER analyzer untuk menampilkan nilai *Q-factor*. Hasil simulasi *Q-factor* ditunjukkan oleh Gambar 13. Nilai *Q-factor* pada simulasi link akses *downstream* memiliki nilai terkecil 7.62644, sedangkan nilai terkecil untuk link akses *upstream* adalah 7.00755 dan 7.93476 merupakan nilai terkecil untuk link *backbone* STO SBY – STO LMG. Analisis pada simulasi LPB yang terjadi serupa dengan analisis pada perhitungan *Q-factor*.

4.9 Analisis BER Perancangan Berdasarkan Simulasi



(c)

Gambar 14. BER simulasi (a) link akses *downstream* (b) link akses *upstream* (c) link *backbone*

Simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak optik dapat mengukur nilai BER menggunakan komponen BER analyzer. Hasil simulasi BER ditunjukkan oleh Gambar 14. Nilai BER terbesar pada link akses *downstream* adalah $1,11 \times 10^{-14}$. Pada link akses *upstream* nilai BER terbesar adalah $1,21 \times 10^{-12}$. Pada link *backbone* nilai BER terbesar berada pada link terjauhnya yaitu STO SBY – STO LMG sebesar $1,04 \times 10^{-15}$. Analisis pada simulasi BER yang terjadi serupa dengan analisis pada perhitungan BER.

5. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dari hasil perancangan jaringan *backhaul* serat optik untuk komunikasi LTE penumpang kereta cepat Jakarta – Surabaya sub Cepu - Surabaya diambil beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Nilai *rise time budget* (RTB) pada link akses *downstream* dan link akses *upstream* memiliki nilai terendah pada link STO CPU – Site 1 sebesar 0.0460977867828442 ns dan 0.0460978278901992 ns, sedangkan pada link *backbone* nilai terendah pada link STO SBY – STO LMG sebesar 0.0460979391472862 ns. Nilai parameter RTB untuk link akses *downstream*, *upstream* dan *backbone* telah memenuhi standar sehingga rancangan dapat digunakan.
2. Nilai *delay* terbesar pada jaringan *backhaul* didapatkan pada link *eNodeB* Site 1 – STO SBY (EPC) dengan *delay* terpenuhi pada sisi *downstream* yaitu 1,707611 ms, sedangkan pada sisi *upstream* 1.707562 ms. Nilai parameter *delay* pada perancangan jaringan *backhaul* telah memenuhi standar yaitu <20 ms sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam merealisasikan jaringan *backhaul*.
3. Jaringan link akses *downstream* menggunakan XG-PON1 mendapatkan nilai terendah untuk parameter *link power budget* (LPB), *Q-factor*, dan *bit error rate* (BER) dengan nilai LPB -21.62 dBm, *Q-factor* 7.62644, dan BER $1,11 \times 10^{-14}$. Nilai terendah pada jaringan link akses *downstream* telah memenuhi standar parameter sehingga rancangan dapat direalisasikan
4. Jaringan link akses *upstream* menggunakan XG-PON1 mendapatkan nilai terendah untuk parameter LPB, *Q-factor*, dan BER dengan nilai LPB -23,873 dBm, *Q-factor* 7,00755, dan BER $1,21 \times 10^{-12}$. Nilai terendah pada jaringan link akses *upstream* telah memenuhi standar parameter sehingga rancangan dapat direalisasikan.
5. Jaringan link *backbone* menggunakan SDH STM-64 DWDM mendapatkan nilai terendah untuk parameter LPB, *Q-factor*, dan BER pada link STO SBY – STO LMG dengan nilai LPB -23,502 dBm, *Q-factor* 7,93476, dan BER $1,04 \times 10^{-15}$. Nilai terendah pada jaringan *backbone* telah memenuhi standar parameter sehingga rancangan dapat direalisasikan

6. Daftar Pustaka:

- [1] A. Aziz, “Efek Domino Bagasi Berbayar: Ganggu Pariwisata, Hotel hingga UMKM,” 21 Januari 2019. [Online]. Available: <https://tirto.id/efek-domino-bagasi-berbayar-ganggu-pariwisata-hotel-hingga-umkm-dfub>. [Accessed 21 Oktober 2019].
- [2] F. Pebrianto, “4 Tahun Terakhir Jumlah Penumpang Kereta Melonjak 145 Juta Orang,” Maret 2019. [Online]. Available: <https://bisnis.tempo.co/read/1181167/4-tahun-terakhir-jumlah-penumpang-kereta-melonjak-145-juta-orang/full&view=ok>. [Accessed 28 September 2019].
- [3] B. P. Statistik, “Jumlah Penumpang Kereta Api 2006-2019 (Ribu Orang),” 2019. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/815>. [Accessed 21 Oktober 2019].
- [4] A. A. Muiz, “PT KAI Akan Manjakan Penumpang Kereta Dengan Layanan Internet Selama Perjalanan,” Februari 2019. [Online]. Available: <https://suryamalang.tribunnews.com/2019/02/26/pt-kai-akan-manjakan-penumpang-kereta-dengan-layanan-internet-selama-perjalanan>. [Accessed 28 September 2019]
- [5] B. Clinton, “Telkomsel Siapkan Jaringan di Jalur Kereta ke Bandung dan Jawa Tengah,” Mei 2019. [Online]. Available: <https://tekno.kompas.com/read/2019/05/28/13090037/telkomsel-siapkan-jaringan-di-jalur-kereta-ke-bandung-dan-jawa-tengah>. [Accessed 28 September 2019].
- [6] M. C. Anwar, “Sah! Proyek Kereta Cepat JKT-SBY Dimulai,” September 2019. [Online]. Available: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20190924193940-4-101962/sah-proyek-kereta-cepat-jkt-sby-dimulai>. [Accessed 28 September 2019].
- [7] C. Indonesia, “Tiket Kereta Semi Cepat Jakarta-Surabaya Dipatok Rp450 Ribu,” September 2019. [Online]. Available: <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20190925070304-92-433673/tiket-kereta-semi-cepat-jakarta-surabaya-dipatok-rp450-ribu>. [Accessed 28 September 2019].
- [8] U. K. Usman and et.al, *Fundamental Teknologi Seluler Long Term Evolution (LTE)*, Bandung: Rekayasa Sains, 2012.
- [9] A. Bertout and E. Bernard, “Next Generation of Railways and Metros Wireless Communication Systems,” in *ASPECT*, 2012.
- [10] T. Irawan, *Perancangan Jaringan Komunikasi LTE Penumpang Kereta Cepat 160 km/Jam Jakarta-Surabaya Jalur Cepu - Surabaya*, Bandung: Universitas Telkom, 2019.
- [11] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Skold, *4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, vol. III, United Kingdom: Elsevier, 2016.
- [12] E. Metsala and J. Salmelin, *LTE Backhaul Planning and Optimization*, United Kingdom: Wiley, 2015.
- [13] B. Septianto, *Perencanaan Evolved Packet Core Network 4G LTE di Bandung*, Bandung: Universitas Telkom, 2015.
- [14] ITU-T, “10-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (XG-PON): General Requirements,” in *ITU-R G Series: G.987.1*, 2016.
- [15] S. Kartalopoulos, *Next Generation Intelligent Optical Networks From Access to Backbone*, New York, USA: Springer, 2008.

[16] G. Keiser, Optical Fiber Communication, McGraw-Hill, 4th ed. 1991.

[17] S. Sandis, B. Vjaceslavs and I. Girts, "Latency causes and reduction in optical metro networks (INVITED)," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, San Francisco, California, 2014

