

DISERTASI

**SURVIVABILITY JARINGAN MULTI-LAYER PADA
ELASTIC OPTICAL NETWORK**

*Survivability of Multi-Layer Network in
Elastic Optical Network*

**RIDWANSYAH
D053181001**



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



PENGAJUAN DISERTASI

SURVIVABILITY JARINGAN MULTI-LAYER PADA ELASTIC OPTICAL NETWORK

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

ttd

**RIDWANSYAH
D053181001**

Kepada



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

DISERTASI

SURVIVABILITY JARINGAN MULTI-LAYER PADA ELASTIC OPTICAL NETWORK

RIDWANSYAH
D053181001

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam
rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
pada tanggal 5 Desember 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



Prof. Dr. Ir. H. Syafruddin Syarif, M.T.
NIP. 196111251988021001

Co-Promotor



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM.
NIP. 196910261994122001

Co-Promotor



Dr. Eng. Ir. Wardi, S.T., M.Eng.
NIP. 197208281999031003

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Ihamad Isran Ramli, ST., MT., IPM. ASEAN Eng.
IP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi S3
Teknik Elektro



Prof. Dr. Ir. H. Andani Achmad, M.T.
NIP. 19601231 198703 1 022



Optimized using
trial version
www.balesio.com

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Ridwansyah

Nomor Mahasiswa : D053181001

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “*Survivability Jaringan Multi-Layer pada Elastic Optical Network*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Ir. Syafruddin Syarif, MT. selaku Promotor, Dr.Eng. Ir. Dewiani. MT. selaku Co-Promotor 1, dan Dr.Eng. Ir. Wardi, ST., M.Eng. selaku Co-Promotor 2. Karya ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau kutipan dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT), Volume 2021, Halaman 146-151, DOI 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530805) sebagai artikel dengan judul “Minimizing the additional costs due to Router Outage in IP-over-EON using Adaptive Routing” dan di Jurnal (International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems, Volume 14, Nomor 10, Halaman 869-880, DOI 10.32985/ijeces.14.8.5) sebagai artikel dengan judul “Survivability with Adaptive Routing and Reactive Defragmentation in IP-over-EON after A Router Outage”. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, Desember 2023

Yang menyatakan



Optimized using
trial version
www.balesio.com



Ridwansyah

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, shalawat salam dan taslim kepada baginda Rasulullah SAW, alhamdulillah penulisan laporan disertasi dengan judul “*Survivability Jaringan Multi-Layer pada Elastic Optical Network*” dapat penulis susun dan selesaikan dengan baik.

Proses penyusunan laporan hasil penelitian ini penuh tantangan, dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. H. Syafruddin Syarif, MT. selaku Promotor, Dr.Eng. Ir. Dewiani. MT. IPM selaku Co-Promotor 1, dan Dr.Eng. Ir. Wardi, ST., M.Eng. selaku Co-Promotor 2 yang telah meluangkan waktu sehingga penulisan laporan hasil disertasi ini dapat selesai dengan baik.
2. Prof. Dr. Ir. H. Andani Achmad, MT., Prof. Dr.Eng. Ir. Syafaruddin, ST., M.Eng. IPU, Prof. Dr.Eng. Intan Sari Areni, ST., MT., dan Dr. Merna Baharuddin, ST., M.Tel.Eng. sebagai komisi tim penguji internal, serta Prof. Dr. Ir. Nana Rachmana Syambas, M.Eng. sebagai penguji eksternal.
3. Rektor Universitas Hasanuddin Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., Dekan Fakultas Teknik UNHAS Bapak Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Irsan Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN Eng. beserta para wakil dekan, Ketua Departemen Teknik Elektro UNHAS Ibu Dr.Eng. Ir. Dewiani. MT. IPM., Ketua Program Studi Doktor Ilmu Teknik Elektro UNHAS Bapak Prof. Dr. Ir. H. Andani Achmad, MT., dan seluruh dosen Teknik Elektro UNHAS, serta seluruh staf Teknik Elektro UNHAS yang selalu memberikan pelayanan yang menyenangkan selama proses pendidikan penulis.
4. Rektor Universitas Negeri Makassar Bapak Prof. Dr. Ir. H. Husain Syam, M.TP., IPU., ASEAN Eng., Dekan Fakultas Teknik UNM Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Yahya, M.Kes., M.Eng., IPU., ASEAN Eng., yang telah memotivasi dan mengizinkan penulis untuk melanjutkan studi. Para Wakil rektor UNM, Wakil Dekan FT UNM, Ketua Jurusan Pendidikan Teknik Elektronika FT UNM Bapak Dr. Supriadi. MT., dan rekan sejawat serta para kependidikan FT UNM atas doa dan dukungannya selama ini.



5. Teman mahasiswa program S3 Teknik Elektro UNHAS yang senantiasa memberikan bantuan dan dukungan terhadap penulis.

Ucapan terima kasih yang tidak terhingga kepada kedua orang tua tercinta Bapak (alm) Ir. H. Mustakin Rauf, dan Ibu (alm) Hj. Trisnawaty, keluarga saya Istri Hj. Nailah Kartika, ST., MM., dan Ananda Muhammad Fathurrahman Ridwansyah, saudara-saudara dan para kerabat yang telah memberikan semangat, dukungan dan terutama doanya dalam pencapaian ini. Insya Allah proses yang panjang ini memberikan keberkahan dan menjadi amal jariah untuk semuanya.

Penulis telah berusaha maksimal dalam menyusun laporan disertasi penelitian ini, jika masih terdapat kekurangan, saran dan masukan senantiasa penulis harapkan demi kesempurnaan penelitian ini dan khususnya pengembangan ilmu pengetahuan di masa yang akan datang.

Penulis tidak lupa mengucapkan permohonan maaf jika terdapat salah kata, *wabillahi taufiq wal hidayah wassalamu alaikum warahmatullahi wabarakatuh.*

Penulis
Ridwansyah



ABSTRAK

RIDWANSYAH. *Survivability Jaringan Multi-Layer pada Elastic Optical Network* (dibimbing oleh **Syafruddin Syarif, Dewiani, Wardi**)

Jaringan IP-over-*elastic optical network* (EON) menjadi solusi yang menjanjikan untuk mendukung permintaan bandwidth yang terus meningkat. Namun, jaringan IP-over-EON rentan terhadap berbagai kegagalan, sehingga masalah *survivability* jaringan menjadi faktor penting bagi operator. *Survivability* merupakan kemampuan jaringan untuk melakukan konfigurasi ulang dan memulihkan trafik yang terganggu akibat sebuah kegagalan. Kegagalan pada jaringan IP-over-EON dapat disebabkan tidak hanya oleh terpotongnya kabel fiber optik di layer EON tetapi juga oleh kegagalan router di layer IP. Sebuah kegagalan router mengakibatkan beberapa trafik yang transit di router tersebut menjadi terkena dampak. Mekanisme *multi-layer restoration* (MLR) dapat digunakan untuk memulihkan trafik terdampak dengan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya jaringan eksisting yang masih tersedia setelah kegagalan terjadi. Penelitian ini mengembangkan teknik *adaptive routing* dan *reactive hitless defragmentation* untuk memulihkan semua trafik terdampak setelah terjadinya sebuah kegagalan router. Teknik *adaptive routing* digunakan untuk menghasilkan pilihan jalur terbaik yang mengoptimalkan penggunaan kapasitas cadangan dari *lightpath* eksisting, sehingga konfigurasi ulang *lightpath* dapat diminimalkan. Sementara itu, teknik *reactive hitless defragmentation* bertujuan untuk meminimalkan penyiapan *lightpath* baru. Teknik *reactive hitless defragmentation* diproses saat ekspansi spektrum dari *lightpath* eksisting yang dimanfaatkan untuk memulihkan trafik terdampak terhalang oleh spektrum tetangga. Hasil simulasi menggunakan dua kondisi trafik menunjukkan bahwa teknik yang dikembangkan dapat meminimalkan terjadinya konfigurasi ulang *lightpath* dan penyiapan *lightpath* baru.

Kata kunci: *survivability, adaptive routing, reactive hitless defragmentation, kegagalan router, IP-over-EON*



ABSTRACT

RIDWANSYAH. *Survivability of Multi-Layer Network in Elastic Optical Network*
(supervised by **Syafruddin Syarif, Dewiani, Wardi**)

An IP-over-elastic optical network (EON) is a promising solution for supporting the growing bandwidth demand. However, IP-over-EON networks are prone to various failures, making network survivability an important factor for operators. Survivability is the ability of a network to reconfigure and restore traffic that has been disrupted owing to a failure. Failures in IP-over-EON networks can be caused not only by fiber-optic cable cuts in the EON layer but also by router outages in the IP layer. A router outage results in the traffic transiting the router being impacted. A multi-layer restoration (MLR) mechanism can be used to recover the affected traffic by optimizing the utilization of existing network resources that are still available after failure. This research develops adaptive routing and reactive hitless defragmentation techniques to restore all affected traffic after a router outage. The adaptive routing technique is used to generate the best path choice that optimizes the use of spare capacity from the existing lightpath so that the lightpath reconfiguration can be minimized. Meanwhile, the reactive hitless defragmentation technique aims to minimize the setup of a new lightpath. The reactive hitless defragmentation technique is used when the spectrum expansion of the existing lightpath that is used to recover the affected traffic is blocked by the neighboring spectrum. Simulation results using two traffic conditions show that the developed technique can minimize the occurrence of lightpath reconfiguration and new lightpath setups.

Keywords: survivability, adaptive routing, reactive hitless defragmentation, router outage, IP-over-EON



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN DISERTASI	ii
PERSETUJUAN DISERTASI	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK..	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah.....	6
I.3 Tujuan Penelitian.....	7
I.4 Batasan Masalah.....	7
I.5 Manfaat Penelitian.....	7
I.6 Ruang Lingkup Penelitian.....	8
I.7 Kebaruan Penelitian.....	8
BAB II PENDEKATAN TEORI DAN STUDI LITERATUR	9
II.1 Kerangka Konseptual	9
II.1.1 Landasan Teori	10
A. <i>Elastic Optical Network</i>	10
B. <i>Routing and Spectrum Assignment</i>	14
C. <i>Survivability</i>	16
D. <i>Jaringan Multi-layer</i>	17
E. <i>Spectrum Defragmentation</i>	18
F. <i>Spectrum Expansion</i>	20
II.1.2 Penelitian Terdahulu	21
A. <i>Routing pada EON</i>	21



B. <i>Defragmentation</i> pada EON.....	24
C. <i>Spectrum Expansion</i> pada EON	26
D. <i>Survivability</i> pada EON	28
II.1.3 Posisi Penelitian.....	33
II.2 Hipotesis Penelitian.....	34
BAB III TEKNIK <i>ADAPTIVE ROUTING</i> UNTUK MEMINIMALKAN	
 PENAMBAHAN BIAYA AKIBAT KEGAGALAN ROUTER DI	
 IP-OVER-EON	37
III.1 Abstrak	37
III.2 Pendahuluan.....	37
III.3 Metodologi Penelitian	41
III.4 Hasil dan Pembahasan.....	46
III.5 Kesimpulan.....	49
III.6 Daftar Pustaka.....	50
BAB IV STRATEGI MANAJEMEN SPEKTRUM SETELAH TERJADI	
 KEGAGALAN ROUTER DI IP-OVER-EON	53
IV.1 Abstrak	53
IV.2 Pendahuluan	53
IV.3 Metodologi Penelitian	58
IV.3.1 Arsitektur dan Model Jaringan.....	58
IV.3.2 Strategi SERHiD	60
IV.3.3 Algoritma Yang Diusulkan	63
IV.4 Hasil dan Pembahasan	67
IV.4.1 Parameter Simulasi.....	67
IV.4.2 Hasil Simulasi	68
IV.5 Kesimpulan.....	71
IV.6 Daftar Pustaka.....	72
BAB V <i>ADAPTIVE ROUTING</i> DAN <i>REACTIVE DEFRAGMENTATION</i>	
 UNTUK <i>SURVIVABILITY</i> DI IP-OVER-EON AKIBAT	
 KEGAGALAN ROUTER	76
Abstrak	76
Pendahuluan.....	76
Metodologi Penelitian	84



V.3.1 Model dan Arsitektur Jaringan	84
V.3.2 Strategi Yang Diusulkan	86
V.3.3 Algoritma Yang Diusulkan	88
V.4 Hasil dan Pembahasan.....	92
V.4.1 Parameter Simulasi	92
V.4.2 Hasil Simulasi Topologi NSFNET	94
V.4.3 Hasil Simulasi Topologi Cost239.....	97
V.5 Kesimpulan	98
V.6 Daftar Pustaka.....	99
BAB VI PEMBAHASAN UMUM.....	104
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN.....	112
VII.1 Kesimpulan.....	112
VII.2 Saran	114
DAFTAR PUSTAKA.....	115
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Daftar notasi	40
Tabel 2	Parameter tentang format modulasi <i>lightpath</i>	45
Tabel 3	Daftar parameter simulasi	46
Tabel 4	Notasi yang digunakan pada penelitian ini	59
Tabel 5	Notasi yang tercantum dalam penelitian.....	82
Tabel 6	Hasil dari beberapa kriteria untuk solusi ketiga jalur pada gambar 24	88
Tabel 7	Persentase <i>lightpath reconfiguration</i> ALRP terhadap KSP	109
Tabel 8	Persentase <i>lightpath</i> baru SERHID terhadap SE-O.....	110
Tabel 9	Persentase <i>lightpath reconfiguration</i> LRSE+RD terhadap 1SP.....	110
Tabel 10	Persentase <i>lightpath</i> baru LRSE+RD terhadap 1SP	111



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Kerangka konseptual penelitian.....	9
Gambar 2	ITU-T <i>grid</i>	10
Gambar 3	Alokasi spektrum jaringan optik WDM	11
Gambar 4	Overlapping subcarriers teknologi OFDM	11
Gambar 5	Karakteristik EON.....	12
Gambar 6	Model jaringan EON	12
Gambar 7	Fungsi dari (a) BVT dan (b) SBVT	13
Gambar 8	BV-OXC dan BV-WSS.....	14
Gambar 9	Contoh contiguity dan continuity constraint	15
Gambar 10	Masalah <i>fragmentation</i>	19
Gambar 11	Proses <i>hitless defragmentation</i>	20
Gambar 12	Proses ekspansi spektrum	21
Gambar 13	Diagram posisi penelitian terhadap penelitian lainnya.....	35
Gambar 14	Ilustrasi <i>adaptive routing</i> yang diusulkan	41
Gambar 15	Topologi <i>seven-node</i>	45
Gambar 16	Topologi NSFNET	45
Gambar 17	Hasil simulasi untuk trafik <i>heavy</i> (a-b) dan trafik <i>moderate</i> (c-d) pada topologi <i>seven-node</i>	47
Gambar 18	Hasil simulasi untuk trafik <i>heavy</i> (a-b) dan trafik <i>moderate</i> (c-d) pada topologi NSFNET	48
Gambar 19	Strategi manajemen spektrum setelah sebuah <i>router outage</i>	61
Gambar 20	Arsitektur IP-over-EON, kondisi pada <i>logical link</i> dan <i>lightpath</i> ketika terjadi manajemen spektrum	61
Gambar 21	Topologi NSFNET untuk IP-over-EON dengan panjang <i>link</i> fiber dalam kilometer (14 <i>node</i> dan 22 <i>link</i>).....	67
Gambar 22	Hasil trafik <i>heavy</i>	69
r 23	Hasil trafik <i>moderate</i>	70
r 24	Arsitektur IP-over-EON setelah sebuah <i>router outage</i> and solusi ketiga jalur untuk memulihkan <i>affected traffic r2</i>	84
r 25	Manajemen spektrum <i>r2</i> untuk solusi ketiga jalur	86



Gambar 26	Topologi IP-over-EON (jarak fiber optik dalam kilometer)	93
Gambar 27	Hasil simulasi trafik <i>heavy</i> pada topologi NSFNET	95
Gambar 28	Hasil simulasi trafik <i>moderate</i> pada topologi NSFNET	96
Gambar 29	Hasil simulasi trafik <i>heavy</i> pada topologi Cost239.....	97
Gambar 30	Hasil simulasi trafik <i>moderate</i> pada topologi Cost239	98
Gambar 31	Bagan alur pikir.....	106
Gambar 32	Diagram alur penelitian	107



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>
FS	<i>Frequency Slot</i>
SBVT	<i>Sliceable Bandwidth-Variable Transponder</i>
MLR	<i>Multi-Layer Restoration</i>
FAR	<i>Fixed-Alternate Routing</i>
FR	<i>Fixed Routing</i>
AR	<i>Adaptive Routing</i>
OPEX	<i>Operational Expense</i>
PP	<i>Push-Pull</i>
MBB	<i>Make-Before-Break</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
SLICE	<i>Spectrum-Sliced Elastic Optical Path</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transponder</i>
BV-OXC	<i>Bandwidth Variable Optical Cross-Connect</i>
BV-WSS	<i>Bandwidth-Variable Wavelength Selective Switches</i>
RSA	<i>Routing And Spectrum Assignment</i>
RMSA	<i>Routing, Modulation, and Spectrum Allocation</i>
SEC	<i>Spectrum Expansion/Contraction</i>
ALRP	<i>Adaptive Lightpath Reconfiguration Paths</i>
SERHiD	<i>Spectrum Expansion with Reactive Hitless Defragmentation</i>
LRSE	<i>Lightpath Reconfiguration and Spectrum Expansion</i>
RD	<i>Reactive Defragmentation</i>



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pengguna internet yang terus bertambah dan munculnya berbagai layanan baru mengakibatkan terjadinya peningkatan trafik internet yang semakin besar dari tahun ke tahun. Menurut Cisco, pengguna layanan internet mencapai 66 persen dari populasi global di tahun 2023 (Cisco White Paper, 2020). Hadirnya jaringan 5G menawarkan berbagai layanan baru dengan volume trafik besar, seperti *augmented dan virtual reality, cloud gaming, smart homes* (Papanikolaou, Christodouloupoulos and Varvarigos, 2018). Hal ini menjadi tantangan besar bagi pihak operator telekomunikasi untuk dapat meningkatkan kapasitas dan efisiensi *bandwidth* khususnya di jaringan optik.

Jaringan optik *wavelength-division multiplexing* (WDM) memiliki keterbatasan dalam kapasitas *bandwidth* dan efisiensi spektrum (*fixed grid*). WDM menggunakan jarak frekuensi antara kanal yang relatif besar, sehingga jika trafik yang ditransmisikan kecil maka sebagian besar spektrum menjadi tidak berguna (Chatterjee, Sarma and Oki, 2015). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, *elastic optical network* (EON) muncul sebagai solusi. Jinno et al. mengusulkan konsep arsitektur EON dengan sebutan SLICE (Jinno et al., 2009). Di EON, spektrum yang tersedia dibagi menjadi potongan-potongan kecil yang disebut *frequency slot* (FS), dan jumlah FS yang dialokasikan sesuai dengan kebutuhan trafik pengguna. Hasilnya, beragam permintaan *bandwidth* baik yang tinggi maupun rendah dapat diakomodasi dalam EON secara fleksibel, sehingga dapat mengurangi penggunaan sumber daya spektrum hingga 60% (Gandhimathi et al., 2022). Fleksibilitas EON dimungkinkan dengan penggunaan *sliceable bandwidth-variable transponder* (SBVT), yang menyebabkan EON dapat mengalokasikan jumlah FS yang berbeda pada masing-masing *lightpath*, sesuai dengan kecepatan data, dan format modulasi yang sesuai jarak antara sumber dan tujuan (Jinno et al., 2012; Wang, Shen and

l5).

t ini, jaringan *multi-layer* merupakan infrastruktur yang umum digunakan ator jaringan. Arsitektur jaringan terdiri dari layer optik di bagian bawah



dan layer IP di bagian atas (Zhang *et al.*, 2015). Internet dibangun berdasarkan jaringan berbasis IP dan *switching* paket IP berperan penting membuat jaringan adaptif dan efisien untuk mendukung peningkatan trafik (Liu, Lu and Zhu, 2017). Layer optik bertanggung jawab untuk membawa trafik IP melalui *lightpath*. Oleh karena itu, kombinasi antara layer IP dan layer optik diperlukan untuk menyeimbangkan pemanfaatan sumber daya di kedua layer tersebut (Gerstel *et al.*, 2014). Khususnya, dalam jaringan *backbone multi-layer* berbasis IP-over-EON.

Survivability merupakan salah satu masalah penting di arsitektur jaringan optik karena sebuah kabel fiber optik membawa sejumlah koneksi dengan *bandwidth* yang sangat besar (Guo, Shen and Bose, 2016). *Survivability* adalah kemampuan jaringan untuk melakukan konfigurasi ulang agar dapat memulihkan trafik yang terganggu sebagai akibat terjadinya sebuah kegagalan. Kegagalan tidak hanya terjadi di layer optik/EON, tapi juga di layer IP. Kegagalan IP router menyebabkan ribuan atau bahkan jutaan paket *drop* walaupun *lightpath*-nya masih utuh, sedangkan terputusnya sebuah kabel fiber optik menghasilkan kehilangan data yang lebih banyak karena semua paket data pengguna dikumpulkan dan ditransmisikan dalam layer optik (Lu *et al.*, 2018).

Pada penelitian (Labovitz, Ahuja and Jahanian, 1999), dari data 23 router, rata-rata waktu *down*-nya selama setahun adalah 955 menit. Pada jaringan IP-over-WDM permasalahan yang terjadi akibat kerusakan router diluar prediksi dapat mencapai 40%, sedangkan selebihnya disebabkan oleh masalah terputusnya kabel fiber optik (Ghobadi and Mahajan, 2016). Selanjutnya (Govindan *et al.*, 2016) melakukan analisis masalah kegagalan dalam *Google's network*, kondisi router padam karena masalah *hardware/software* terjadi jauh lebih sering daripada kegagalan *link* fiber optik, lama waktu kegagalan mencapai 80% yang berlangsung antara 10 menit hingga 100 menit (hasilnya signifikan lebih besar dari target *availability* yang telah ditetapkan, yaitu *downtime*-nya tidak lebih dari beberapa menit setiap bulan). Berikutnya, Pengamatan selama 2,5 tahun dari 149.560 router didapati bahwa setidaknya 40% router melakukan satu kali *reboot*, dan umumnya

ahan ini dapat ditangani dalam kurun waktu kurang dari dua jam (Luckie rly, 2017).



Teknik *survivability* jaringan umumnya dilakukan pada layer tunggal, baik itu layer IP atau layer optik. Hal ini menghasilkan ketidakefisienan dalam penggunaan sumber daya, sehingga menyebabkan biaya jaringan menjadi tinggi (Gerstel *et al.*, 2014; Mayoral *et al.*, 2015). Untuk mengatasi masalah tersebut, penelitian *survivability* dilakukan secara *multi-layer* (IP dan optik/EON). Tujuannya agar pemulihan *affected traffic* dapat dilakukan dengan menggunakan sumber daya eksisting yang tersedia pada setiap layer secara bersama, sehingga dapat mengurangi total biaya jaringan (Papanikolaou, Christodoulopoulos and Varvarigos, 2017). Selain itu, pada kasus kegagalan router yang terjadi di layer IP, kehilangan trafik yang terjadi tidak dapat dipulihkan hanya dengan skema proteksi atau restorasi di layer optik/EON, tetapi perlu juga mempertimbangkan mekanisme antara kedua layer tersebut (Liu, Lu and Zhu, 2018).

Umumnya, penanganan masalah kegagalan router di jaringan *multi-layer* dilakukan dengan menyiapkan router cadangan (Kodialam *et al.*, 2007; Ruiz *et al.*, 2011; Kmiecik *et al.*, 2014; Mayoral *et al.*, 2015). Namun, hal ini menyebabkan ketidakefisiensian karena router pada kondisi *idle*. Untuk meminimalkan penggunaan router cadangan, mekanisme *multi-layer restoration* (MLR) dilakukan. Algoritma berbasis restorasi membangun kembali koneksi yang rusak secara reaktif sesuai dengan sumber daya yang tersedia setelah terjadinya kegagalan (Shen, Guo and Bose, 2016). Pada kasus kegagalan router, trafik yang terkena dampak kemudian dipulihkan dengan mengoptimalkan penggunaan *lightpath* eksisting yang masih tersedia. Ini dimungkinkan karena pihak operator jaringan biasanya menyiapkan *bandwidth* berlebih berdasarkan beban trafik puncak pada *lightpath* di layer EON.

Pada MLR terdapat tiga strategi untuk memulihkan semua *affected traffic* akibat kegagalan router (Liu, Lu and Zhu, 2018). Strategi pertama dilakukan saat *lightpath* eksisting memiliki kapasitas cadangan yang mencukupi untuk menampung *affected traffic*. Strategi kedua, kapasitas cadangan *lightpath* eksisting tidak mencukupi, namun dapat diperluas secara spektral dengan cara ekspansi

. Hal ini tidak lepas dari kemampuan SBVT untuk melakukan ekspansi trasi spektrum pada sebuah *lightpath* (Sambo *et al.*, 2015). Strategi



terakhir, sebuah *lightpath* baru disiapkan ketika proses ekspansi spektrum tidak dimungkinkan.

Meskipun strategi (Liu, Lu and Zhu, 2018) menawarkan penggunaan sumber daya eksisting yang baik, namun terjadinya *lightpath reconfiguration* dan pembuatan *lightpath* baru masih tinggi. Hal ini disebabkan terbatasnya pilihan jalur yang digunakan, sehingga *lightpath* eksisting yang memiliki kapasitas cadangan yang lebih baik bisa tidak terpilih. Selain itu, *affected traffic* dengan beban tinggi menyebabkan ekspansi spektrum tidak dapat dilakukan, dikarenakan terdapat kekurangan FS bebas akibat terhalang oleh spektrum tetangga.

Pemilihan jalur terbaik penting untuk dilakukan agar dapat mengoptimalkan penggunaan kapasitas cadangan dari *lightpath* eksisting. *Routing* yang paling umum digunakan adalah *fixed-alternate routing* (FAR) (Chatterjee, Ba and Oki, 2018). Pada FAR terdapat sejumlah alternatif jalur untuk mengkoneksikan setiap pasangan node. Pada layer optik, jalur-jalur alternatif dapat dihitung berdasarkan tiga kriteria, yaitu: *k-shortest paths* (KSP), *hop count* (HC), dan *link-disjoint* (LD). Pendekatan yang lebih sederhana daripada FAR adalah *fixed routing* (FR), hanya terdapat sebuah jalur tetap dan merupakan jalur pertama hasil dari skema FAR. Walaupun FR dan FAR sering digunakan karena proses pencarian jalurnya sederhana, namun jalur yang dihasilkan terkadang tidak memberikan hasil optimal. Oleh karena itu, teknik *adaptive routing* (AR) dilakukan agar dihasilkan pilihan jalur terbaik sesuai kondisi jaringan terkini (Chatterjee, Ba and Oki, 2018), sehingga dapat meningkatkan pemanfaatan spektrum di EON (Agrawal, Bhatia and Prakash, 2018).

Pada EON, alokasi FS antara sumber dan tujuan harus diselaraskan untuk mengakomodir permintaan *bandwidth*. Batasan *spectrum contiguity*, dan *spectrum continuity* harus diperhatikan, yaitu FS yang dialokasikan harus kontinu dan berdekatan, dan posisi FS sama harus disiapkan pada setiap *link* di sebuah jalur (Kitsuwan, Pavarangkoon and Nag, 2020). Pada kondisi trafik dinamis, koneksi dapat terbentuk dan terputus kapan saja dan meninggalkan FS terisolasi yang

akibatkan terjadinya *fragmentation* spektrum (Christodouloupoulos, Tomkos and Varigos, 2011). Kondisi ini mengakibatkan ekspansi spektrum (strategi terkadang tidak dapat dilakukan karena kapasitas cadangan *lightpath*



eksisting dan FS bebas yang tersedia tidak dapat digunakan untuk memulihkan *affected traffic*. Kondisi ini mengakibatkan sebuah *lightpath* baru perlu disiapkan (strategi ketiga) yang menyebabkan terjadinya peningkatan *operational expense* (OPEX) operator jaringan (Liu, Lu and Zhu, 2018).

Untuk mengatasi masalah tersebut, proses *defragmentation* spektrum dilakukan untuk mengurangi efek *fragmentation* dengan cara melakukan konfigurasi ulang spektrum dari *lightpath* eksisting. Pendekatan *defragmentation* spektrum terbagi dua tipe, yaitu *proactive* dan *reactive*. *Proactive defragmentation* memproses *defragmentation* tanpa menunggu adanya permintaan koneksi baru (Oki, Sato and Chatterjee, 2019). Sedangkan, *reactive defragmentation* dilakukan untuk menghasilkan FS bebas saat menerima permintaan koneksi (Selvakumar and Manivannan, 2022), yang sebelumnya tidak bisa dilayani karena tidak terdapat sejumlah FS bebas yang sesuai.

Untuk menghindari terjadinya gangguan trafik ketika proses *defragmentation* spektrum dilakukan, maka digunakan metode *hitless defragmentation*. *Hitless defragmentation* melakukan konfigurasi ulang sumber daya spektrum dari *lightpath* eksisting saat trafiknya masih aktif (Fernandez-Martínez, Baran and Pinto-Roa, 2019). *Hitless defragmentation* dapat dilakukan menggunakan teknik *push-pull* (PP) dan *make-before-break* (MBB) (Oki, Sato and Chatterjee, 2019). PP *defragmentation* melakukan pergeseran spektrum secara bertahap, langkah per langkah dan tidak diizinkan dilakukan lompatan spektrum (Cugini *et al.*, 2013). MBB *defragmentation* membentuk *lightpath* tambahan antara node sumber dan tujuan yang sama dengan *lightpath* aktif asli, namun jalur yang digunakan merupakan *link-disjoint*. Setelah alokasi spektrum berhasil dibuat, trafik ditransmisikan melalui *lightpath* yang baru dibuat dan *lightpath* asli dihapus dari jaringan (Takagi *et al.*, 2011).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mempertimbangkan penggunaan *adaptive routing* untuk menghasilkan solusi *routing* optimal sesuai kriteria tertentu, yaitu: pemanfaatan spektrum dan *regenerator* (Aibin and Walkowiak, 2015), jarak

Agrawal, Bhatia and Prakash, 2018), pengaturan alokasi spektrum (Khan, penggunaan *software-defined networking* (SDN) (Kadziolka *et al.*, 2022), jumlah FS maksimum (Khan, 2020), ambang batas panjang jalur (Majumdar



and De, 2019), perencanaan *multi-layer* (Gkamas, Christodoulopoulos and Varvarigos, 2015), dan integrasi topologi fisik dan *virtual* dengan bobot minimum (Zhao *et al.*, 2020).

Selanjutnya, penggunaan *hitless defragmentation* secara *proactive* dan *reactive* diproses dengan teknik PP dan MBB untuk meningkatkan penggunaan spektrum (Wang and Mukherjee, 2013), (Fernandez-Martínez, Baran and Pinto-Roa, 2019). Pada penelitian (Selvakumar and Manivannan, 2022), teknik PP dilakukan secara metaheuristik. Secara *reactive*, teknik PP *hitless defragmentation* dipakai untuk mengoptimalkan spektrum pada *multi-path* (Ujjwal, Thangaraj and Rajnish kumar, 2021), dan (Stiakogiannakis *et al.*, 2014) menggabungkan dengan teknik ekspansi spektrum. Selanjutnya, penelitian (Posam *et al.*, 2020) menggunakan teknik *hop-tuning* untuk *defragmentation* spektrum. Sementara, *proactive defragmentation* dengan teknik PP digunakan (Ba *et al.*, 2016) untuk mempartisi alokasi spektrum.

Penelitian ini fokus untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya eksisting dalam upaya memulihkan *affected traffic*, yang disebabkan oleh kegagalan sebuah router di jaringan *multi-layer* di IP-over-EON. *Affected traffic* merupakan trafik yang transit di router rusak, sedangkan trafik yang berasal dan berakhir di router rusak tidak dipulihkan sampai router diperbaiki. Penelitian ini menggunakan strategi *adaptive routing* dan *reactive hitless defragmentation*, berdasarkan desain strategi MLR di (Liu, Lu and Zhu, 2018). Kedua strategi digunakan agar penggunaan *lightpath* eksisting dapat lebih dioptimalkan, dan mengutamakan proses ekspansi spektrum dibandingkan pembuatan *lightpath* baru.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengembangkan teknik *adaptive routing* agar dapat menghasilkan jalur terbaik yang digunakan untuk meminimalkan terjadinya *lightpath reconfiguration*?



2. Bagaimana meminimalkan penyiapan *lightpath* baru untuk mengoptimalkan penggunaan FS bebas dengan menggunakan teknik *hitless defragmentation* secara *reactive*?
3. Bagaimana menggabungkan teknik *adaptive routing* dan *reactive hitless defragmentation* agar dapat meminimalkan terjadinya *lightpath reconfiguration* dan penyiapan *lightpath* baru?

I.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pada rumusan masalah diatas, tujuan penelitian yang dilakukan sebagai berikut :

1. Mengembangkan teknik *adaptive routing* agar dapat meminimalkan terjadinya *lightpath reconfiguration*.
2. Meminimalkan penyiapan *lightpath* baru menggunakan teknik *reactive hitless defragmentation*.
3. Menggabungkan teknik *adaptive routing* dan *reactive hitless defragmentation* agar dapat meminimalkan terjadinya *lightpath reconfiguration* dan penyiapan *lightpath* baru.

I.4 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dijabarkan sebelumnya, penelitian ini fokus pada jaringan IP-over-EON dengan batasan sebagai berikut:

1. *Survivability* hanya fokus pada sebuah kegagalan yang disebabkan oleh kegagalan router di layer IP.
2. *Affected traffic* yang dipulihkan adalah trafik yang transit di router gagal.
3. Tersedia sumber daya eksisting yang cukup untuk memulihkan semua *affected traffic*.
4. Mekanisme pemulihan mengacu pada strategi MLR (Liu, Lu and Zhu, 2018).

I.5 Manfaat Penelitian



Manfaat dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

Optimalisasi pemanfaatan sumber daya eksisting, yang sering disediakan lebih oleh pihak operator jaringan untuk menangani beban puncak.

2. Pihak operator jaringan dapat menunda penambahan sumber daya jaringan, yang secara tidak langsung hal ini berdampak pada pendapatan operator.

I.6 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini meneliti mengenai *survivability* jaringan *multi-layer* pada EON dengan fokus untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya eksisting yang masih tersedia setelah terjadi sebuah kegagalan router di layer IP. Penelitian ini mengembangkan teknik *adaptive routing* untuk menghasilkan jalur terbaik dan juga menggunakan teknik *reactive hitless defragmentation* untuk mengatasi masalah pengalokasian spektrum. Beberapa parameter simulasi di tetapkan sebelumnya secara acak untuk membangun kondisi jaringan eksisting. Simulasi dilakukan menggunakan beberapa topologi jaringan sebagai topologi jaringan IP-over-EON dan dua kondisi trafik, trafik padat dan sedang. Hasil penelitian mencakup beberapa hal, yaitu *lightpath reconfiguration*, dan penyiapan *lightpath* baru, termasuk penambahan *power consumption* dan OPEX.

I.7 Kebaruan Penelitian

Penelitian ini memberikan kebaruan dan kontribusi dalam perkembangan teknologi jaringan optik khususnya pada pemanfaatan *elastic optical network* (EON), yaitu:

1. Pengembangan teknik *adaptive routing* dapat menghasilkan jalur yang dapat mengoptimalkan penggunaan *lightpath* eksisting untuk memulihkan *affected traffic*, sehingga dapat meminimalkan terjadinya *lightpath reconfiguration* dibandingkan teknik *routing* konvensional.
2. Meminimalkan penyiapan *lightpath* baru dengan mengoptimalkan pemanfaatan FS bebas menggunakan teknik *reactive hitless defragmentation*, sehingga proses ekspansi spektrum lebih sering dilakukan untuk memulihkan *affected traffic*.
3. Mengembangkan penggabungan teknik *adaptive routing* dan *reactive hitless defragmentation* agar dihasilkan sebuah jalur terbaik dengan kebutuhan bahan FS rendah, sehingga dapat meminimalkan terjadinya *lightpath reconfiguration* dan penyiapan *lightpath* baru.



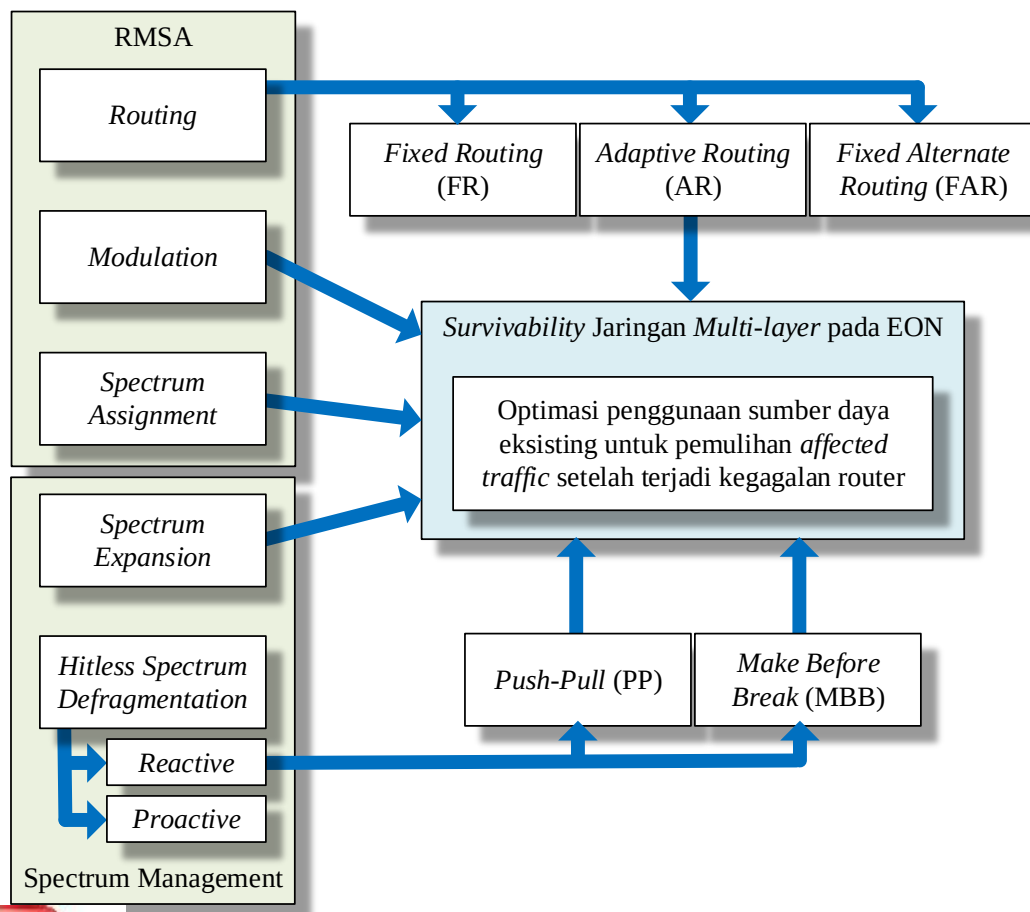
BAB II

PENDEKATAN TEORI DAN STUDI LITERATUR

Pada bagian berikut merupakan penjelasan mengenai kerangka konseptual yang berisi landasan teori, penelitian terdahulu, *research gap* dan posisi penelitian, termasuk hipotesis penelitian yang melatarbelakangi munculnya penelitian ini.

II.1 Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual penelitian bertujuan untuk melihat suatu hubungan atau keterkaitan antara satu konsep dengan konsep lainnya dari suatu permasalahan yang diteliti saat ini. Pada gambar 1 berikut memperlihatkan kerangka konseptual penelitian yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 1 Kerangka konseptual penelitian



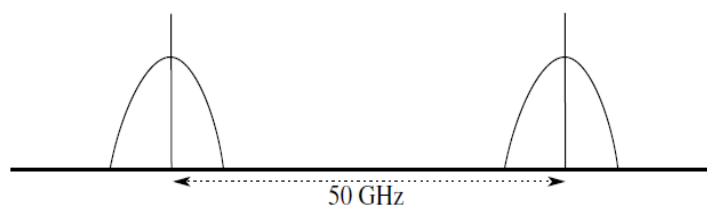
Operator jaringan berharap agar layanan yang diberikan selalu berjalan normal dan tanpa kendala. Namun, sebuah kegagalan terkadang dapat terjadi kapan saja. Kegagalan pada perangkat router di jaringan *multi-layer* IP-over-EON menyebabkan sejumlah trafik menjadi bermasalah. Pendekatan secara *multi-layer restoration* (MLR) digunakan agar sumber daya eksisting yang masih tersisa bisa dimanfaatkan untuk memulihkan *affected traffic* tersebut.

II.1.1 Landasan Teori

A. Elastic Optical Network

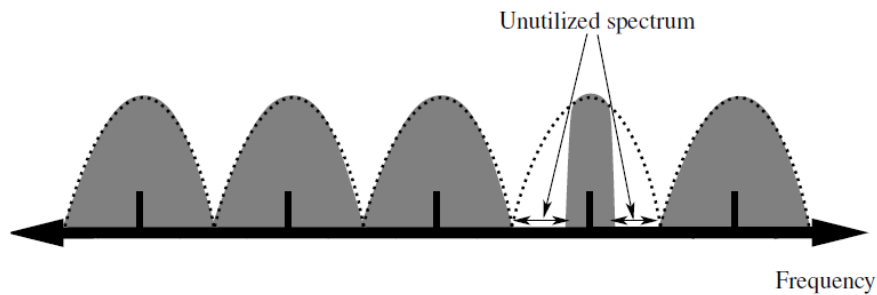
Jaringan optik WDM membagi spektrum kedalam beberapa kanal yang terpisah. Berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh *International Telecommunication Union-Telecommunication* (ITU)-T jarak antar kanal yang saling berdekatan adalah 50 GHz atau 100 GHz, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Jarak frekuensi antara dua kanal yang berdekatan relatif besar. Jika kanal hanya membawa *bandwidth* rendah, maka terdapat celah frekuensi besar yang tidak digunakan sehingga pengalokasian spektrum lebar tersebut akan menjadi sia-sia, hal ini dapat dilihat pada gambar 3.

Elastic optical network (EON) menawarkan fleksibel untuk memvariasikan permintaan trafik aktual pada jaringan optik. Untuk membangun EON, dibutuhkan sebuah teknologi modulasi *multi-carrier* yang disebut *orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM). OFDM membagi aliran data menjadi beberapa *low-speed sub-carriers*. Spektrum saluran *sub-carrier* yang berdekatan dimodulasikan secara orthogonal, sehingga dapat tumpang tindih satu sama lain seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi spektrum transmisi.

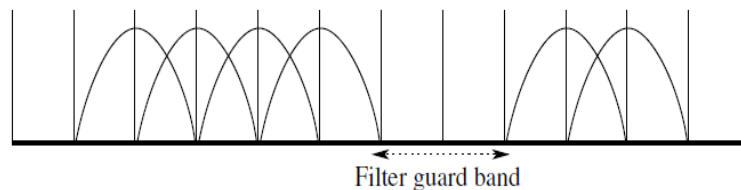


Gambar 2 ITU-T grid (Chatterjee, Sarma and Oki, 2015)





Gambar 3 Alokasi spektrum jaringan optik WDM (Chatterjee, Sarma and Oki, 2015)

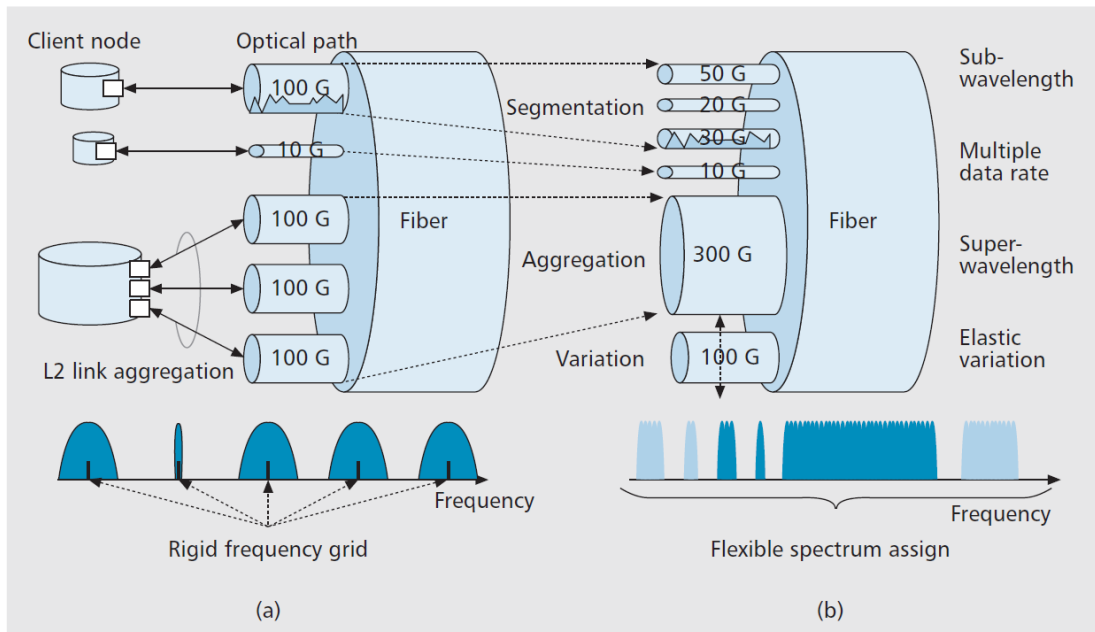


Gambar 4 Overlapping subcarriers teknologi OFDM (Chatterjee, Sarma and Oki, 2015)

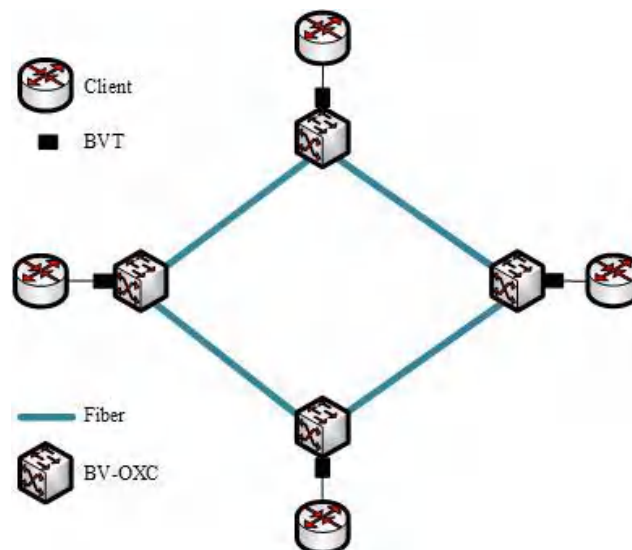
Berdasarkan teknologi OFDM, jaringan *spectrum-sliced elastic optical path* (SLICE) diusulkan pada tahun 2009 (Jinno *et al.*, 2009), yang biasa juga disebut *elastic optical network* (EON). EON mendukung *sub-wavelength*, *super-wavelength* dan beberapa tingkatan kecepatan data seperti terlihat pada gambar 5.

- **Sub-wavelength:** Saat ini jaringan jalur optik dengan *wavelength-route* membutuhkan penyediaan *bandwidth* penuh antara sumber dan node tujuan, sedangkan EON memungkinkan transmisi *sub-wavelength*. Untuk trafik yang hanya membutuhkan sebagian kecil dari *bandwidth*, maka EON dapat mengakomodir hal tersebut dengan mengalokasikan *bandwidth* secara fleksibel seperti ditunjukkan pada gambar 5.
- **Super-wavelength:** Pada EON, beberapa *wavelength* kontinyu dapat digabungkan menjadi sebuah *super-wavelength* seperti ditunjukkan pada gambar 5, sehingga *interval band* antar *sub-wavelength* dapat dihemat.
- **Multiple data rates:** EON memiliki *grid* fleksibel sehingga spektrum yang sesuai dapat ditugaskan untuk kecepatan data yang berbeda.





Gambar 5 Karakteristik EON (a) *conventional optical path network*; (b) SLICE (Jinno et al., 2009)

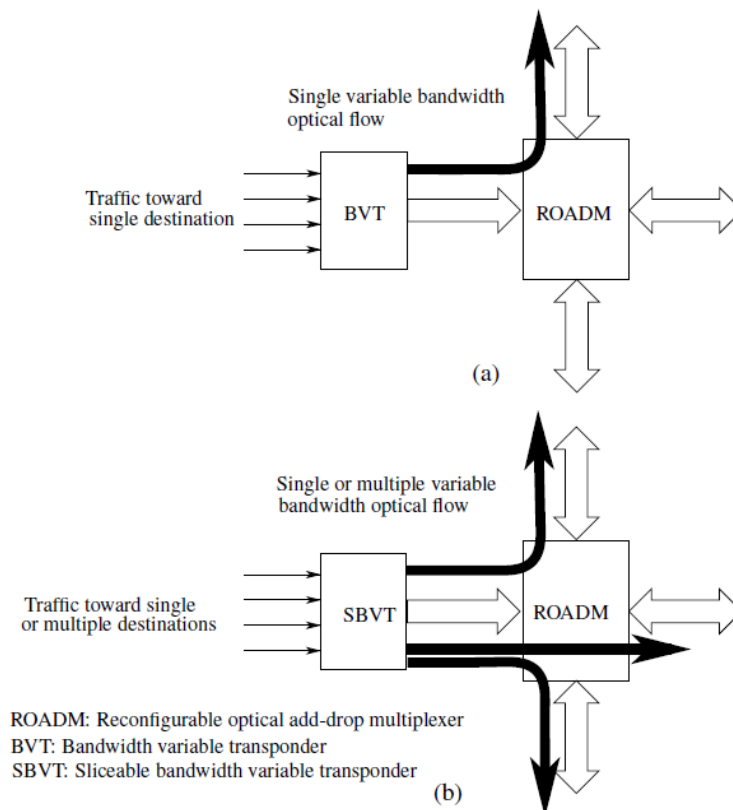


Gambar 6 Model jaringan EON (Jinno et al., 2009)



la gambar 6 memperlihatkan model jaringan EON yang terdiri dari *h variable transponder* (BVT) dan *bandwidth variable optical cross* (BV-OXC). BVT (Zhang *et al.*, 2013) digunakan untuk mengatur *h* agar dapat menyesuaikan dengan *bit rate* transmisi atau format

modulasi. BVT mendukung transmisi berkecepatan tinggi menggunakan format modulasi yang efisien secara spektral. BVT dapat menyesuaikan efisiensi spektral



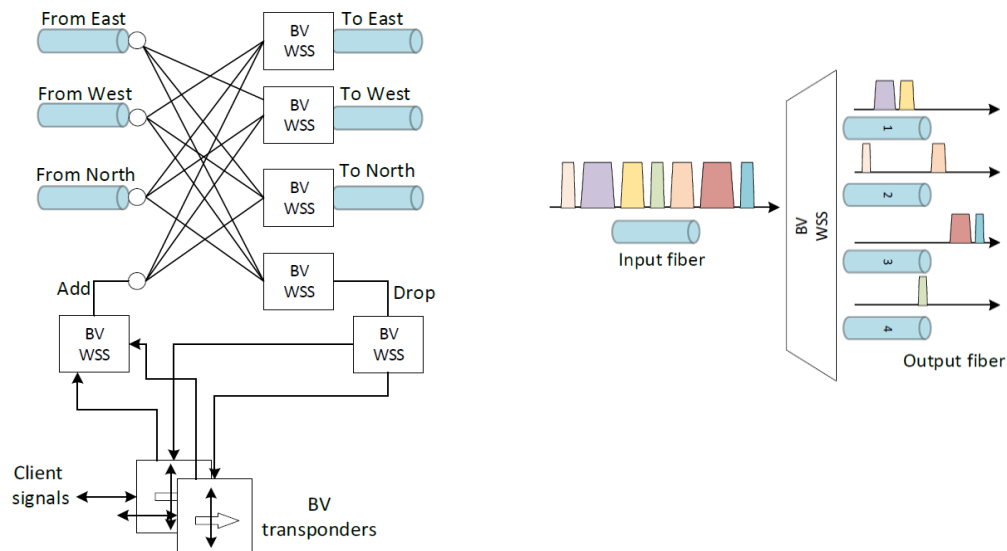
dengan jangkauan transmisi.

Gambar 7 Fungsi dari (a) BVT dan (b) SBVT (Chatterjee, Sarma and Oki, 2015)

Saat BVT berkecepatan tinggi dioperasikan lebih rendah dari kecepatan maksimumnya karena masalah jarak, menyebabkan sejumlah kapasitas BVT tidak digunakan. Untuk itu, *sliceable bandwidth variable transponder* (SBVT) (Jinno *et al.*, 2012; Sambo *et al.*, 2015) digunakan agar dapat mengalokasikan kapasitas menjadi satu atau beberapa aliran optik independen yang ditransmisikan ke satu atau beberapa tujuan. Oleh karena itu, ketika SBVT digunakan di kecepatan bit rendah, kapasitas sisanya dapat dimanfaatkan untuk mentransmisikan aliran data independen lainnya. SBVT dapat menghasilkan beberapa aliran optik yang dapat ke *lightpath* berbeda secara fleksibel menuju tujuan berbeda. Gambar 7 akan perbedaan fungsi BVT dan SBVT.



BV-OXC dapat melakukan koneksi silang semua koneksi optik sesuai dengan *bandwidth* spektrum ke setiap jalur optik. BV-OXC terdiri dari beberapa *bandwidth-variable wavelength selective switches* (BV-WSS) seperti yang ditunjukkan pada gambar 8(a). Sebuah BV-WSS melakukan spektrum demultiplexing/multiplexing dan mengalihkannya ke fiber optik yang berbeda seperti yang terlihat di gambar 8(b).



(a) *bandwidth variables OXC*

(b) *bandwidth variables WSS*

Gambar 8 BV-OXC dan BV-WSS (Jinno et al., 2009)

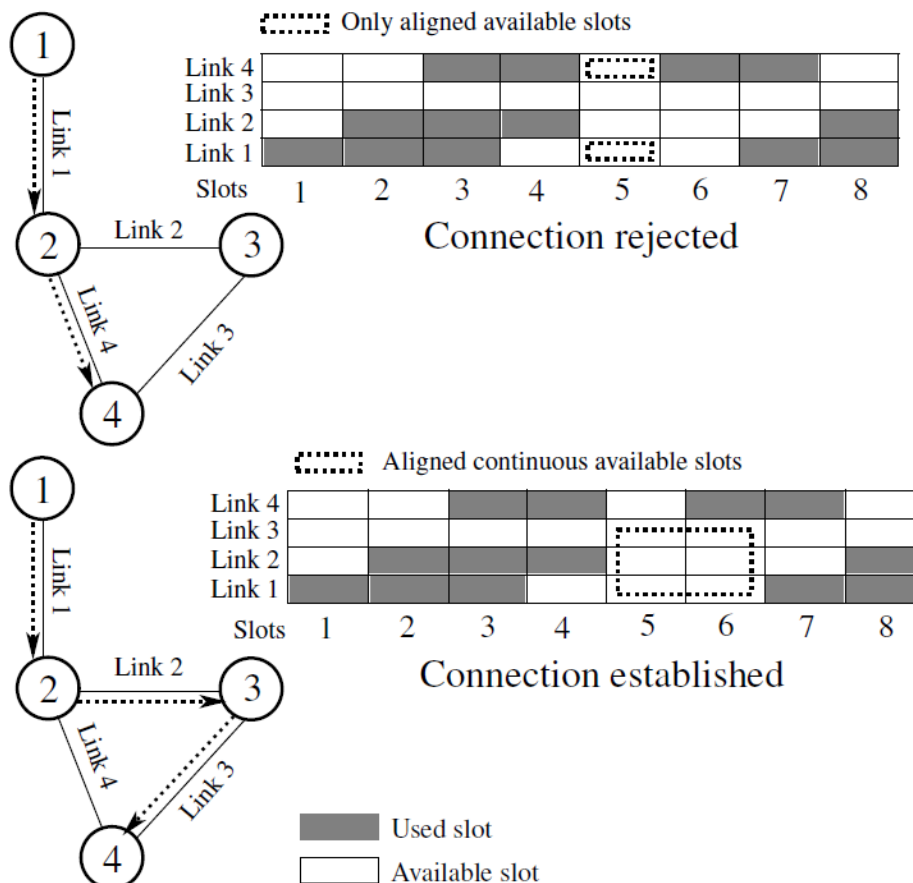
B. *Routing and Spectrum Assignment*

Routing dan spectrum assignment (RSA) pada EON merupakan teknik yang digunakan untuk memilih jalur antara pasangan sumber-tujuan dan mengalokasikan spektrum sesuai dengan kebutuhan trafiknya. Selain itu, format modulasi juga harus dipertimbangkan dalam jaringan skala besar, ketika jangkauan sinyal menjadi faktor pembatas, yang disebut sebagai *routing, modulation, dan spectrum allocation* (RMSA) (Abkenar and Rahbar, 2017). Terdapat beberapa kendala pada algoritma RSA dan RMSA sebagai berikut (Christodoulopoulos, Tomkos and Velasco, 2011; Velasco et al., 2012):



spectrum continuity constraint: koneksi optik harus mengalokasikan impulsan spektrum yang sama di sepanjang *link* pada jalur *end-to-end*.

2. **Spectrum contiguity constraint:** kumpulan spektrum yang dialokasikan untuk sebuah koneksi harus berdekatan.
3. **Non-overlapping spectrum constraint:** spektrum pada *link* yang dialokasikan untuk koneksi yang berbeda harus tidak tumpang tindih.
4. **Transmission distance constraint:** jarak transmisi maksimum dari format modulasi yang dipilih tidak boleh lebih panjang dari panjang jalur *end-to-end*.



Gambar 9 Contoh contiguity dan continuity constraint (Chatterjee, Sarma and Oki, 2015)

Penjelasan mengenai konsep *contiguity* dan *continuity constraint* RSA dapat dilihat pada contoh gambar 9, misalnya sebuah koneksi membutuhkan *bit-rate* yang sama dengan dua *slot* dari node sumber 1 ke node tujuan 4. Permintaan koneksi akan terjadi melalui jalur terpendek 1-2-4. Hal ini disebabkan *link* 1-2 dan



link 2-4 tidak memiliki dua *slot* yang berdekatan dan kontinu, sehingga *contiguity* dan *continuity constraint* tidak terpenuhi. Namun, *contiguity* dan *continuity constraint* terpenuhi jika koneksi menggunakan jalur 1-2-3-4 dan *slot* spektrum 5 dan 6.

Routing digunakan untuk menentukan jalur atau calon jalur yang digunakan oleh *lightpath*. Selanjutnya, penggunaan spektrum dieksplorasi dan dihitung pada jalur tersebut. Terdapat tiga teknik *routing* yang digunakan pada RSA (Wan *et al.*, 2012), yaitu:

1. *Fixed Routing* (FR): satu jalur tetap yang telah dihitung sebelumnya untuk setiap pasangan sumber-tujuan dan tidak ada persyaratan untuk informasi keadaan dinamis dari sebuah *link*. FR dilakukan dalam dua tahapan, yaitu proses *routing* dan alokasi spektrum.
2. *Fixed Alternate Routing* (FAR): setiap node dalam jaringan memiliki tabel *routing* (yang berisi daftar terurut sejumlah jalur tetap) untuk semua node lainnya. FAR merupakan pendekatan dua tahapan. Pertama, ketika permintaan tiba, beberapa jalur dipilih dari tabel *routing* yang telah dihitung sebelumnya. Kedua, memproses alokasi spektrum untuk setiap kandidat jalur.
3. *Adaptive routing* (AR): jalur antara pasangan sumber-tujuan dipilih secara dinamis, bergantung pada pembaruan status jaringan. AR dilakukan dalam satu tahapan, yaitu mempertimbangkan *routing* dan alokasi spektrum secara bersamaan.

C. *Survivability*

Survivability adalah kemampuan jaringan untuk mengkonfigurasi ulang dirinya agar dapat memulihkan trafik yang terganggu yang diakibatkan oleh terjadinya kegagalan pada jaringan. Teknik *survivability* dapat dibagi dalam dua kategori umum, yaitu: strategi *protection* dan strategi *restoration*, tergantung pada operasi yang terbentuk, sebelumnya atau setelah terjadi kegagalan (Shen, Guo and



16). Strategi *restoration* adalah memulihkan transmisi setelah kegagalan sedangkan strategi *protection* adalah untuk melindungi koneksi jaringan ahulu.

Proteksi digunakan untuk mengkonfigurasi kapasitas yang direncanakan sebelumnya, agar *survivability* dapat dijamin dengan melakukan reservasi *spare capacity dedicated* yang mencakup sebuah skenario kegagalan tertentu. Strategi proteksi menyiapkan sumber daya cadangan untuk pemulihan dari kegagalan dan membuatnya tetap *idle* ketika tidak terjadi kegagalan. Strategi ini menghasilkan waktu pemulihan yang singkat tapi relatif tidak efisien dalam hal penyediaan kapasitas cadangan. Sumber daya jaringan yang digunakan dalam strategi proteksi dapat didedikasikan untuk masing-masing skenario kegagalan, yang disebut *dedicated protection*. Alternatifnya, sumber daya jaringan dapat digunakan bersama terhadap berbagai skenario kegagalan, yang disebut *shared protection*. Skema *shared protection* umumnya lebih efisien dalam penggunaan kapasitas dibandingkan skema *dedicated protection*.

Restorasi digunakan untuk merutekan ulang trafik terpengaruh setelah kegagalan terjadi. Ini dilakukan dengan memanfaatkan kapasitas cadangan yang tidak didedikasikan untuk suatu kegagalan tertentu, tapi dapat dikonfigurasi sesuai keperluan. Kapasitas cadangan yang masih tersedia pada jaringan digunakan untuk memulihkan layanan ketika terjadi kegagalan. Umumnya, strategi restorasi lebih efisien dalam pemanfaatan kapasitas cadangan karena memiliki kemampuan dalam menghadapi beberapa jenis kegagalan. Kapasitas cadangan yang akan digunakan harus ditentukan secara dinamis sesuai dengan kapasitas cadangan yang telah tersedia.

D. Jaringan Multi-layer

Sebuah arsitektur jaringan *multi-layer* terdiri dari dua layer seperti terlihat pada gambar 14. Layer IP merupakan tempat IP router berkapasitas tinggi berada, dan layer optik merupakan node optik (*cross-connect*) yang terhubung secara fisik melalui *link* fiber (Idzikowski *et al.*, 2016). Layer IP mewakili topologi virtual, router dihubungkan satu sama lain melalui *virtual link* (*logical*). Layer IP mengumpulkan trafik data yang berasal dari pengguna dan selanjutnya nnya melalui topologi *virtual*. Selanjutnya, router terhubung dengan node



Pada arsitektur IP-over-EON, setiap router terhubung ke *sliceable bandwidth variable transponder* (SBVT) yang terletak pada *bandwidth-variable optical cross-connect* (BV-OXC) (Sambo *et al.*, 2015). Transponder memungkinkan untuk mengubah bandwidth transmisi serta format modulasi.

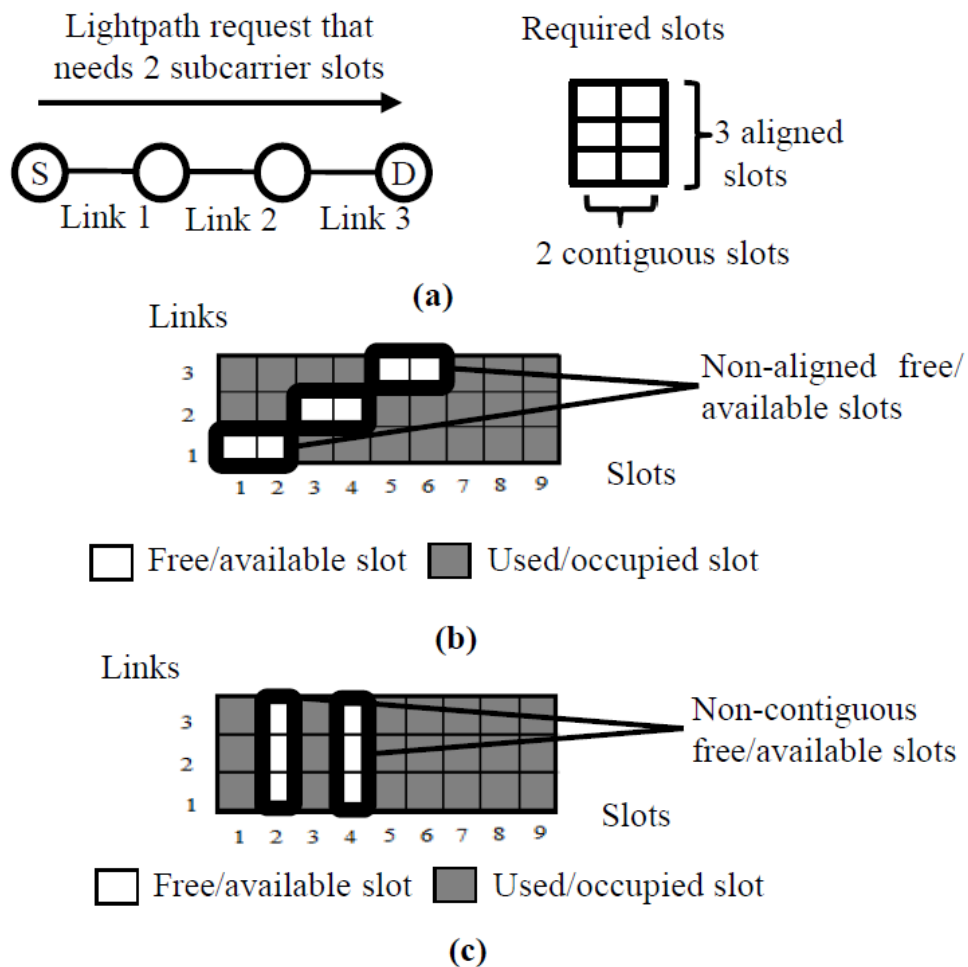
E. *Spectrum Defragmentation*

Trafik dinamis menyebabkan setiap koneksi memerlukan lebar spektrum yang berbeda, dan pelepasan koneksi di jaringan dapat terjadi kapan saja. Setelah pelepasan koneksi, FS bebas yang telah digunakan tersebut menjadi tersedia untuk dimanfaatkan oleh permintaan koneksi berikutnya. Kondisi ini menyebabkan terjadinya blok *slot* terisolir, tidak *continuous* dan *contiguous* dalam spektrum EON. Kondisi ini disebut *fragmentation* spektrum. *Fragmentation* spektrum dapat menyebabkan permintaan koneksi masuk menjadi ditolak, bahkan ketika sumber daya spektrum eksisting tidak sedang digunakan.

Pada gambar 10 memperlihatkan masalah *fragmentation* yang dapat menghasilkan penolakan koneksi. Pada gambar 10(a) terlihat sebuah *lightpath* membutuhkan dua *slot*. Meskipun dua FS bebas tersedia di jaringan, namun permintaan tersebut tidak bisa dilayani, karena kedua *slot* tersebut di gambar 10(b) tidak sejajar di sepanjang jalur, dan tidak berdekatan dalam spektrum seperti pada gambar 10(c).

Defragmentation spektrum merupakan proses mengkonfigurasi ulang FS, agar diperoleh sejumlah FS bebas berdekatan sesuai dengan permintaan trafik dari koneksi baru. *Defragmentation* terbagi atas dua strategi, yaitu *proactive* dan *reactive* (Chatterjee, Sarma and Oki, 2015). *Proactive defragmentation* merupakan upaya yang dilakukan untuk menghindari terjadi *fragmentation* spektrum. Strategi diproses secara berkala untuk mengatur ulang spektrum koneksi, atau dilakukan sebelum pembentukan koneksi baru ke jaringan. *Reactive defragmentation* digunakan ketika permintaan koneksi tidak dapat dialokasikan karena terjadi *fragmentation* spektrum. Spektrum dari koneksi eksisting perlu dilakukan isi ulang agar memberikan ruang cukup untuk alokasi spektrum koneksi

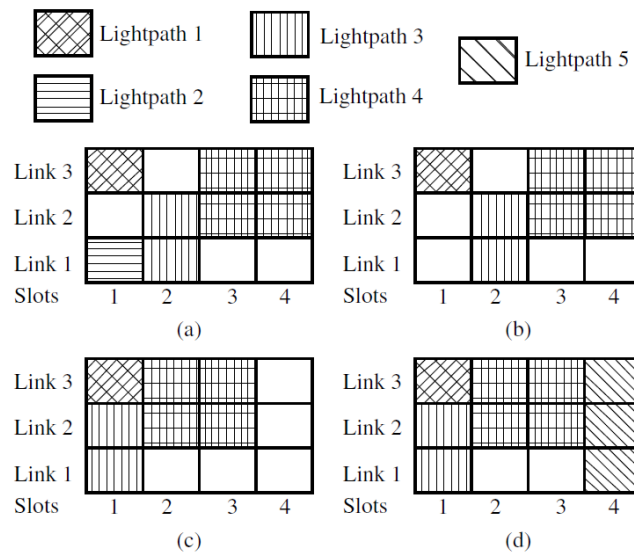




Gambar 10 Masalah *fragmentation* (a) kebutuhan *slot* untuk alokasi spektrum, (b) *fragmentation* yang disebabkan *slot* yang tidak sejajar, dan (c) *fragmentation* terjadi karena *slot* tidak bersebelahan (Chatterjee, Ba and Oki, 2018)

Hitless defragmentation merupakan strategi *defragmentation* yang tidak menyebabkan terjadinya gangguan trafik. Strategi (Takagi *et al.*, 2011; Proietti *et al.*, 2012; Cugini *et al.*, 2013) berusaha untuk memaksimalkan lebar FS bebas tanpa memicu gangguan trafik apapun. Pada gambar 11 menunjukkan contoh *hitless defragmentation* dengan kondisi yang berbeda. Terdapat 4 *lightpath* yang aktif pada gambar 11(a) dan kemudian *lightpath* 2 berakhir (gambar 11(b)). *Hitless defragmentation* digunakan untuk mengatur ulang *lightpath* 3 dan 4 di gambar 11(c), *lightpath* 5 ditambahkan ke jaringan seperti yang terlihat pada gambar 11(d).





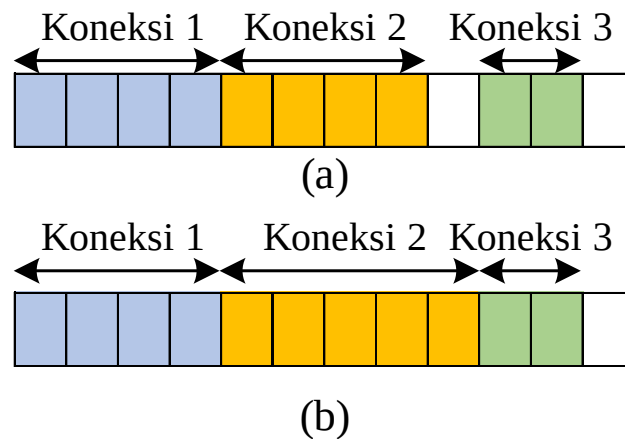
Gambar 11 Proses *hitless defragmentation* (a) kondisi awal, (b) *lightpath 2* berakhir, (c) *defragmentation* secara *hitless*, dan (d) *lightpath 5* ditambahkan (Chatterjee, Ba and Oki, 2018)

F. Spectrum Expansion

Setiap pembentukan dan pelepasan koneksi terjadi secara acak, dan jaringan harus mengakomodasi trafik yang masuk secara *real time*. Saat koneksi masuk dibutuhkan sejumlah *frequency slot* (FS) untuk mengakomodasi beban trafik. Selanjutnya, FS tersebut akan dilepaskan ketika tidak diperlukan lagi. Terdapat jeda waktu lama antara pembentukan dan pelepasan sebuah koneksi, dan selama kurun waktu tersebut, kebutuhan trafik pelanggan dapat berfluktuasi, yang menyebabkan kebutuhan FS dapat bertambah atau berkurang (Khodashenas *et al.*, 2014; Din *et al.*, 2017).

Untuk itu, teknik *spectrum expansion/contraction* (SEC) digunakan dengan cara memperluas/mengkontraksi alokasi spektrum dari sebuah koneksi. Ketika trafik sebuah koneksi bertambah, perluasan/ekspansi spektrum dapat dilakukan selama tersedia FS bebas yang sesuai dengan kebutuhan penambahan FS. Pada gambar 12 terlihat proses ekspansi spektrum, terdapat 3 koneksi dengan alokasi nya pada gambar 12(a). Pada koneksi 2 terdapat penambahan trafik 1 FS. Tambahan FS tersebut diakomodir dengan melakukan ekspansi sebanyak 1 FS disebelah kanan seperti terlihat pada gambar 12(b).





Gambar 12 Proses ekspansi spektrum (a) kondisi awal, (b) koneksi 2 melakukan ekspansi spektrum sebanyak 1 FS (Stiakogiannakis et al., 2014).

II.1.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini banyak mengambil referensi yang bersumber dari beberapa jurnal internasional terindeks dan prosiding. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi tentang bagaimana mengoptimalkan penggunaan sumber daya cadangan jaringan, sehingga biaya operasional dari operator telekomunikasi dapat dikurangi. Berikut ini penelitian yang telah dilakukan terkait masalah *survivability multi-layer* pada jaringan optik/EON.

A. Routing pada EON

E. Palkopoulou et al., “*Impact of IP Layer Routing Policy on Multilayer Design*”; Penelitian ini merekomendasikan desain *multi-layer* secara menyeluruh, yaitu memasukkan analisis kegagalan *link* optik dalam desain topologi layer IP dapat menghasilkan penghematan biaya jaringan yang lebih baik dibandingkan dengan perencanaan *multi-layer* secara parsial. Sementara untuk *routing* di layer IP, kebijakan berbasis *hop* menghasilkan biaya jaringan lebih rendah dibandingkan kebijakan berbasis jarak (Palkopoulou et al., 2015).

S. M. Hosseini Ghazvini et al., “*Load balancing, multipath routing and modulation with traffic grooming in elastic optical networks*”; Penelitian unjukan *routing* pada layer IP dan solusi RMSA. Permintaan trafik dibagi beberapa aliran *low rate* dan dikirimkan melalui perutean multi-jalur



menggunakan teknik KSP, sehingga dapat mengoptimalkan pemanfaatan FS bebas yang terfragmentasi pada *link* (Hosseini Ghazvini, Ghaffarpour Rahbar and Alizadeh, 2020).

M. Aibin dan K. Walkowiak., “*Adaptive modulation and regenerator-aware dynamic routing algorithm in elastic optical networks*”; Penelitian ini menggunakan metode untuk memilih *routing* berdasarkan pemanfaatan spektrum termasuk penggunaan regenerator. Saat terdapat permintaan baru, *link* dengan rasio pemanfaatan FS yang rendah digunakan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa solusi tersebut berhasil mengurangi rata-rata pemblokiran dan penggunaan regenerator (Aibin and Walkowiak, 2015).

A.Agrawal et al., “*Spectrum Efficient Distance-Adaptive Paths for Fixed and Fixed-Alternate Routing in Elastic Optical Networks*”; Penelitian ini mengusulkan algoritma *routing* berdasarkan jarak adaptif untuk trafik dinamis di EON, yaitu *k-distance adaptive paths* (KDAP). Jalur dipilih berdasarkan *bit rate*, jarak, penggunaan spektrum dan jumlah *link* yang digunakan pada jalur tersebut (Agrawal, Bhatia and Prakash, 2018).

A. N. Khan, “*Online routing, distance-adaptive modulation, and spectrum allocation for dynamic traffic in elastic optical networks*”; Skema RMSA adaptif diusulkan untuk trafik dinamis agar dapat meminimalkan *fragmentation* dan menggunakan alokasi spektrum *first-last-mixed fit*. Skema modulasi dengan kecepatan data lebih tinggi, dan meminimalkan penggunaan *contiguous* FS, serta panjang fiber optik merupakan indikator yang digunakan dalam penentuan sebuah jalur (Khan, 2019).

B. Kadziolka et al., “*Employing FAMTAR and AHB to Achieve an Optical Resource-Efficient Multilayer IP-Over-EON SDN Network*”; Penelitian ini meningkatkan penggunaan sumber daya menggunakan *software-defined networking* (SDN). SDN *controller* melakukan kedua mekanisme, yaitu memilih pasangan sumber-tujuan terbaik sesuai dengan status *congestion* di *link* untuk *bypass*, dan mengalokasikan *lightpath* untuk memastikan penggunaan spektrum mal (Kadziolka et al., 2022).

Olzowski, “*Improved dynamic routing algorithms in elastic optical*”; Penelitian ini mengusulkan dua algoritma *dynamic routing* untuk



menyelesaikan masalah RMLSA. Algoritma pertama berdasarkan *shortest path*, yang jaraknya ditentukan oleh jumlah *link* dalam jaringan. Jarak ini berpengaruh kepada level modulasi yang dipilih. Sedangkan algoritma kedua merupakan modifikasi dari algoritma dijkstra, dan menggunakan level modulasi yang dapat meminimalkan jumlah *slot* untuk melayani permintaan masuk (Olszewski, 2017).

A. N. Khan, “A Constrained Maximum Available Frequency Slots on Path Based Online Routing and Spectrum Allocation for Dynamic Traffic in Elastic Optical Networks”; Penelitian ini mengusulkan beberapa algoritma *adaptive routing*. Algoritma digunakan untuk memilih jalur yang kurang dimanfaatkan berdasarkan jumlah *idle* FS maksimum, sehingga dapat menghindari penggunaan jalur yang padat. Alokasi spektrum menggunakan *first-fit* setelah pemilihan jalur dilakukan. Hasilnya, penggunaan FS meningkat dibandingkan *fixed routing*, dan *alternate routing* (Khan, 2020).

E. E. Moghaddam et al., “Routing, Spectrum and Modulation Level Assignment, and Scheduling in Survivable Elastic Optical Networks Supporting Multi-Class Traffic”; Penelitian ini meneliti *survivability* pada EON dengan trafik *multiclass*, yaitu: *immediate reservation* (IR), permintaan koneksi yang harus dilayani segera, dan *advance reservation* (AR), permintaan koneksi yang mentolerir penundaan. Dua metode diusulkan untuk pemilihan jalur. Pertama, metode *K-Shortest Pairs of disjoint path*, pemilihan jalur dilakukan berdasarkan penjumlahan jarak dari jalur utama dan jalur cadangan. Kedua, metode *K Least Loaded Pairs of disjoint path*, yaitu memilih jalur yang menyeimbangkan penggunaan *link bandwidth* dengan menggunakan jumlah FS yang kecil (Moghaddam, Beyranvand and Salehi, 2018).

P. Majumdar dan T. De, “A Distance-Based Adaptive Traffic Grooming Algorithm in Large EON under Dynamic Traffic Model”; Penelitian ini mengusulkan algoritma *distance based adaptive multi-hop elastic lightpath*. Algoritma menentukan jalur dari setiap permintaan trafik berdasarkan *threshold path length* untuk mengatasi masalah *traffic grooming*. Algoritma tersebut mencari

pendek dari sumber ke tujuan yang dapat mengurangi jumlah hop (Majumdar and De, 2019).



V. Gkamas et al., “A Joint Multi-Layer Planning Algorithm for IP Over Flexible Optical Networks”; Penelitian ini membandingkan perencanaan secara sekeunsial (yang secara terpisah merencanakan layer IP dan layer optik) dengan perencanaan *multi-layer* secara bersama. Terdapat tiga hal yang ditinjau pada dua layer, yaitu *routing* di layer IP, *routing*, level modulasi dan alokasi spektrum di layer optik. Hasilnya memperlihatkan efektifitas jika perencanaan kedua layer dilakukan dalam satu langkah (Gkamas, Christodoulopoulos and Varvarigos, 2015).

J. Zhao et al., “A Cross-Layer Traffic Grooming Algorithm in Joint Optimization of the IP over Elastic Optical Network”; Penelitian ini mengusulkan integrasi topologi dan modulasi adaptif berdasarkan *cross-layer routing and spectrum allocation* untuk mengatasi masalah *traffic grooming*, yaitu *routing* di layer IP; *routing*, *modulation level* dan *spectrum allocation* di layer optik. Pemilihan jalur dilakukan dengan menggabungkan topologi fisik dan topologi virtual menggunakan metode bobot minimum. Hasilnya, penggunaan spektrum dapat ditingkatkan dan pemblokiran permintaan koneksi dapat dikurangi terutama pada kondisi trafik dengan beban tinggi (Zhao et al., 2020).

B. Defragmentation pada EON

R. Wang dan B. Mukherjee, “Provisioning in Elastic Optical Networks with Non-Disruptive Defragmentation”; Penelitian ini menggunakan teknik *push-pull hitless defragmentation* untuk menekan terjadinya pemblokiran *bandwidth*. Pendekatan *defragmentation* secara *proactive* dan *reactive* dilakukan. *Proactive* dipicu ketika sebuah *lightpath* selesai dilayani, sedangkan *reactive* dilakukan ketika sebuah *lightpath* baru tidak dapat dibuat tanpa melakukan *defragmentation* (Wang and Mukherjee, 2013).

M. Zhang et al., “Dynamic and Adaptive Bandwidth Defragmentation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Networks with Time-Varying Traffic”; Penelitian ini menyajikan prosedur desain *defragmentation* secara sistematis menjadi empat

1. How to reconfigure?, How to migrate traffic?, When to reconfigure?,
2. How to reconfigure?, How to migrate traffic?, When to reconfigure?,
3. How to reconfigure?, How to migrate traffic?, When to reconfigure?,
4. How to reconfigure?, How to migrate traffic?, When to reconfigure?.

Skema *defragmentation* berbasis *dependency graph*



disajikan agar dapat melakukan pemilihan jalur terbaik saat defrag dilakukan (Zhang *et al.*, 2014).

S. Ba *et al.*, “*Defragmentation scheme based on exchanging primary and backup paths in 1+1 path protected elastic optical networks*”; Meneliti skema defragmentasi menggunakan pertukaran jalur proteksi di EON. *1+1 path protection* bertukar fungsi dari *lightpath* utama menjadi *lightpath* cadangan dan sebaliknya. Ketika *lightpath* di jalur utama menerima data, maka *lightpath* di jalur cadangan dapat dialokasikan ulang selama proses defragmentasi tanpa mengganggu transmisi data. (Ba, Chatterjee and Oki, 2017).

Y. Zhang *et al.*, “*Cross-Layer Spectrum Defragmentation for IP over Elastic Optical Network*”; Penelitian ini mengusulkan *cross-layer spectrum defragmentation* untuk meningkatkan penggunaan spektrum pada jaringan *multi-layer*, yang dipicu saat permintaan koneksi tidak dapat dilayani. Proses tersebut terjadi di kedua layer, yaitu mengatur ulang aliran trafik pada layer IP, serta melakukan perubahan jalur dan alokasi spektrum pada layer optik (Zhang *et al.*, 2018).

S. Fernandez-Martínez *et al.*, “*Spectrum defragmentation algorithms in elastic optical networks*”; Penelitian ini mengusulkan algoritma *defragmentation* yang menggabungkan pendekatan *proactive* dan *reactive*. *Proactive* dilakukan secara berkala, dan *reactive* dilakukan saat permintaan koneksi tidak dapat dilayani. Algoritma menggunakan teknik *hitless defragmentation*, yaitu *push-pull* dan *make-before-break*. Algoritma *proactive* lebih unggul pada beban trafik rendah, sedangkan *reactive* lebih baik di beban trafik tinggi (Fernandez-Martínez, Baran and Pinto-Roa, 2019).

S. K. Posan *et al.*, “*Reactive Hitless Hop tuning based defragmentation algorithm for enhanced spectrum efficiency in Elastic optical networks*”; Penelitian ini menggunakan teknik *reactive defragmentation* agar permintaan koneksi baru yang awalnya diblokir menjadi dilayani dengan melakukan *hop tuning defragmentation* seminimal mungkin pada koneksi eksisting (Posam *et al.*, 2020).



Chatterjee and Oki, “*Defragmentation based on route partitioning in 1 + 1 elastic optical networks*”; Meneliti defragmentasi berdasarkan partisi rute tujuan untuk mengurangi fragmentasi spektrum dan probabilitas bloking

pada 1+1 *path protection*. Skema defragmentasi fokus untuk meminimalkan gangguan penyetelan ulang pada *lightpath* pada *full 1 + 1 protected*. Partisi rute menggunakan *first-last fit allocation* dapat meminimalkan gangguan antar *lightpath* ketika menggunakan *push-pull defragmentation* (Chatterjee and Oki, 2020).

Ujjwal et al., “*Multi-path provisioning in elastic optical network with dynamic on-request optimal defragmentation strategy*”; Penelitian ini mengoptimalkan penggunaan spektrum pada *multi-path* dengan strategi *defragmentation* spektrum. Saat permintaan koneksi tidak dapat dilayani, proses *reactive defragmentation* dilakukan pada koneksi aktif tepat di kanan dan kiri blok spektrum kontinu terbesar, yang tersedia pada jalur *link-disjoint* terpendek, dan diikuti dengan pemisahan trafik pada jalur tersebut (Ujjwal, Thangaraj and Rajnish kumar, 2021).

D. S. Yadav, “*RDRSA: A reactive defragmentation based on rerouting and spectrum assignment (RDRSA) for spectrum convertible elastic optical network*”; Penelitian ini menginvestigasi strategi *reactive defragmentation* dan *spectrum convertible*. Proses *defragmentation* dilakukan ketika permintaan koneksi tidak dapat dilayani. Koneksi eksisting *re-established* ke jalur yang lebih pendek atau alokasi FS digeser untuk meminimalkan terjadinya *fragmentation* pada *link* jaringan. *Spectrum convertible* digunakan saat permintaan koneksi memenuhi syarat *spectrum contiguity* di setiap *link*, namun syarat *spectrum continuity* (tersedia indeks FS yang sama untuk setiap *link*) tidak memenuhi (Yadav, 2021).

S. Selvakumar dan S. S. Manivannan, “*A Spectrum Defragmentation Algorithm Using Jellyfish Optimization Technique in Elastic Optical Network (EON)*”; Penelitian ini menggunakan pendekatan *hitless defragmentation* secara *proactive* dan *reactive*, serta teknik optimasi secara *metaheuristic* (*Jellyfish Search Optimization*). Tujuan adalah meningkatkan penggunaan spektrum sehingga dapat meminimalkan terjadinya pemblokiran permintaan koneksi (Selvakumar and Manivannan, 2022).



trum Expansion pada EON

Stiakogiannakis et al., “*Dynamic Cooperative Spectrum Sharing and entation for Elastic Optical Networks*”; Penelitian ini menggabungkan

pendekatan *spectrum expansion/contraction* dan *spectrum defragmentation*. Kedua teknik ini dilakukan untuk mengakomodasi perubahan trafik dengan cara melakukan ekspansi/kontraksi alokasi spektrum koneksi, dan ketika spektrum tetangga menghalangi proses perluasan spektrum, defragmentasi menggunakan teknik *push-pull* dilakukan untuk menghasilkan spektrum bebas (Stiakogiannakis *et al.*, 2014).

P. Majumdar *et al.*, “*Extending light-trail into elastic optical networks for dynamic traffic grooming*”; Penelitian ini mengusulkan algoritma *traffic grooming* secara dinamis yang dapat melakukan *light-trail expansion* dan/atau *contraction* selain membuat sebuah *elastic light-trail* baru. Prosedur ini dilakukan agar dapat memanfaatkan sumber daya spektrum secara optimal dengan menghilangkan *guard band* yang seharusnya disisipkan di antara beberapa sinyal optik paralel (Majumdar, Pal and De, 2016).

D. R. Din, “*Spectrum Expansion/Contraction and Survivable Routing and Spectrum Assignment problems on EONs with time-varying traffic*”; Penelitian ini meneliti masalah *survivability* pada dua skema proteksi, *dedicated path protection* dan *shared backup path protection*, menggunakan *routing* dan *spectrum expansion contraction* (SEC). SEC dapat dilakukan secara bersamaan pada *lightpath* utama dan cadangan pada lapisan optik. Algoritma menggunakan *weighted hop distance* dalam pemilihan jalur utama-cadangan. Hasilnya dapat mengurangi ratio pemblokiran permintaan koneksi sekitar 1% (Din, 2019).

I. G. S. Santos *et al.*, “*A spectrum spacing mechanism to enhance traffic grooming in elastic optical networks*”; Penelitian ini mengusulkan metode agar terdapat jarak antara spektrum yang dialokasikan untuk setiap *lightpath*. Hal ini meningkatkan kemungkinan adanya *slot* kosong yang berdekatan di masa depan, yang pada gilirannya memfasilitasi proses ekspansi spektrum dari *lightpath*, sehingga dapat memenuhi permintaan koneksi baru melalui *traffic grooming* (Santos *et al.*, 2021).

D. R. Din, “*Delay-Variation Constrained Spectrum Extraction and Retention Problem for Multipath Routing on Elastic Optical Networks*”; Penelitian ini mengusulkan beberapa algoritma *spectrum extraction* dan *retention* (*path-removing*, *expansion*, *path adding* dan *contraction*), yang



memenuhi batasan *delay-variation* untuk melakukan *update* trafik. Beberapa teknik pemilihan jalur juga diusulkan untuk memilih *lightpath* yang digunakan pada *multipath* (Din, 2020).

D. *Survivability* pada EON

A. Castro et al., “*Dynamic restoration in multi-layer IP/MPLS-over-flexgrid networks*”; Penelitian mengenai restorasi aliran IP saat terjadi kegagalan sebuah *link* pada jaringan *multi-layer*. Permintaan restorasi untuk aliran *client* dikelompokkan ke dalam satu *bulk* di *path computation element* (PCE) dan modul *global concurrent optimization* (GCO) menyelesaikan masalah dengan menemukan jalur (solusi optimal) untuk semua aliran dalam *bulk*. Dengan menggunakan model matematis dan algoritma heuristik yang diusulkan, skema ini dapat meningkatkan kemampuan restorasi dan mengurangi jumlah *transponder* optik (Castro et al., 2013).

M. Pióro et al., “*Elastic multi-layer resilient IP-over-Flexgrid networking: Detailed cost analysis with bandwidth-variable transponders*”; Meneliti penggunaan perangkat yang memiliki biaya dominan, yaitu *bandwidth-variable transponders* (BVT). BVT ini digunakan untuk jaringan *multi-layer IP-over-Flexgrid*. Untuk mengoptimalkan perutean *IP link* ketika terjadi kegagalan pada layer optik digunakan model optimasi *mixed-integer*. Hasilnya, diperoleh pengurangan biaya kebutuhan BVT hingga 10% (Pióro et al., 2014).

J. Perelló et al., “*Power consumption reduction through elastic data rate adaptation in survivable multi-layer optical networks*”; Penelitian ini fokus pada konsumsi daya yang digunakan oleh sumber daya cadangan untuk kebutuhan *survivability* jaringan optik *multi-layer*. Sumber daya cadangan tetap menggunakan daya yang tidak sedikit meskipun sedang tidak digunakan. Penggunaan teknologi *elastic optical* dapat secara efektif mengurangi konsumsi daya dengan melakukan penyesuaian kecepatan data *transponder* dibandingkan dengan pendekatan *fixed* pada teknologi jaringan optik WDM (Perelló et al., 2014).



Kmiecik et al. “*Two-layer optimization of survivable overlay multicasting : optical networks*”; Penelitian ini meneliti tentang optimasi dua layer fokus pada masalah optimasi *multicasting* dan *survivability* di layer aplikasi

dan layer EON. Skenario *survivability* penelitian ini menekankan pada dua kondisi kegagalan, yaitu kegagalan satu *link* akses dan kegagalan satu *link* optik (terputusnya kabel fiber). Pada layer aplikasi, aliran data dilindungi oleh mekanisme *dual homing*, sementara pada layer optik menggunakan skema *dedicated path protection* (Kmieciak et al., 2014).

O. Gerstel et al., “*Multi-layer Capacity Planning for IP-Optical Networks*”; penelitian ini membahas perencanaan *multi-layer* dengan mempertimbangkan *multi-layer restoration* (MLR) untuk menangani kegagalan yang terjadi pada layer IP dan layer optik, dan menyarankan metode optimasi dengan melewati router *intermediate*, dan juga membandingkan MLR dengan *single-layer restoration* (Gerstel et al., 2014).

A. Mayoral et al., “*Minimizing Resource Protection in IP Over WDM Networks: Multi-layer Shared Backup Router*”; Penelitian ini membandingkan dua strategi *survivability* pada jaringan *multi-layer*, yaitu pertama, *dual-plane protection* (IP *link* diproteksi menggunakan skema proteksi 1+1 dan setiap IP router diduplikasi untuk memproteksi dari kegagalan tunggal), dan kedua, *multi-layer shared backup router* (MLSBR). MLSBR bertujuan agar tambahan router cadangan dapat digunakan bersama untuk memulihkan trafik jika terjadi kegagalan pada IP router. Hasilnya, MLSBR menghasilkan pengurangan sampai dengan 24% kebutuhan peralatan IP dibandingkan *dual-plane protection* (Mayoral et al., 2015).

D. Amar et al., “*Class-of-service-based multilayer architecture for traffic restoration in elastic optical networks*”; Penelitian ini meneliti tentang masalah restorasi trafik berdasarkan dua *class-of-service*. Trafik *gold* dipulihkan menggunakan sumber daya cadangan yang telah disiapkan (1+1 IP protection), dan IP restorasi dilakukan pada trafik *best-effort* menggunakan sumber daya yang masih tersisa. Jika masih terdapat trafik *best-effort* yang dipulihkan, *optical restoration* dilakukan dengan trasponder elastic pada kecepatan data lebih rendah, sehingga jaraknya menjadi lebih panjang (Amar et al., 2016).

E. Etezadi et al., “*Latency-aware service provisioning in survivable IP-over-elastic optical networks to support multi-class of service*”; Penelitian ini merancang jaringan *multi-layer* untuk mendukung *multi-class*, permintaan trafik dibedakan berdasarkan skema proteksi dan



delay dari ujung ke ujung. Terdapat dua skema proteksi yang digunakan yaitu, proteksi *dedicated path* dan proteksi *shared backup path* dengan tujuan meminimalkan CAPEX dan penggunaan spektrum sekaligus memenuhi persyaratan latensi dan mekanisme *survivability* (Etezadi, Beyranvand and Salehi, 2022).

Pedreno-Manresa et al., “*Joint Fault Tolerant and Latency-Aware Design of Multilayer Optical Networks*”; Penelitian ini melakukan tiga pendekatan dalam mendesain jaringan *multi-layer*, yaitu *IP-only restoration* (IP-R), *1+1 optical protection followed by IP restoration* (1+1) dan *optical-followed-by-IP restoration* (Op-IP-R). *Fault tolerant* dan *latency-aware* penting karena untuk menjamin trafik IP bertahan 100% dan menjamin *end-to-end latency* tidak melebihi 50 ms saat terjadi satu kegagalan (terputusnya *link* fiber optik). Hasilnya, pendekatan Op-IP-R (disebut juga sebagai *multi-layer restoration*) menggunakan jumlah transponder yang digunakan lebih sedikit, namun *latency*-nya melebihi 50 ms (Pedreno-Manresa, Izquierdo-Zaragoza and Pavon-Marino, 2016).

S. Liu et al., “*On the Cross-Layer Orchestration to Address IP Router Outages With Cost-Efficient Multilayer Restoration in IP-Over-EONs*”; Penelitian ini mempertimbangkan kondisi *router outage* dan mengusulkan tiga strategi restorasi *multi-layer* untuk memulihkan trafik yang terdampak akibat terjadinya *router outage*. Pertama, memulihkan *affected traffic* pada *lightpath* eksisting yang masih memiliki kapasitas cadangan yang cukup. Kondisi ini tidak menghasilkan penambahan OPEX. Kedua, *spare capacity* dari *lightpath* eksisting tidak mencukupi, namun spektrumnya dapat diperluas dengan kemampuan ekspansi spektrum dari SBVT. Kondisi ini menyebabkan penambahan OPEX akibat peningkatan penggunaan FS, serta terjadi *lightpath reconfiguration* akibat ekspansi spektrum. Ketiga, sebuah *lightpath* baru disiapkan untuk memulihkan *affected traffic*. Penambahan OPEX terjadi dari peningkatan penggunaan SBVT dan FS, serta satu operasi *lightpath reconfiguration*. Penelitian ini merumuskan model ILP dan algoritma heuristik berbasis *auxiliary-graph* (AG) (Liu, Lu and Zhu, 2018).



Papanikolaou et al., “*Joint Multi-layer Survivability Techniques for IP-stic-Optical-Networks*”; Penelitian ini mengusulkan metode restorasi pada *survivability* di jaringan *multi-layer* IP-over-EON. Dua kondisi

digunakan dalam merancang *survivability*, yaitu *sequential* (setelah terjadi kegagalan jaringan kemudian diarahkan menggunakan *backup*-nya), dan *joint* (jaringan didesain bekerja bersamaan pada kondisi normal dan saat mengalami satu masalah kegagalan). Pendekatan secara *joint* terbukti menghasilkan penggunaan sumber daya yang efisien dibandingkan *sequential*. Kondisi kegagalan jaringan adalah *link* optik tunggal atau kerusakan peralatan optik atau IP (Papanikolaou, Christodouloupoulos and Varvarigos, 2017).

W. Lu et al., “On Cost-Efficient Integrated Multilayer Protection Planning in IP-Over-EONs”; Penelitian ini menggunakan mixed linear programming dan algoritma heuristic dalam merencanakan proteksi *multi-layer* dengan mempertimbangkan salah satu dari skenario tunggal berikut, yaitu *router outage* atau terputusnya kabel fiber optik. Sebuah router cadangan digunakan untuk mengatasi masalah kegagalan pada peralatan IP di layer IP. Kemudian, untuk proteksi terputusnya kabel fiber optik digunakan 1+1 *Path Protection* yang memaksimalkan *multi-layer spectrum sharing* pada layer EON (Lu et al., 2018).

A. Giorgetti et al., “Demonstration of Dynamic Restoration in Segment Routing Multi-layer SDN Networks”; Penelitian ini memperkenalkan skema *Segment Routing* baru untuk memulihkan aliran trafik setelah peristiwa kegagalan jaringan, *link* atau node. SDN controller tidak terlibat pada saat terjadinya kegagalan sehingga trafik dipulihkan secara lokal dari node yang mendeteksi kegagalan hingga ke node tujuan, sehingga dapat memungkinkan mengurangi waktu untuk pemulihan kegagalan (< 50 ms) (Giorgetti et al., 2016).

S. Iyer, “Investigation of cost and spectrum utilization in internet protocol-over-elastic optical networks”; Penelitian ini menyajikan teknik *joint multilayer survivability* dalam menangani kegagalan, sehingga dapat mengoptimalkan pemilihan sumber daya utama dan cadangan dengan mempertimbangkan kondisi normal dan beberapa kondisi kegagalan, yaitu: kegagalan *link* optik tunggal; kegagalan *link* optik atau node optik tunggal dan kegagalan node IP (Iyer, 2020).

Berdasarkan penjabaran dari sejumlah penelitian diperoleh hasil mengenai tantangan dari penelitian terdahulu serta penelitian ke depan yang berkaitan dengan *survivability multi-layer* pada jaringan EON, yaitu:



1) Penelitian (Olszewski, 2017; Moghaddam, Beyranvand and Salehi, 2018) menggunakan *fixed alternate routing* (FAR) dan *adaptive routing* (AR) dalam penentuan jalur. Penggunaan AR pada kondisi normal menjadi fokus penelitian (Aibin and Walkowiak, 2015; Agrawal, Bhatia and Prakash, 2018; Khan, 2019, 2020; Majumdar and De, 2019; Kadziolka *et al.*, 2022). Pemilihan jalur dengan pendekatan *hop count* dan *shortest path* diteliti oleh (Palkopoulou *et al.*, 2015), sementara penelitian (Olszewski, 2017; Hosseini Ghazvini, Ghaffarpour Rahbar and Alizadeh, 2020) menggunakan *k-shortest path*. Penelitian (Palkopoulou *et al.*, 2015; Moghaddam, Beyranvand and Salehi, 2018) mengkaitkan *routing* dengan *survivability* jaringan, namun hanya fokus pada penanganan kegagalan di layer optik. Sementara, pada jaringan *multi-layer*, penelitian (Gkamas, Christodouloupoulos and Varvarigos, 2015) fokus pada perencanaan *multi-layer*, dan (Zhao *et al.*, 2020) pada *traffic grooming*.
Research gap: penelitian tersebut belum mengkaji penggunaan AR pada masalah kegagalan router di layer IP.

2) Penelitian (Wang and Mukherjee, 2013; Fernandez-Martínez, Baran and Pinto-Roa, 2019; Selvakumar and Manivannan, 2022) menggunakan dua pendekatan *defragmentation*, *proactive* dan *reactive*; sedangkan (Zhang *et al.*, 2018; Posam *et al.*, 2020; Ujjwal, Thangaraj and Rajnish kumar, 2021; Yadav, 2021) fokus pada *reactive defragmentation*. Penelitian *reactive defragmentation* dengan teknik PP dikaji oleh (Wang and Mukherjee, 2013; Zhang *et al.*, 2018; Ujjwal, Thangaraj and Rajnish kumar, 2021); teknik MBB oleh (Fernandez-Martínez, Baran and Pinto-Roa, 2019; Selvakumar and Manivannan, 2022), dan teknik *hop-tuning* oleh (Zhang *et al.*, 2014; Posam *et al.*, 2020; Yadav, 2021). Penggunaan *proactive spectrum defragmentation* untuk proteksi jalur diteliti oleh (Ba, Chatterjee and Oki, 2017; Chatterjee and Oki, 2020).
Research gap: penelitian tersebut tidak mempertimbangkan defragmentation pada masalah kegagalan router di layer IP.

3) Penelitian (Stiakogiannakis *et al.*, 2014; Majumdar, Pal and De, 2016; Din, 2020; Santos *et al.*, 2021) mempertimbangkan masalah *spectrum nsion* untuk mengakomodir perubahan trafik atau memenuhi permintaan kisi baru. Penelitian (Din, 2019) menggabungkannya dengan masalah



survivability di layer EON/optik, sementara penelitian (Stiakogiannakis *et al.*, 2014) menggabungkan dengan *reactive defragmentation*.

Research gap: penelitian tersebut hanya fokus pada penyelesaian masalah pada *single-layer*. Penelitian (Din, 2019) tidak mempertimbangkan penggunaan *spectrum defragmentation*, sedangkan penelitian (Stiakogiannakis *et al.*, 2014) hanya menggunakan satu *modulation level*, teknik PP *reactive defragmentation*, dan peruteannya secara FAR (*hop count*). Keduanya tidak mempertimbangkan kegagalan router di layer IP.

- 4) Penelitian (Gerstel *et al.*, 2014; Mayoral *et al.*, 2015; Papanikolaou, Christodoulopoulos and Varvarigos, 2017; Liu, Lu and Zhu, 2018; Lu *et al.*, 2018; Iyer, 2020) meneliti masalah *survivability multi-layer* dengan mempertimbangkan kegagalan di layer IP. Penelitian (Mayoral *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2018) menyiapkan router cadangan jika terjadi kegagalan di layer IP, sementara penelitian (Liu, Lu and Zhu, 2018) tidak menyiapkan router cadangan tapi menggunakan sumber daya yang ada untuk pemulihan *affected traffic*. Penelitian (Liu, Lu and Zhu, 2018; Lu *et al.*, 2018) meninjau masalah ekspansi spektrum untuk penanganan kegagalan, namun (Lu *et al.*, 2018) menyiapkan secara khusus dengan strategi *protection* sedangkan (Liu, Lu and Zhu, 2018) dengan strategi *restoration*.

Research gap: penelitian (Liu, Lu and Zhu, 2018) dan lainnya tidak mengkaji penggunaan *spectrum defragmentation* dan *adaptive routing* untuk pemulihan *affected traffic* akibat kegagalan router.

II.1.3 Posisi Penelitian

Dalam penelitian terdahulu terkait topik *survivability* di *elastic optical network* (EON), penggunaan *fixed routing* (FR) dan *fixed alternate routing* (FAR) lebih banyak digunakan sebagai solusi pemilihan *routing*. Selain itu, beberapa penelitian meneliti masalah restorasi pada jaringan *multi-layer*, termasuk mempertimbangkan kegagalan yang terjadi di jaringan, baik kegagalan *link* maupun

router. Penelitian lainnya juga meninjau masalah ekspansi spektrum dan *defragmentation*, namun masih jarang yang menggabungkan keduanya, a pada penanganan kegagalan router. Posisi penelitian yang dilakukan ini



memiliki kebaruan dalam hal penggunaan *adaptive routing* (AR) untuk memulihkan trafik terdampak akibat kegagalan router menggunakan mekanisme *multi-layer restoration* (pemanfaatan sumber daya eksisting yang masih tersedia setelah terjadi kegagalan), termasuk menggabungkan proses ekspansi spektrum dan *reactive spectrum defragmentation* dengan teknik *push-pull* (PP) dan *make-before-break* (MBB). Gambar 13 memperlihatkan diagram posisi penelitian yang dilakukan terhadap penelitian lainnya.

II.2 Hipotesis Penelitian

Hipotesis adalah dugaan sementara dari suatu penelitian yang harus diuji kebenarannya. Berdasarkan perumusan masalah, tujuan penelitian, landasan teori, penelitian terkait dan kerangka konseptual yang telah dijabarkan sebelumnya, maka hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Teknik *adaptive routing* merupakan teknik yang dapat menghasilkan keputusan pemilihan jalur sesuai dengan kondisi jaringan. Oleh karena itu, *adaptive routing* dapat mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya jaringan dibandingkan dengan *routing* konvensional (Agrawal, Bhatia and Prakash, 2018).

H1: Ada pengaruh teknik *adaptive routing* terhadap optimalisasi penggunaan sumber daya jaringan sehingga dapat meminimalkan terjadinya *lightpath reconfiguration*.

2. Masalah *fragmentation* dapat menyebabkan penggunaan spektrum dari *lightpath* eksisting menjadi tidak optimal. Untuk itu, teknik *reactive hitless spectrum defragmentation* dilakukan untuk menghasilkan pemanfaatan spektrum yang lebih baik, sehingga dapat mengurangi penyiapan *lightpath* baru. Oleh karena itu, *spectrum defragmentation* dipandang sebagai pendekatan yang efektif untuk mengatasi efek negatif yang ditimbulkan oleh *fragmentation* spektrum (Li et al., 2021).

H2: Ada pengaruh teknik *hitless defragmentation* secara *reactive* terhadap optimalisasi penggunaan spektrum dari *lightpath* eksisting (meminimalkan dampak *fragmentation*) sehingga dapat mengurangi terjadinya penyiapan *lightpath* baru.



3. Teknik *adaptive routing* dan teknik *reactive hitless spectrum defragmentation* dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya jaringan.

H3: Penggunaan kedua teknik, yaitu *adaptive routing* dan *reactive hitless defragmentation* dapat berpengaruh terhadap optimalisasi pemanfaatan sumber daya jaringan sehingga bisa meminimalkan *lightpath reconfiguration* dan penyiapan *lightpath* baru.



Routing	Single-layer	Multi-layer	Protection	Restoration	Kondisi Jaringan			Spectrum Expansion	Spectrum Defragmentation									
					Normal	Gagal (Link)	Gagal (Router)		Proactive		Reactive							
									PP	MBB	PP	MBB						
FR (SP)	3		3			3			3									
FR (HC)		1				1												
FR (LD)	6				6											6		
	2				2											2	2	
	4				4											4		4
	7				7													7
FAR (KSP)		10				10												
		11			11	11												
		12			12													
		14			14													
		13		13														
FAR (HC)	9			9		9		9										
FAR (LD)																		
	5			5	5	5	5	5										
AR	8				8					8		8						
		15		15			15				15							

1. Palkopoulou et al., 2015
2. Wang dan Mukherjee, 2013
3. Ba et al., 2017
4. Fernandez-Martínez et al., 2019
5. Chatterjee dan Oki, 2020

6. Ujjwal et al., 2021
7. Yadav, 2021
8. Selvakumar dan Manivannan, 2022
9. Stiakogiannakis et al., 2014
10. Etezadi et al., 2022

11. Liu, Lu dan Zhu, 2018
12. Papanikolaou et al., 2017
13. Lu et al., 2018
14. Iyer, 2020
15. Penelitian Saya



Gambar 13 Diagram posisi penelitian terhadap penelitian lainnya