



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PERBANDINGAN DAN KINERJA
SISTEM KOMUNIKASI KABEL LAUT
SEA-ME-WE 3 DAN 4**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

DARIUS YANTHONY

0405030257

**PROGRAM S1 REGULER
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber yang dikutip maupun ditunjuk
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Darius Yanthony

NPM : 0405030257

Tanda Tangan : Darius Yanthony

Tanggal : 17 Juni 2009

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Darius Yanthony

NPM : 0405030257

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Perbandingan dan Kinerja Sistem Komunikasi Kabel
Laut SEA-ME-WE 3 dan 4

telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro pada program studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rochmah N. Sukardi, M.Sc ()

Penguji I : Dr. Ir. Retno Wigajatri P., MS. ()

Penguji II : Budi Sudiarto, ST, MT ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Darius Yanthony

NPM : 0405030257

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISIS PERBANDINGAN DAN KINERJA SISTEM KOMUNIKASI KABEL LAUT SEA-ME-WE 3 DAN 4

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia atau formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

dibuat di : Depok
pada tanggal : 17 Juni 2009
Yang menyatakan,

Darius Yanthony
0405030257

UCAPAN TERIMA KASIH

Setelah melalui proses pembelajaran di Departemen Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia selama hampir 8 semester, tibalah saat bagi saya untuk menyusun skripsi sebagai salah satu prasyarat kelulusan sebagai Sarjana Teknik. Melalui suatu perjuangan yang tidak mudah, akhirnya skripsi berjudul *Analisa Perbandingan dan Kinerja Sistem Komunikasi Kabel Laut SEA-ME-WE 3 dan 4* ini dapat saya selesaikan.

Tentu saja, skripsi ini tidak mungkin saya selesaikan sendiri tanpa bantuan dari pihak manapun. Oleh karena itu pada kesempatan ini saya ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya pada beberapa pihak:

1. Ir. Rochmah N. Sukardi, M.Sc selaku pembimbing skripsi saya yang sudah mencurahkan tenaga, waktu, dan pikiran untuk mengarahkan penyusunan skripsi ini ke arah yang benar,
2. Keluarga saya yang telah mendukung dan menyayangi saya dari lahir sampai sekarang,
3. Teman-teman seangkatan yang telah membantu baik langsung maupun tidak langsung, teknis maupun non-teknis dalam penyusunan skripsi ini,
4. Pihak-pihak yang telah memahami terlebih dahulu tentang topik skripsi ini dan rela membagikan ilmu pengetahuan mereka ini sebagai referensi skripsi ini, dimanapun mereka berada.

Akhir kata, saya ucapkan selamat menyimak dan membaca, semoga skripsi yang saya susun ini dapat membawa suatu manfaat bagi pihak yang menggunakannya.

Depok, 17 Juni 2009

Darius Yanthony

0405030257

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Darius Yanthony

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Analisa Perbandingan dan Kinerja Sistem Komunikasi Kabel Laut
SEA-ME-WE 3 dan 4

SEA-ME-WE 3 dan 4 adalah salah satu *backbone* utama penopang sistem komunikasi kabel laut (SKKL) dunia yang masih beroperasi sekarang. Berada dalam tingkatan generasi yang sama, kedua SKKL ini saling menopang satu sama lain. Skripsi ini menganalisis perbandingan beberapa aspek prinsipil dari kedua SKKL tersebut, dari protokol multipleks, teknologi multipleks, penguat, dan hal nonteknis. Selain itu, disertakan juga analisis kestabilan SKKL sebelum disimpulkan ke dalam analisis kinerja. Agar pembaca dapat memahami topik secara lebih baik, dasar-dasar sistem komunikasi kabel laut diberikan secara singkat pada bagian tersendiri.

Kata kunci: *Sistem Komunikasi Kabel Laut, SEA-ME-WE 3 & 4, backbone, teknologi informasi*

ABSTRACT

Name : Darius Yanthony

Major : Electrical Engineering

Title : Comparison dan Performance Analysis of SEA-ME-WE 3 and 4
Undersea Cable System

SEA-ME-WE 3 and 4 together is one of main backbone supporting world undersea cable system which is still operating now. Born at same generation, both of them are intended to provide redundancy for each other. This final project will analyze comparison of several important aspects of both cable systems, starting from the multiplexing protocol, multiplexing technology, amplifiers, and nontechnical aspects. In addition to that, analysis of cable system stability will also be presented before being integrated and concluded in performance analysis. In order to give better understanding of the topic to the readers, basic principles of undersea cable system will also be provided in separate parts.

Keywords: *Undersea cable systems, SEA-ME-WE 3 & 4, backbone, information technology*

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GRAFIK	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Pembatasan Lingkup Pembahasan	3
1.3 Tujuan dan Manfaat	4
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Umum Kabel Laut Serat Optik	5
2.2 Elemen-Elemen Sistem Kabel Laut	7
2.2.1. Penguat (Amplifier)	7
2.2.1.1. Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)	7
2.2.1.2. Raman Amplifier	10
2.2.1.3. EDFA/Raman Hybrid Amplifier	13
2.2.2. Pengulang (Repeater)	16
2.2.3. Equalizer	18

2.2.4. Branching Units	19
2.2.5. Kabel Serat Optik Bawah Laut	20
2.2.6. Peralatan Terminal Kabel Serat Optik Bawah Laut	21
2.3 Instalasi Kabel Serat Optik Bawah Laut	24
2.3.1. Peralatan Instalasi Kabel Bawah Laut	24
2.3.1.1. Cable Ship	24
2.3.1.2. Bajak (Plough)	25
2.3.1.3. Remote Operate Vehicle (ROV)	26
2.3.1.4. Autonomous Underwater Vehicle (AUV)	26
2.3.1.5. Jangkar Kabel	27
2.3.1.6. Software Tool	28
2.3.2. Proses Instalasi Kabel Bawah Laut	28
2.3.2.1. Shore and Landing	29
2.3.2.2. Plough Lay	29
2.3.2.3. Penyambungan	29
2.4 Protokol Multipleks	30
2.5 Teknologi Multipleks	35
2.6 Gangguan Pada Sistem Kabel Laut	38
BAB 3 ANALISIS ASPEK PENTING DALAM SEA-ME-WE 3 DAN 4	40
3.1 Peningkatan Kapasitas	40
3.2 Efektifitas Penguat	46
3.3 Ketahanan Terhadap Gangguan	50
BAB 4 ANALISIS PERBANDINGAN DAN KINERJA	
SEA-ME-WE 3 DAN 4	55
4.1 Profil SEA-ME-WE 3 dan 4	55
4.1.1. SEA-ME-WE 3	55
4.1.2. SEA-ME-WE 4	57
4.2 Hal Nonteknis yang Perlu Diketahui	58
4.3 Protokol Multipleks	61

4.4 Teknologi Multipleks	63
4.5 Peningkatan Kapasitas	65
4.6 Efektifitas Penguat	67
4.7 Kestabilan Sistem	71
4.8 Perbandingan Keseluruhan	75
BAB 5 PENUTUP	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Harapan	77
DAFTAR REFERENSI	78
LAMPIRAN	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.1. Elemen Sistem Kabel Laut	5
Gambar 2.2.1. Tingkatan Energi pada EDFA	8
Gambar 2.2.2. <i>Forward Pump</i>	9
Gambar 2.2.3. <i>Backward Pump</i>	9
Gambar 2.2.4. <i>Bidirectional Pump</i>	10
Gambar 2.2.5. Sistem Penguat Hibrid	13
Gambar 2.2.6. <i>Repeater</i>	16
Gambar 2.2.7. Pengulang vs Penguat Optik	17
Gambar 2.2.8. <i>Branching Unit</i>	19
Gambar 2.2.9. <i>Penampung Kabel Serat Optik Bawah Laut</i>	21
Gambar 2.2.10 Peralatan Terminal Kabel Serat Optik Bawah Laut	22
Gambar 2.2.11 Diagram Blok WDM pada SLTE	23
Gambar 2.3.1. <i>Cable Ship</i>	24
Gambar 2.3.2. <i>Plough</i>	25
Gambar 2.3.3. ROV Modern	26
Gambar 2.3.4. Bajak <i>Rennie, Gifford, Flatfish</i>	27
Gambar 2.3.5. Bajak <i>Detrenching, Deep Water Cut-and-Hold</i>	28
Gambar 2.4.1. Perbandingan Hirarki PDH dan SDH	32
Gambar 2.4.2. Penampung STM-1	33

Gambar 3.1.1. Konfigurasi DWDM dan Modul SONET	41
Gambar 3.3.1. Peta SKKL Dunia	54
Gambar 4.1.1 Rute SEA-ME-WE 3	56
Gambar 4.1.2 Rute SEA-ME-WE 4	58
Gambar 4.3.1 Diagram Ekivalensi PDH-SONET-SDH-PDH US	62
Gambar 4.4.1 WDM vs DWDM	64
Gambar 4.7.1. Gempa Hengchun Taiwan 2006	72
Gambar 4.7.2 Peta Kerusakan SKKL - Awal 2008	73
Gambar 4.7.3 Peta Kawasan Terimbas Gangguan Desember 2008	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.4.1.	Hirarki PDH di Beberapa Wilayah	32
Tabel 2.4.2.	Hirarki Modul SDH dan SONET	34
Tabel 2.5.1.	CWDM vs. DWDM	37
Tabel 3.2.1	Parameter Serat yang Diujicobakan	46
Tabel 4.2.1	SEA-ME-WE 3 vs. 4 dari Segi Nonteknis	60
Tabel 4.3.1	SEA-ME-WE 3 vs. 4 dari Segi Protokol Multipleks	63
Tabel 4.4.1	SEA-ME-WE 3 vs. 4 dari Segi Teknologi Multipleks	65
Tabel 4.5.1	SEA-ME-WE 3 vs. 4 dari Segi Peningkatan Kapasitas	67
Tabel 4.6.1	SEA-ME-WE 3 vs. 4 dari Segi Penguat	70
Tabel 4.7.1	SEA-ME-WE 3 vs. 4 dari Segi Kestabilan	75
Tabel 4.8.1	SEA-ME-WE 3 vs. 4	75

DAFTAR GRAFIK

Grafik 2.2.1. <i>Frequency Shift vs. Raman Gain</i>	11
Grafik 3.1.1. Kapasitas Modul SDH vs. # Panjang Gelombang	44
Grafik 3.1.2. # STM-64 vs. # STM-256	45
Grafik 3.2.1. L_{span} vs. L_{max} untuk SMF	47
Grafik 3.2.2. L_{span} vs. L_{max} untuk NZDSF	48
Grafik 3.2.3. # penguat vs. # pengulang untuk SMF	49
Grafik 3.2.4. # penguat vs. # pengulang untuk NZDSF	49
Grafik 3.3.1. Penyebab Utama Kerusakan Kabel Laut 1986-2003	51
Grafik 3.3.2. Faktor Gangguan dari Luar 1986-2003	51
Grafik 3.3.3. Distribusi Gangguan dari Luar Berdasar Kedalaman	52
Grafik 3.3.4. Distribusi Gangguan oleh Perikanan Berdasar Kedalaman	52
Grafik 4.5.1. Kapasitas STM-N vs. # Panjang Gelombang	66
Grafik 4.6.1. # pengulang vs # penguat untuk SEA-ME-WE 3	68
Grafik 4.6.2. # pengulang vs # penguat untuk SEA-ME-WE 4	69

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Serat optik telah berperan penting dalam pertumbuhan Internet dan industri telekomunikasi selama sekitar 30 tahun terakhir. Aplikasi serat optik dalam komunikasi termasuk pada jaringan bawah laut dan jaringan terestrial, lingkup metropolitan dan regional, jaringan antar kantor, sampai ke rumah-rumah (*fiber to the home*). Sebagian besar lalu lintas Internet dibawa oleh jalur antar samudra (*transoceanic*) yang menghubungkan jaringan *backbone long haul* terestrial dan jaringan regional. Jaringan yang dibangun di bawah laut ini telah menghubungkan hampir seluruh bagian di muka bumi ini. Peran penting sambungan bawah laut ini pada sistem telekomunikasi telah mempercepat perkembangan jenis serat optik bawah laut yang memenuhi standar kinerja dan reliabilitas.

Adapun salah satu jaringan *backbone* serat optik yang menjangkau Indonesia adalah seri SEA-ME-WE yang sudah mencapai seri ke 4 sekarang, menghubungkan 3 kawasan: Asia Tenggara (*South East Asia*), Timur Tengah (*Middle East*), dan Eropa Barat (*Western Europe*).

Seri pertama sistem komunikasi kabel laut ini mulai beroperasi pada tahun 1985 dengan teknologi FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). SEA-ME-WE 1 ini masih menggunakan kabel koaksial dan masih mentransmisikan sinyal analog. Bersama dengan perkembangan teknologi kabel serat optik dan digital, seri kedua SEA-ME-WE sudah berupa kabel serat optik dengan kapasitas yang jauh lebih besar dan panjang yang melebihi seri pendahulunya. SEA-ME-WE 2 mulai beroperasi pada tahun 1994 dan merupakan suatu lompatan besar dibanding seri pendahulunya. Perlu dicatat bahwa seri kedua masih menggunakan protokol PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*).

Namun hanya dalam hitungan tahun, operator jasa telekomunikasi di 3 kawasan ini menyadari bahwa terjadi *bottle-neck* di ketiga kawasan ini karena tuntutan jasa internet yang sangat pesat. Maka teknologi WDM diperkenalkan untuk SEA-ME-WE 3 yang mulai beroperasi pada tahun 1999. Selain itu, SEA-ME-WE sudah menggunakan transmisi SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*).

Beberapa tahun sesudah SEA-ME-WE 3 beroperasi, kembali dioperasikan seri keempat yang memiliki teknologi DWDM yang lebih mutakhir, dengan kapasitas awal hingga 10 GHz per lamda, reliabilitas tinggi, dan performa luar biasa. Adapun SEA-ME-WE 4 hanya dimaksudkan untuk mendukung SEA-ME-WE 3, bukan mengganti-kannya. Pada saat ini, hanya 2 seri terakhir ini yang masih beroperasi.

Masih beroperasinya SEA-ME-WE 3 dan 4 menjadi sesuatu yang menarik untuk disimak dan dipelajari. Walaupun dari segi generasi dapat dikatakan sama dan hanya terpaut beberapa tahun pengerjaannya, ada perbedaan cukup signifikan antara kedua sistem kabel laut ini dalam beberapa segi. Selain itu, kinerja kedua kabel sistem ini juga dapat dievaluasi.

Dari uraian singkat diatas, ada beberapa alasan mengapa topik analisis perbandingan dan kinerja SEA-ME-WE 3 dan 4 dijadikan judul tugas akhir ini:

- Internet telah menjadi sesuatu hal yang berkembang secara sangat pesat, selalu menarik untuk membahas perkembangan teknologi pendukungnya.
- Strategisnya peran SEA-ME-WE 3 dan 4 selaku *backbone* utama jaringan internet pada kawasan Timur Tengah dan Asia Selatan.
- Relevansi yang cukup tinggi dengan jaringan internet di Indonesia karena SEA-ME-WE 3 adalah sistem komunikasi kabel laut yang menjangkau Indonesia secara langsung.

Berdasar alasan-alasan diatas, maka kami mencoba menganalisis aspek-aspek dimana terdapat perbedaan antara kedua kabel sistem tersebut berikut mengevaluasi kinerjanya, sebelum sampai kepada suatu kesimpulan tentang sebagaimana pentingnya peranan kedua sistem kabel laut ini.

1.2. PEMBATAAN LINGKUP PEMBAHASAN

Materi sistem komunikasi kabel laut pada umumnya dan SEA-ME-WE pada khususnya sangat kaya dan padat karena sudah merupakan aplikasi makro di bidang sistem komunikasi serat optik. Oleh karena itu, tidak mungkin membahas segala hal yang ada pada sistem komunikasi kabel laut ini. Maka dari itu, perlu adanya rumusan pembahasan sekaligus pembatasannya agar skripsi yang disusun ini dapat lebih tepat sasaran.

Lingkup pembahasan yang akan dikerjakan pada prinsipnya adalah *analisis kinerja dan perbandingan SEA-ME-WE 3 dengan SEA-ME-WE 4*. Aspek-aspek yang dimaksud meliputi:

1. Protokol multipleks
2. Teknologi multipleks
3. Penguat (*amplifier*)
4. Gangguan (*fault*)
5. Hal Nonteknis

Namun pada bagian dasar teori, disertakan juga komponen penunjang sistem komunikasi kabel laut yang digunakan, seperti teknologi multipleks, *amplifier*, *repeater*, maupun alat-alat berat yang berperan pada saat instalasi kabel laut. Dengan demikian, diharapkan pembaca mendapatkan garis besar dari sistem komunikasi kabel laut.

Untuk membatasi pembahasan, kami tidak akan terlalu jauh membahas mengenai penjelasan secara teoritis dari fenomena, prosedur, masalah, atau hal lainnya yang menyinggung dasar-dasar teori sistem komunikasi serat optik. Dengan kata lain, isi dari skripsi ini menitikberatkan aplikasi sistem komunikasi serat optik. Di sisi lainnya, mengingat skripsi ini adalah untuk tingkat S1 reguler, secara otomatis isinya juga menyesuaikan, dalam artian pembahasan atau penjelasan yang lebih kompleks tidak akan ditemukan dalam skripsi ini.

1.3. TUJUAN DAN MANFAAT

Dalam penyusunan skripsi bertajuk SEA-ME-WE ini, ada beberapa tujuan yang ingin dicapai, yakni:

- Tujuan penugasan, yakni sebagai salah satu syarat kelulusan sebagai Sarjana Teknik Elektro Strata Satu Universitas Indonesia.
- Tujuan keilmuan, yakni menerapkan dasar-dasar sistem komunikasi serat optik dalam analisis perbandingan, kinerja, dan perhitungan pada SEA-ME-WE 3 dan 4.
- Tujuan pustaka, yakni karya ini di masa mendatang mungkin dapat digunakan salah satu referensi untuk penulisan karya dengan judul serupa atau sekedar sumber informasi.

Selain tujuan, ada beberapa manfaat yang dapat diperoleh dari penyusunan karya ini:

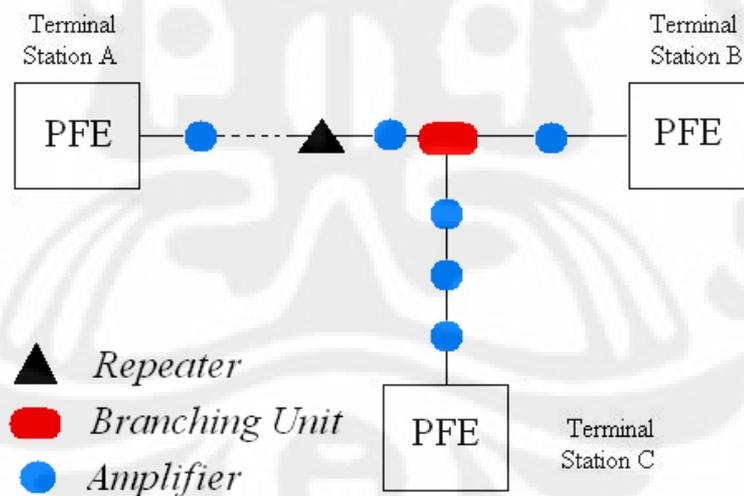
- Diperolehnya pemahaman secara menyeluruh mengenai aspek-aspek penting pendukung SEA-ME-WE 3 dan 4 pada khususnya dan sistem komunikasi kabel laut pada umumnya.
- Dicapainya suatu kesimpulan mengenai kestabilan SEA-ME-WE 3 dan 4 dalam peranannya sekarang.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1. TINJAUAN UMUM KABEL LAUT SERAT OPTIK

Secara elektrik dan optik, stasiun terminal dari jaringan akan dihubungkan oleh sistem komunikasi kabel laut. Sistem ini terdiri dari kabel-kabel untuk transmisi, *amplifier* untuk penguatan sinyal pada interval jarak tertentu, *repeater* untuk pengulangan sinyal, *equalizer* untuk memastikan penyebaran daya yang sama untuk setiap kanal, dan *branching units* yang memungkinkan transmisi lebih fleksibel. Komponen-komponen ini terhubung dengan PFE (*power feed equipment*), yang terletak di *terminal stations* di darat. Berikut adalah gambar diagram elemen sistem kabel laut:



Gambar 2.1.1. Elemen Sistem Kabel Laut

Pada sistem yang ada sekarang ini, data yang dikirimkan dalam bentuk gelombang cahaya ke dalam serat optik yang umumnya dari bahan silika di kedalaman laut mencapai kecepatan dalam orde Tbps (*Terra bit per second*) dengan mengguna-

kan teknik DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Namun sistem ini memiliki gangguan yang menyebabkan terjadinya degradasi pada data yang dikirimkan untuk jarak yang cukup jauh dari pengirim. Semakin jauh jaraknya, maka *noise* yang timbul juga semakin besar.

Oleh sebab itu, untuk transmisi jarak jauh, sinyal harus dikuatkan dalam interval tertentu. Sekarang, perkembangan teknologi penguat telah memungkinkan transmisi sinyal optik sampai jarak ribuan kilometer. Namun bila berbicara sistem komunikasi kabel laut dan pada khususnya SEA-ME-WE 3 dan 4, bentangan totalnya mencapai orde puluhan ribu kilometer. Karena dapat dikatakan penguat belum mampu mencapai jarak sejauh itu, bantuan pengulang (*repeater*) mutlak diperlukan. *Repeater* disini berfungsi sebagai alat yang memperbaharui sinyal secara total.

Adapun *Gain Flattening Filter* (GFF) diberikan di setiap *repeater* untuk memastikan bahwa sinyal yang dikirimkan antar kanal berada dalam tingkat daya yang sama. Filter ini tidak terlalu sempurna dalam meredam segala kemungkinan adanya *noise* dalam serat optik. Oleh karena itu, di dalam sistem disertakan suatu *equalizer*. Pada umumnya *equalizer* dipasang setiap rangkaian 12 *repeater* yang berurutan untuk memberikan distribusi daya yang sama untuk setiap *repeater*.

Kombinasi *amplifier* dan *repeater* ini memungkinkan tercapainya transmisi kabel laut jarak jauh. Namun kebanyakan jaringan diharapkan memiliki sistem yang sederhana yakni transmisi *point-to-point*, yang tidak dapat dipenuhi oleh kedua hal tersebut. Sebagai contoh, untuk kebutuhan saluran dari satu kabel menuju 2 atau lebih saluran, maka akan terjadi pemborosan jika perangkatnya disambungkan satu per satu. Untuk itu, dikenal istilah *branching unit* untuk menghemat saluran yang akan digunakan. BU diletakkan di *node* jaringan. Seperti dilihat pada gambar 2.1.1, jaringan mempunyai satu BU yang diletakkan pada *node*.

Di kedalaman air, komponen-komponen ini didesain untuk dapat menahan tekanan air sampai 800 atm (80Mpa), dengan daerah kerja pada tegangan mencapai 15 kV. Seperti terlihat pada gambar 2.1.1, PFE (*power feed equipment*)

yang terletak di setiap *terminal station* akan mencatu daya ke bagian-bagian di dalam dasar laut. Arus yang dibutuhkan oleh *repeater*, *amplifier*, *equalizer*, dan *BUs* pada setiap segmen dikirimkan melalui kabel tembaga yang dililitkan mengelilingi kabel serat optik di kedalaman air.

PFE tidak hanya mencatu daya ke komponen-komponen dalam air, tetapi juga digunakan untuk memonitor status elektrik dalam jaringan, distribusi daya. Standar industri dalam proses pembuatan alat-alat yang digunakan dipatok pada *lifetime* 25 tahun.

2.2. ELEMEN-ELEMEN SISTEM KABEL LAUT

Sebenarnya, elemen-elemen sistem kabel laut tidak hanya terbatas pada yang ditunjukkan pada gambar 2.1.1 atau yang disebutkan pada bagian 2.1. Namun apa yang disebutkan pada bagian tersebut, terutama gambar 2.1.1 adalah elemen-elemen yang menurut kami paling vital dalam sistem kabel laut. Pada bagian ini, akan dibahas satu per satu dari elemen-elemen tersebut dimulai dari penguat, pengulang, *equalizer*, *branching units*, dan kabel serat optik bawah laut.

2.2.1. PENGUAT (*AMPLIFIER*)

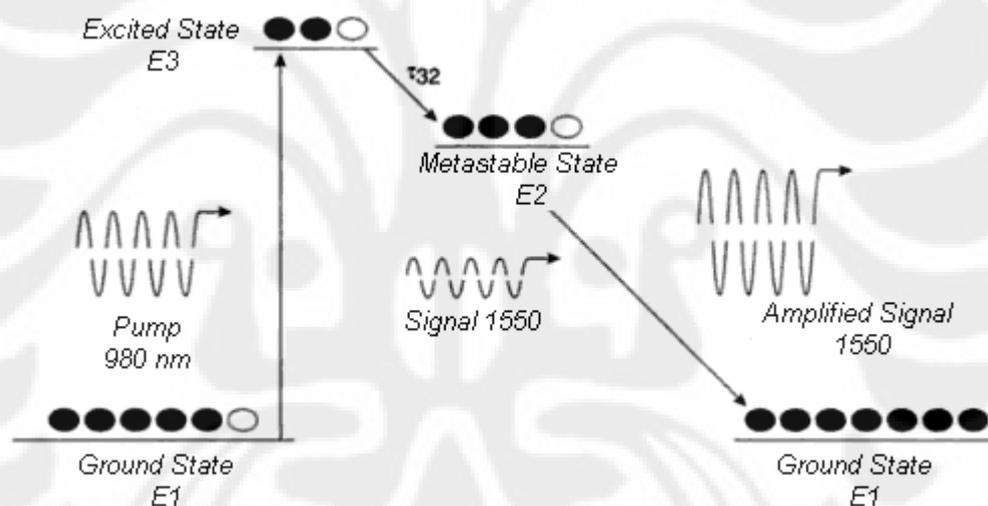
Penguat dapat dikatakan sebagai elemen terpenting dalam sistem komunikasi kabel laut modern. Hal ini disebabkan oleh peran penguat sebagai kendaraan utama bagi sinyal untuk melewati jarak yang jauh dan masih dapat diterima sisi penerima secara memuaskan. Saat ini ada 3 penguat yang banyak dibahas, dikembangkan, dan dipakai, yakni EDFA, Raman, dan gabungan keduanya. Subbab ini akan membahas satu per satu dari ketiga penguat itu.

2.2.1.1. *Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)*

EDFA merupakan penguat yang tingkat pengembangannya sudah matang dan aplikasinya sudah sangat luas, bahkan dapat dikatakan sudah mencapai titik jenuh. EDFA merupakan suatu serat optik yang intinya (*core*) dikotori oleh atom erbium sehingga dapat memberikan penguatan terhadap sinyal yang melaluinya. Erbium

itu sendiri merupakan elemen dari golongan lantanida (*lanthanides group*) yang mana elemen-elemennya sesuai sebagai bahan aktif dalam laser *solid-state* dikarenakan struktur elektronnya. Ion-ion dari elemen-elemen ini memiliki kemampuan menyerap foton dengan panjang gelombang yang tinggi.

Pada aplikasi dari pompa optik (gelombang kontinu 1480 nm/980 nm), elektron pada kondisi *ground* yang stabil, E_1 , menyerap sejumlah energi dan naik ke kondisi semi-stabil, E_2 . Adanya kondisi seperti itu ditentukan oleh 2 faktor material: frekuensi transisi atom, dan panjang gelombang transisi dimana mayoritas energi pompa mengalir. Panjang gelombang transisi ini berada pada pita 1550 nm yang strategis, maka dari itu EDFA populer pada jaringan WDM komersial.

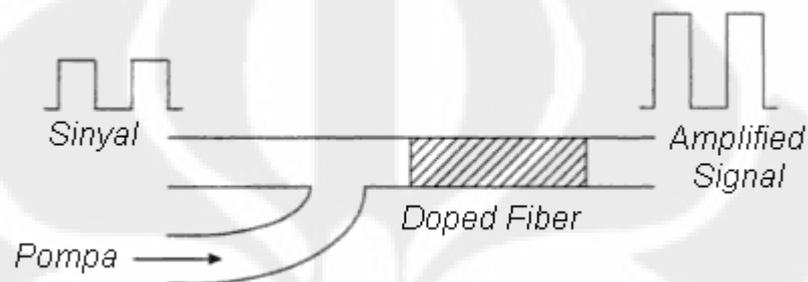


Gambar 2.2.1. Tingkatan Energi pada EDFA^[1]

Pada prinsipnya, EDFA memiliki 3 tingkat energi, seperti pada gambar diatas. Tiga tingkat energi E_1 , E_2 , dan E_3 masing-masing merujuk ke kondisi ground, eksitasi, dan semi-stabil. Pompa laser memompa sinyal gelombang kontinu pada 1480/980 nm. Elektron pada tingkat *ground* (yang jumlah sesaatnya N_1) menyerap energi pompa ini dan tereksitasi ke tingkat E_3 . Volume elektron yang narik ke tingkat energi E_3 ini dinyatakan sebagai N_3 . E_2 merepresentasikan kondisi semi-stabil dengan umur τ_{32} (waktu transisi dari $E_3 \rightarrow E_2$). Elektron dari E_2 jatuh ke E_1 ,

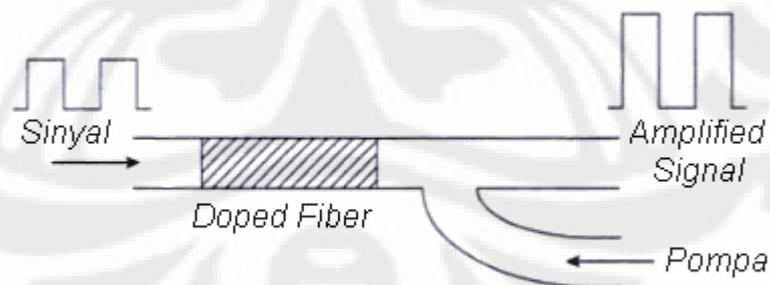
memancarkan foton pada frekuensi ν . Sinyal optik yang melewati sistem tersebut akan dikuatkan dengan penyerapan foton-foton yang dilepaskan ini.

Daya pompa yang baik dapat meningkatkan gain dari sinyal. Efisiensi 1 dB/mW dapat dicapai dengan pompa 980 nm, dengan demikian dapat diperoleh gain WDM total dari semua kanal sebesar 30 dB. EDFA dapat dioperasikan dengan memompanya pada arah yang sama atau berlawanan dengan sinyal.



Gambar 2.2.2. Forward Pump^[1]

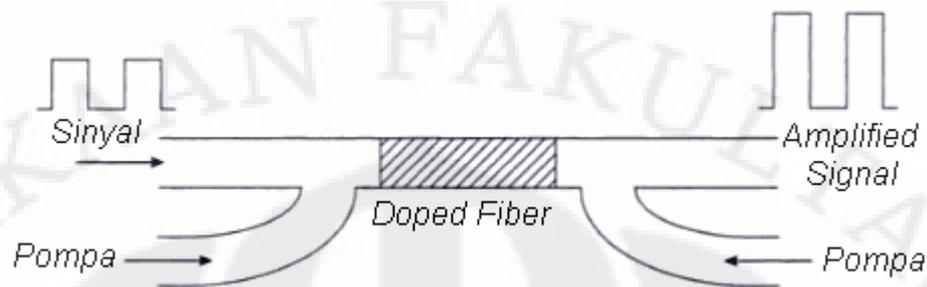
Pada saat sinyal dipompa dengan arah yang sama dengan sinyal, kita menyebutkan *forward pumping* (gambar 2.2.2). Sementara saat sinyal dipompa berlawanan arah dengan sinyal WDM, kita kenal dengan *reverse pumping* (gambar 2.2.3).



Gambar 2.2.3. Backward Pump^[1]

Jenis ketiga adalah saat kedua pompa diatas digabungkan, dengan arah ke depan dan belakang pada saat bersamaan. Metode ini dikenal dengan *bidirectional pumping*. Pada metode ini, profil gain sepanjang daerah yang dikotori (*doped*)

hampir linear, yang merupakan suatu keuntungan. Gambar dibawah menunjukkan *bidirectional pumping*:



Gambar 2.2.4. Bidirectional Pump^[1]

Spektrum gain EDFA menjadi cukup lebar. Profil gain pada pita-C mengalami kurva berpuncak ganda, penguatannya dapat berkisar antara 7-30 dB dan tergantung dari daya pompa, waktu relaksasi, frekuensi transisi, dan daya saturasi. Untuk penguat, gain meningkat secara eksponensial dengan daya pompa yang diterapkan. Pada titik tertentu, gain mengalami saturasi, sehingga peningkatan daya pompa malah mengurangi gain.

2.2.1.2. Raman Amplifier

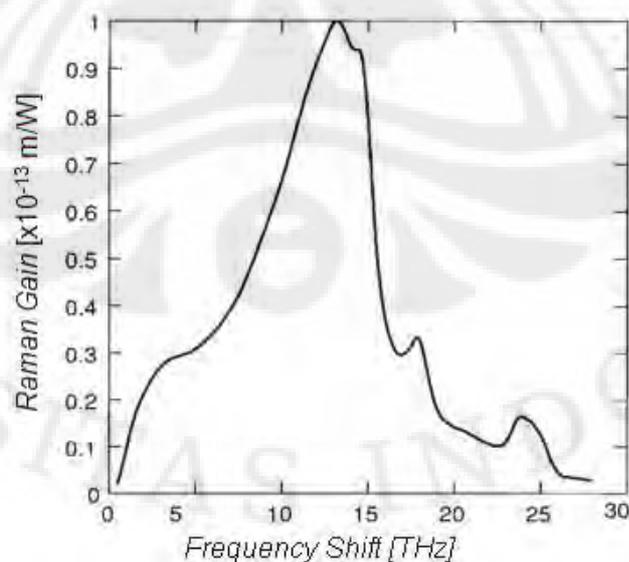
Penguat Raman adalah penguat yang didasarkan dari fenomena penghamburan Raman yang distimulasikan (SRS – *Stimulated Raman Scattering*). Fenomena ini ditemukan oleh Chandrasekhara Venkata Raman, seorang fisikawan India pada tahun 1922 dalam bentuk cair, dan oleh Grigory Landsberg dan Leonid Mandelstam pada bentuk kristal. Dalam bentuk gas, penghamburan Raman dapat terjadi oleh perubahan pada energi elektrik, rotasi, atau vibrasi dari suatu molekul.

Raman scattering terjadi saat foton sinyal frekuensi rendah menginduksi penghamburan tidak elastis dari foton *pump* yang memiliki frekuensi lebih tinggi pada medium optik dalam daerah nonlinear. Akibatnya, foton sinyal lain dihasilkan, dengan energi berlebih yang dilewatkan secara resonan ke kondisi vibrasi dari medium. Proses ini, bersama dengan proses emisi lain yang distimulasi, memungkinkan penguatan optik secara menyeluruh.

Serat optik sekarang paling banyak digunakan sebagai medium nonlinear untuk SRS, pada hal ini ditandai dengan selisih frekuensi resonan sekitar 11 THz (yang berarti pergeseran panjang gelombang sekitar 1550 nm sebanyak sekitar 90 nm). Proses penguatan SRS dapat disusun secara *cascade*, yang mana akan mengakses panjang gelombang apapun pada serat *window* pengarah dengan rugi daya kecil. Selain itu, pada optik sangat cepat dan nonlinier, penguatan Raman memungkinkan pencakupan semua *band* panjang gelombang dan penguatan sinyal terdistribusi dalam *line* yang sama.

Penguat Raman, seperti halnya EDFA, dapat dipompa ke 3 arah, yakni depan, belakang, dan bi-direksional. Namun panjang gelombang dari laser pemompa dapat bervariasi pada kisaran yang besar, dan tidak harus memiliki nilai diskrit pada frekuensi atau panjang gelombang.

Dasar dari penguatan Raman adalah menemukan satu atau lebih sumber pemompa yang cukup jauh frekuensinya dari sinyal yang ingin dikuatkan agar diperoleh penguatan sebesar mungkin pada prosesnya. Untuk melakukan ini kita perlu mengetahui karakteristik gain Raman sebagai fungsi dari pergeseran frekuensi dari material yang digunakan untuk penguatan. Kita dapat melihatnya pada grafik berikut, yang merupakan hasil pengukuran dari serat optik mode tunggal yang intinya dibuat dari SiO₂ dan GeO₂.



Grafik 2.2.1. Frequency Shift vs. Raman Gain^[2]

Kita dapat melihat pada grafik diatas bahwa pergeseran frekuensi yang memberikan gain Raman terbesar ada pada 13.5 THz. Sebagai contoh, sinyal dengan panjang gelombang 1550 nm memiliki frekuensi 193.4 THz. Sesuai prinsip penguatan Raman, energi akan diserap oleh sinyal dengan panjang gelombang yang lebih panjang, artinya kita perlu memilih sumber pompa dengan frekuensi yang lebih tinggi 13.5 THz dari sinyal, yakni 206.9 THz atau panjang gelombang 1490 nm.

Namun, pada aplikasi sebenarnya, apalagi berbicara sistem multikanal, hal ini tidak mudah dilakukan karena kanal yang berbeda-beda dikuatkan dan beratenuasi dengan nilai yang berbeda-beda, bila kita hanya menggunakan satu pompa. Akibatnya, perbedaan intensitas yang tinggi dapat muncul antara kanal yang berbeda setelah beberapa kilometer propagasi. Solusinya adalah menyediakan lebih dari satu pompa. Optimasi suatu sistem berpenguat Raman sangat tergantung dari distribusi intensitas dan frekuensi pompa-pompa tersebut.

Penguat Raman juga memiliki beberapa kelemahan seperti:

- Banyaknya laser pompa yang diperlukan (terkadang mencapai 8-12) untuk mendapatkan hasil yang baik untuk kisaran 100 nm.
- Dibandingkan dengan EDFA, intensitas pompa yang relatif tinggi perlu digunakan untuk mendapat penguatan yang lumayan (beberapa ratus mW – 1-2 W)
- *Cross-talk* dapat terjadi antara sinyal dan kanal pompa dalam kondisi tertentu.

Biasanya, penguat Raman digunakan untuk mengkompensasi kerugian pada sistem telekomunikasi dan untuk melakukan hal ini, pompa Raman dengan intensitas sebesar puluhan mW cukup untuk puluhan kilometer kabel serat optik. Maka dari itu penguat Raman biasanya digabungkan dengan EDFA atau digunakan sebagai pra-penguat.

Namun, sekarang, penguatan sebesar lebih dari 10 dB dapat dihasilkan dengan penguatan Raman pada serat optik dengan panjang beberapa puluh kilometer. Hasil menunjukkan bahwa menggunakan dioda laser berintensitas tinggi

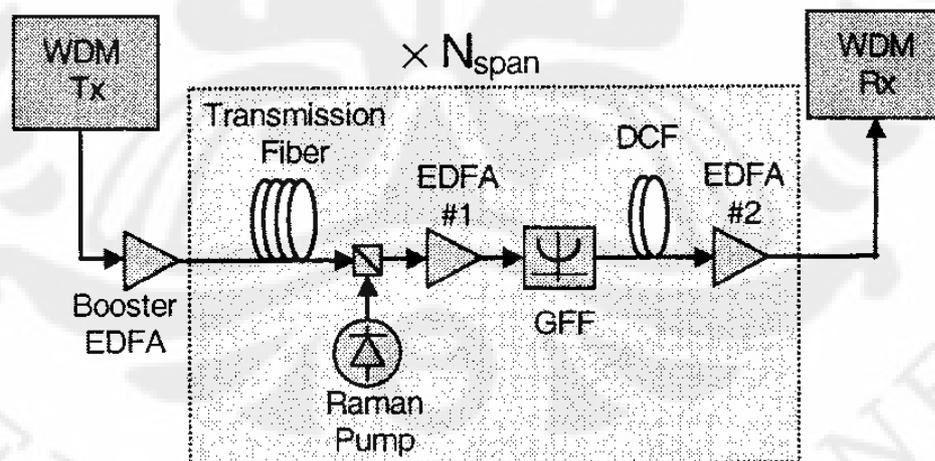
memungkinkan penggunaan penguatan Raman secara mandiri pada sistem komunikasi serat optik.

2.2.1.3. EDFA/Raman Hybrid Amplifier

Dengan kehadiran 2 jenis penguat diatas, yakni Raman dan EDFA, ternyata kita tidak sampai pada pemilihan antara EDFA dan Raman, melainkan mendapatkan suatu pilihan baru yakni menggabungkan keduanya untuk memberikan hasil yang lebih baik.

Pemikiran tersebut berangkat dari karakteristik berupa keterbatasan dan keunggulan dari kedua penguat yang sudah ada. EDFA murni bila dipaksakan untuk jarak jauh cenderung dibatasi oleh efek nonlinear dan rendahnya OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*). Sementara itu, sistem Raman murni cenderung dibatasi oleh penurunan SNR akibat *Rayleigh backscattering* ganda. Kombinasi antara keduanya ternyata memberikan hasil yang lebih baik, dengan poin utama Raman dapat membantu EDFA dalam aplikasi jarak jauh berkapasitas tinggi.

Berikut adalah diagram blok yang dapat digunakan saat kita ingin menganalisis penguat hibrid:



Gambar 2.2.5. Sistem Penguat Hibrid^[3]

Setiap bentangan (*span*) tersusun dari boks diatas, yakni dengan transmisi serat optik yang dipompa ke belakang (*backward*) oleh pompa Raman, EDFA #1 dengan gain G_{E1} , *gain flattening filter* (GFF), *dispersion compensating fiber*

(DCF), dan EDFA #2 dengan gain G_{E2} . Panjang serat optik dan parameter dispersi adalah L_{span} dan D untuk serat transmisi, serta L_{DCF} dan D_{DCF} untuk serat DCF.

Adapun panjang total dari sambungan adalah $L_{tot} = N_{span}L_{span}$. Serat transmisi dipompa secara *backward* dengan tujuan mendapatkan gain Raman G_{RA} . L_{DCF} ditentukan oleh nilai k_{comp} dari kompensasi dispersi: $L_{DCF} = -k_{comp}D/D_{DCF}$. Ingat bahwa $k_{comp} = 1$ berarti dispersi sepenuhnya terkompensasi setiap bentangan. Kita juga mengasumsi bahwa gain diatur sedemikian hingga dapat mengkompensasi rugi total dari sambungan, yang hasilnya:

$$G_{tot} = G_{RA}G_{E1}G_{E2} = \frac{1}{\exp(-\alpha_s L_{span})T_F \exp(-\alpha_{DCF} L_{DCF})} \quad (2.1)$$

Dimana α_s dan α_{DCF} masing-masing adalah koefisien rugi serat untuk transmisi dan serat DCF, dan T_F adalah rugi yang disebabkan oleh GFF. Persamaan diatas menentukan nilai G_{tot} namun tidak dapat menentukan berapa gain masing-masing.

Bila kita menganggap propagasi dari sinyal dan derau pda sistem gambar 2.2.5 diatas dalam kondisi yang memenuhi persamaan 2.1, OSNR (*optical signal-to-noise ratio*) pada penerima dapat ditentukan dalam bersamaan dibawah ini:

$$OSNR = \frac{P_{TX}}{hfB_o N_{span} \left[\left(n_{eq,RA} + n_{sp,E1} \frac{G_{E1} - 1}{G_{E1} G_{RA}} \right) \exp(+\alpha_s L_{span}) + n_{sp,E2} (G_{E1} - 1) \right]} \quad (2.2)$$

dimana P_{TX} = daya rata-rata per kanal pada masukan setiap bentangan,

h = konstanta Planck,

f = frekuensi pembawa optik,

B_o = lebarpita (bandwidth) dimana derau optik diintegrasikan,

$n_{eq,RA}$ = pemfaktor ekivalen derau masukan,

$n_{sp,E1}, n_{sp,E2}$ = pemfaktor emisi spontan untuk kedua EDFA

dan faktor $n_{eq,RA}$ tergantung dari daya pompa, panjang serat, dan efisiensi Raman dari serat, dan pada faktor *Rayleigh backscattering factor*.

Untuk membandingkan konfigurasi sistem dengan perbedaan gain Raman, yang berarti juga dengan profil daya yang berbeda sepanjang z , kita perlu memperkirakan efek dari nonlinearitas Kerr pada seluruh bagian sambungan. Kita menggunakan parameter k_{NL} yang kita sebut bobot nonlinear, yang secara matematis merupakan jumlah pergeseran fasa non-linear yang dialami suatu kanal sepanjang sambungan transmisi, yang dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned} k_{NL} &= \int_{link} \gamma(z)P(z)dz \\ &= P_{TX}N_{span}[\gamma L_{eff} + \gamma_{DCF} \exp(-\alpha_s L_{span}) \cdot G_{RA}G_{E1}T_F L_{eff,DCF}] \end{aligned} \quad (2.3)$$

dimana γ dan γ_{DCF} adalah koefisien nonlinear, L_{eff} dan $L_{eff,DCF}$ masing-masing adalah panjang efektif untuk serat transmisi maupun DCF.

Lalu kita menyatakan P_1 sebagai nilai dari P_{TX} , yang membuat $k_{NL} = 1$ setelah hanya 1 bentangan. Dinyatakan juga N_1 sebagai jumlah derau yang memasuki sistem setiap bentangan. P_1 ternyata membuat persamaan 2.3 bernilai 1 dengan $N_{span} = 1$. Dari sana, terlihat bahwa daya yang ditransmisikan dapat ditulis sebagai $P_{TX} = k_{NL}P_1/N_{span}$, dan jumlah derau pada ujung dari sambungan adalah $N_{tot} = N_1N_{span}$. Maka dari itu, OSNR pada penerima bisa ditentukan sebagai berikut:

$$OSNR = \frac{k_{NL}P_1}{N_1N_{span}^2} = \frac{k_{NL}}{N_{span}^2} OSNR_1 \quad (2.4)$$

dimana $OSNR_1$ merupakan rasio dari P_1 dan N_1 yang didefinisikan diatas. $OSNR_1$ tergantung pada panjang bentangan L_{span} , dan untuk suatu L_{span} , nilainya akan berlainan untuk setiap gain penguat walaupun hasil pengaliannya tetap memenuhi kondisi transparansi persamaan 2.1.

Pada bagian ini, fokus berada pada pemaksimalan jarak yang dapat dicapai sebagai fungsi dari L_{span} , dan dengan minimum $OSNR = OSNR_{min}$, serta k_{NL} maksimum yang dapat ditoleransi, yakni k_{NL}^{max} . Dari persamaan 2.4,

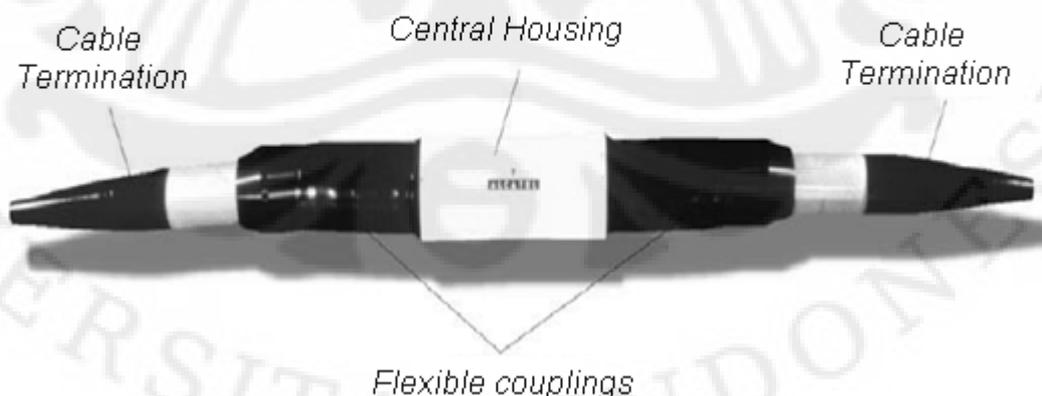
mengingat N_{span} setara dengan rasio panjang total ke panjang bentangan, jarak maksimum yang dapat dijangkau dapat diturunkan dan dinyatakan dalam persamaan:

$$L_{max} = \text{int} \left\{ \sqrt{\frac{k_{NL}^{max}}{OSNR_{min}}} OSNR_1 \right\} L_{span} \quad (2.5)$$

Perlu diingat bahwa konfigurasi optimal penguat hibrid bergantung pada L_{span} masing-masing, serta keseimbangan gain yang berlainan antara penguat Raman dan EDFA, pompa Raman yang berbeda, dan tingkat daya luncur setiap kanal yang berlainan.

2.2.2. PENGULANG (*REPEATER*)

Teknologi penguat sudah berkembang dengan pesat dan saat ini penguat sudah mengurangi tingkat keperluan terhadap pengulang secara drastis. Walaupun demikian, untuk SKKL berjarak puluhan ribu kilometer, penguat belum dapat berdiri sendiri dalam mentransmisikan sinyal. Dimana batas jangkauan maksimal suatu penguat tercapai, disana dibutuhkan suatu pengulang untuk memperbaharui sinyal secara menyeluruh sebelum rangkaian penguat dapat dipasang lagi. Bentuk fisik dari pengulang (*repeater*) dapat dilihat pada gambar berikut:

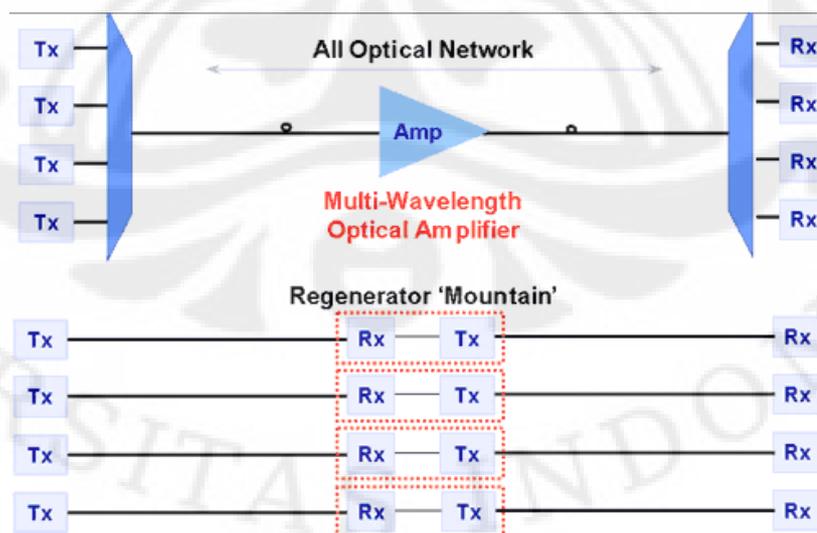


Gambar 2.2.6. Repeater^[4]

Dalam gambar, terlihat di bagian tengah dari *repeater* terdapat *central housing*. *Central housing* (rumah kabel) biasanya berdiameter 300 mm dengan panjang 1000–1500 mm. Pada komponen inilah ditempatkan *amplifier* atau penguat dan akan berhubungan langsung dengan daya dari PFE dan peralatan elektronik untuk mengawasi kinerja dari *repeater*. Adapun *cable termination* adalah tempat dipasangnya kedua ujung yang ingin dibangkitkan ulang sinyalnya.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *repeater* dipasang dengan sebuah komponen yaitu GFFs (*gain flattening filters*) yang berfungsi untuk menjaga keseragaman daya yang masuk pada setiap kanal dan juga untuk memastikan BER sinyal yang dikirim sesuai dengan kebutuhan minimum dari kanal yang ada. Untuk *bandwidth* yang besar, biasanya digunakan lebih dari satu untuk mengkompensasi ketidaksimetrian *gain* yang disebabkan oleh *amplifier*.

Pengulang bekerja dengan cara O-E-O (optik-elektrik-optik) dengan mengembalikan sinyal optik (yang perlu diulang) kembali ke sinyal elektrik sebelum membentuk, mewaktukan, dan mengirim ulang sinyal tadi (setelah diubah lagi ke sinyal optik). Karena pengulang pada dasarnya membentuk dan mengirimkan ulang sinyal, pengulang mampu membuang derau yang ada, yang tak mampu dibedakan oleh penguat sehingga ikut dikuatkan bersama dengan sinyal asli.



Gambar 2.2.7. Pengulang vs. Penguat Optik^[5]

Pengulang mempunyai biaya mahal karena pengulang tak dapat memperbaharui sinyal termultipleks. Karena sifat O-E-Onya, sinyal DWDM akan dipecah kembali dan setiap panjang gelombang harus diberikan pengulang sendiri-sendiri. Dengan perkembangan penguat optik yang mampu menguatkan sinyal optik DWDM tanpa mengembalikannya ke sinyal elektrik terlebih dahulu, jumlah pengulang yang dibutuhkan pada SKKL modern sudah sangat menurun.

2.2.3. EQUALIZER

Equalizer diperlukan dalam suatu jaringan komunikasi kabel laut untuk memastikan bahwa daya dari sinyal yang dikirimkan ke setiap kanal sama. Seperti telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, GFF pada setiap *repeater* digunakan untuk mengoreksi setiap kesalahan dari spektrum keluaran daya dari EDFA. Namun proses untuk menghasilkan spektrum daya yang rata atau datar di sepanjang kanal bukanlah solusi yang terbaik. Terdapat variasi spesifikasi dari setiap komponen yang tidak dapat dihindari dan diprediksi. Terdapat 2 macam *equalizer*, yakni *passive* dan *active equalizer*.

Keberagaman spesifikasi tersebut dikontrol oleh *passive equalizer*. Sedangkan untuk menghindari penyimpangan tersebut dalam waktu yang cukup lama digunakan *active equalizer*. Komponen ini mempunyai fungsi utama untuk memperbaiki error secara kumulatif dari setiap *repeater* karena perbedaan spesifikasinya, yang karakteristiknya disetting di pabrik. *Passive equalizer* diletakkan setiap 10–15 *repeater* yang berurutan (tergantung dari sistem yang digunakan) yang disesuaikan dengan sebuah *equalization block*. Semakin akurat penyamaan (*equalization*) yang dilakukan, maka *block* yang dihasilkan semakin besar.

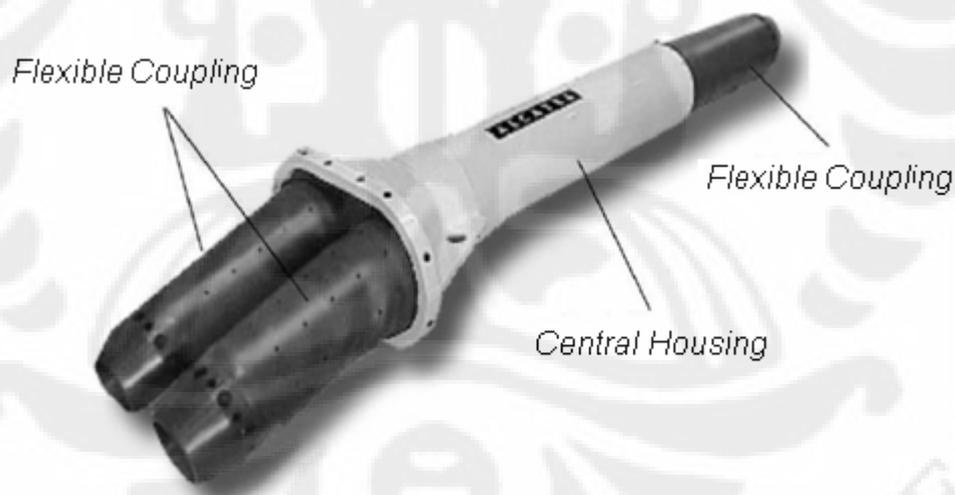
Sedangkan untuk menghindari penyimpangan tersebut dalam waktu yang cukup lama digunakan *active equalizer*. Penuaan pada serat optik serta penambahan kabel pada saat perbaikan yang dilakukan dapat menyebabkan naiknya rugi–rugi saat itu dibandingkan dengan rugi–rugi pada saat masih baru.

2.2.4. BRANCHING UNITS

Branching Units (BUs) memungkinkan *routing* untuk semua kabel fiber dalam suatu sistem komunikasi kabel laut. Dimensinya sama dengan *repeater*, namun salah satu ujungnya mempunyai koneksi untuk dua kabel. Terdapat 2 macam BUs yakni *Full-Fiber – Drop* BUs dan *Wavelength Add – Drop* BUs.

Konfigurasi elektrik BUs dikendalikan dari *terminal station* yang ada di darat. BUs harus mempunyai sistem *grounding* yang baik untuk mencegah terjadinya kerusakan pada saat kabel putus atau jika ada tegangan luar yang bisa mengganggu kinerja BUs.

Untuk mencegah korosi oleh air asin pada laut, BUs biasanya dicatu dengan polaritas negatif oleh PFE (*power feed equipment*), sehingga gas-gas seperti klorin tidak mengakibatkan korosi. Tetapi BU juga harus bisa diberikan polaritas positif untuk waktu yang singkat, yang biasanya digunakan pada saat perbaikan kabel. Berikut adalah gambar untuk *Branching Units*:



Gambar 2.2.8. Branching Units ^[4]

Pemasangan BUs dapat menghabiskan waktu selama tiga hari untuk pemasangannya. Pemasangan ini melibatkan 3 kabel yang akan digabungkan. Dua kabel yang biasanya disebut sebagai *branch* atau cabang didekatkan satu sama lain dan satu kabel yang lain disebut sebagai *trunk* atau kabel utama. Dalam proses penyatuan kabel ini juga perlu diperhatikan permukaan laut tempat proses

penyambungan dilakukan, dimana biasanya dipilih permukaan yang tidak curam dan struktur permukaan yang lunak atau tidak kasar (kedalaman 1000–1500 m).

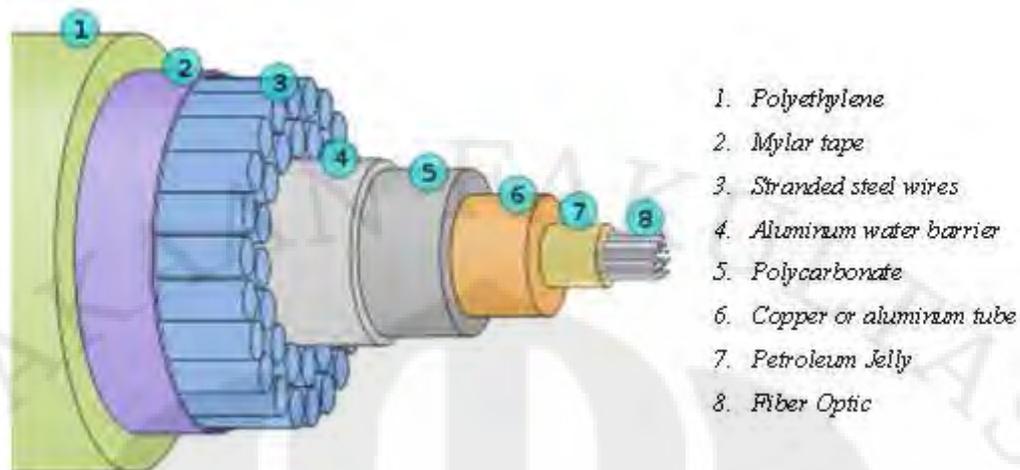
2.2.5. KABEL SERAT OPTIK BAWAH LAUT

Dalam sistem komunikasi serat optik, kabel laut tingkat kualitas transmisi ditentukan oleh banyak hal dan salah satunya adalah teknologi kabel yang digunakan. Teknologi kabel yang baik mampu melayani kebutuhan komunikasi dengan kualitas yang baik. Oleh karena itu, penting untuk membahas teknologi kabel yang mampu mendukung sistem komunikasi kabel laut dengan baik, mulai dari jenis kabel, konfigurasi, instalasi, sampai kepada perbaikannya.

Pengaruh kedalaman dan jarak transmisi menyebabkan spesifikasi kabel laut untuk transmisi jarak jauh harus lebih kuat dari segi fisis dan konstruksi dibanding kabel laut untuk transmisi jarak dekat. Sebagai tambahan, konstruksi kabel laut didesain untuk mengatasi masalah efek *stress-induced polarization mode dispersion (PMD)* dan untuk mengkompensasi efek *total system chromatic dispersion (CD)* dengan menggunakan *in-line compensation fiber*.

Berdasarkan masa kerjanya, kabel laut yang baik mampu bertahan selama kurang lebih 25 tahun dan kabel laut harus mampu mendukung operasi normal pada saat *manufacturing, laying* ataupun *repairing*. Dari segi ketahanan terhadap suhu dan tekanan permukaan laut, kabel laut dirancang agar mampu bertahan pada kedalaman 8000 m dengan tekanan 800 atm dan rentang suhu antara -10C sampai 50C. Selain itu kabel laut juga harus tahan terhadap resapan air dan hidrogen, persyaratan standar menyebutkan bahwa kabel laut tidak boleh memiliki nilai resapan hidrogen lebih dari 0,003 dB/km.

Hal lain yang tak kalah pentingnya adalah konstruksi pelindung kabel serat optik itu sendiri. Berikut adalah gambar penampang kabel serat optik bawah laut:



Gambar 2.2.9. Penampang Kabel Serat Optik Bawah Laut ^[6]

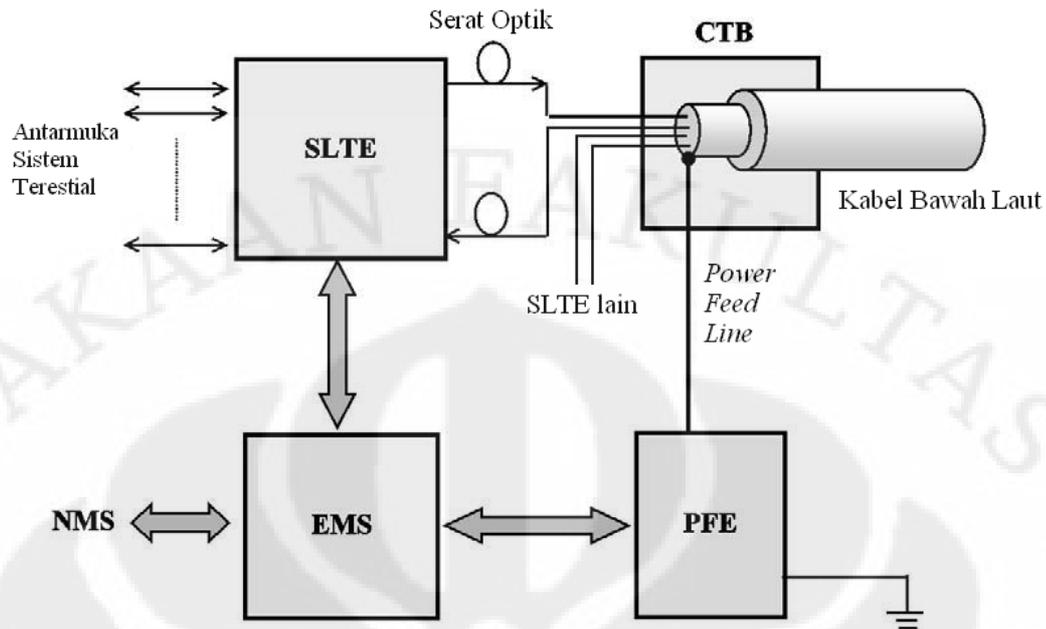
Adanya konstruksi yang berlapis lapis dari kabel laut memungkinkan inti serat optik mendapatkan proteksi yang lebih terhadap gangguan yang menurunkan kualitas transmisi sistem komunikasi kabel laut. Akan tetapi, desain dari kabel laut tentu saja ditentukan juga oleh kondisi daerah perairan yang dilewati, mulai dari kedalaman, lempeng dasar laut, besarnya arus laut, iklim, dan lain sebagainya.

2.2.6. PERALATAN TERMINAL KABEL SERAT OPTIK BAWAH LAUT

Peralatan pada terminal kabel serat optik bawah laut terdiri dari :

- *Submarine line terminal equipment (SLTE)*
- *Power-feed equipment (PFE)*
- *Element management system (EMS)*
- *Cable termination box (CTB)*

Berikut adalah diagram peralatan pada terminal kabel serat optik bawah laut:



SLTE: *Submarine Line Terminal Equipment*

PFE: *Power Feed Equipment*

EMS: *Element Management System*

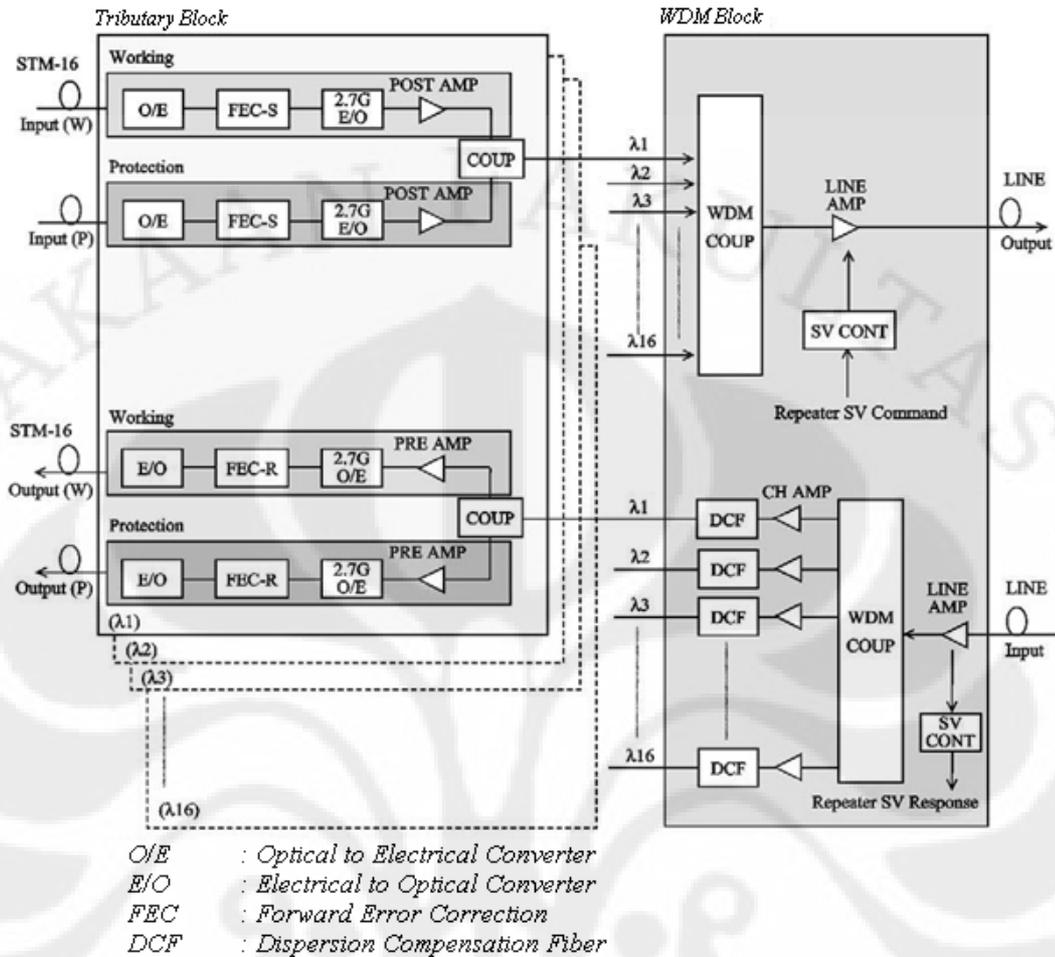
NMS: *Network Management System*

CTB: *Cable Termination Box*

Gambar 2.2.10. Peralatan Terminal

Kabel Serat Optik Bawah Laut ^[4]

Pada diagram diatas, terlihat secara cukup jelas bagaimana terminal kabel serat optik bawah laut beroperasi. Masukan ke atau keluaran dari kabel bawah laut diisolasi oleh CTB. PFE yang ditanahkan akan disambungkan secara langsung ke kabel optik bawah laut. Adapun SLTE melakukan pemrosesan data masuk dan keluar dari kabel optik bawah laut, dimana peralatan WDM termasuk didalamnya. Semua elemen diatas dikontrol oleh bagian sistem manajemen yang terdiri dari EMS dan NMS.



Gambar 2.2.11. Diagram Blok WDM pada SLTE ^[4]

SLTE melakukan modulasi antara sinyal trafik terrestrial dan sinyal yang sebenarnya pada saluran transmisi kabel optik bawah laut. Perkembangan SLTE yaitu pertama sekali pada tahun 1985, dengan kecepatan 280 Mbps. Sistem ini digunakan untuk panjang gelombang 1.3 mikrometer dan merupakan *multiplexing* dari 2 trafik sinyal 140 Mbps.

Selanjutnya SLTE ini berkembang pada tahun 1990 dengan kecepatan 560 Mbps, dan panjang gelombang optik yang digunakan pada transmisi 1.55 mikrometer. Pada generasi kedua ini, teknologi jaringan mengalami perubahan dari system *plesiochronous digital hierarchy* (PDH) ke *synchronous digital hierarchy* (SDH).

Kemudian SLTE berkembang lagi pada tahun 1993 yang disebut juga SLTE generasi ke-3 dengan konfigurasi sebesar 5 Gbps. Adapun yang digunakan pada

sistem komunikasi kabel laut termutakhir pada umumnya yang berkapasitas 10 Gbps, masih dalam generasi ke 3. Berikut adalah diagram blok WDM pada SLTE:

2.3. INSTALASI KABEL SERAT OPTIK BAWAH LAUT

Instalasi kabel serat optik bawah laut adalah salah satu bagian terpenting dalam rangkaian proyek pembangunan sistem komunikasi kabel laut. Subbab ini akan membahas hal tersebut, dimulai dengan peralatan-peralatan yang digunakan, sebelum masuk ke proses instalasi itu sendiri.

2.3.1. PERALATAN INSTALASI KABEL BAWAH LAUT

Pada bagian ini, beberapa peralatan yang memegang peranan penting dalam instalasi kabel laut akan dibahas, dimulai dari *cable ship*, bajak, *remote operate vehicle*, *autonomous underwater vehicle*, jangkar kabel, dan *software tool*.

2.3.1.1. *Cable Ship*



Gambar 2.3.1. *Cable Ship* ^[4]

Dalam melakukan instalasi kabel optik kita memerlukan *cable ship* yang berukuran besar. Karena proses instalasi dilakukan di laut, maka tidak mungkin tidak kita memerlukan kapal untuk mengangkut kabel optik yang akan ditanam.

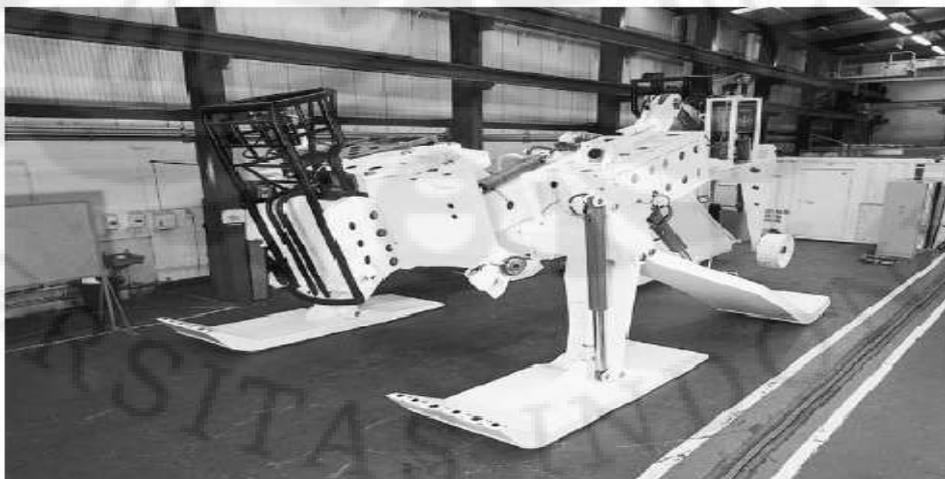
Dalam *cable ship* ini akan diletakkan juga berbagai macam peralatan instalasi lainnya.

Secara umum desain *cable ship* harus memenuhi persyaratan berikut:

- Kapal memiliki panjang minimal 100 m dan mempunyai kekuatan menampung beban kapasitas 100 ton pada bagian jangkar kapal.
- Daya mesin kapal minimal 10.000 HP.
- GPS *navigation system*, untuk meneliti kondisi topografi permukaan laut sehingga bisa menentukan tempat yang baik untuk peletakan kabel laut.
- Dilengkapi dengan *repeater, amplifier, equalizer, branching unit*.
- Terdapat ruangan *power feeding, transmission, electric & optical test equipment*.
- Terdapat ruang pengontrol.

2.3.1.2. Bajak (*Plough*)

Bajak yang digunakan dalam digunakan dalam instalasi kabel laut memiliki bentuk dan dimensi yang berbeda dengan bajak biasa. Bajak ini memiliki berat sekitar 20-30 ton. Bajak digunakan untuk menanam kabel optik dengan kedalaman sekitar 2-3 m tergantung pada kekerasan material laut tempat ditanamnya kabel. Untuk proses ini biasanya kapal menarik bajak dengan kecepatan 2–3 knot. Berikut adalah gambar bajak yang dimaksud:

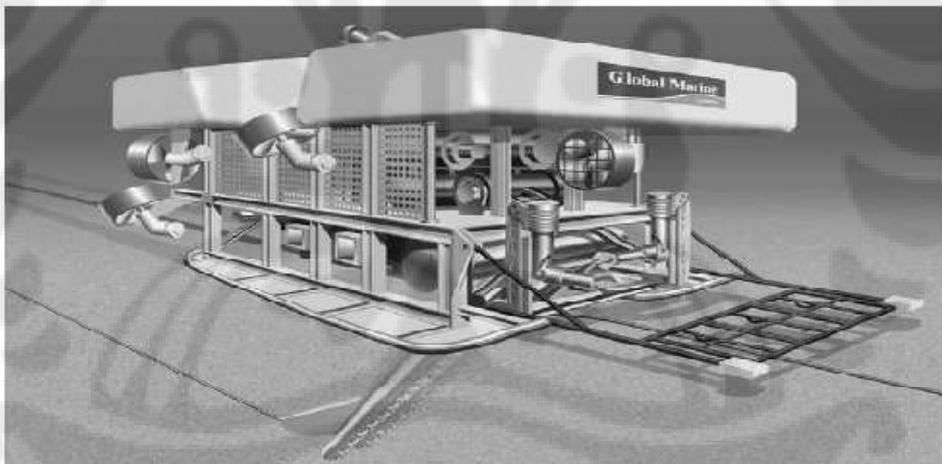


Gambar 2.3.2. *Plough*^[4]

2.3.1.3. *Remote Operate Vehicle (ROV)*

ROV adalah modul yang berisi dengan alat-alat untuk mengendalikan dan mengawasi instalasi kabel optik. Dengan ROV ini kita bisa mengetahui apakah kabel sudah tertanam dengan baik atau belum. ROV dapat dioperasikan hingga kedalaman 2000 m dan dapat mendeteksi lapisan dibawah laut untuk kedalaman 3 m dengan cara membuat parit-parit dalam laut. Secara dimensi ROV memiliki berat 4–23 ton. Antara ROV dengan kapal dihubungkan dengan kabel sebagai antarmuka agar informasi yang diperoleh ROV dapat dideteksi oleh operator dalam *cable ship*.

ROV memiliki kemampuan manuver yang tinggi karena dilengkapi dengan enam pendorong seperti torpedo. ROV ini memungkinkan gerakan horisontal, vertikal, dan lateral serta mampu bergerak dengan kecepatan 1.5 knot. ROV jenis ini memerlukan daya 900 kW dalam pengoperasiannya. Berikut ini adalah gambar dari ROV modern:



Gambar 2.3.3. ROV Modern^[4]

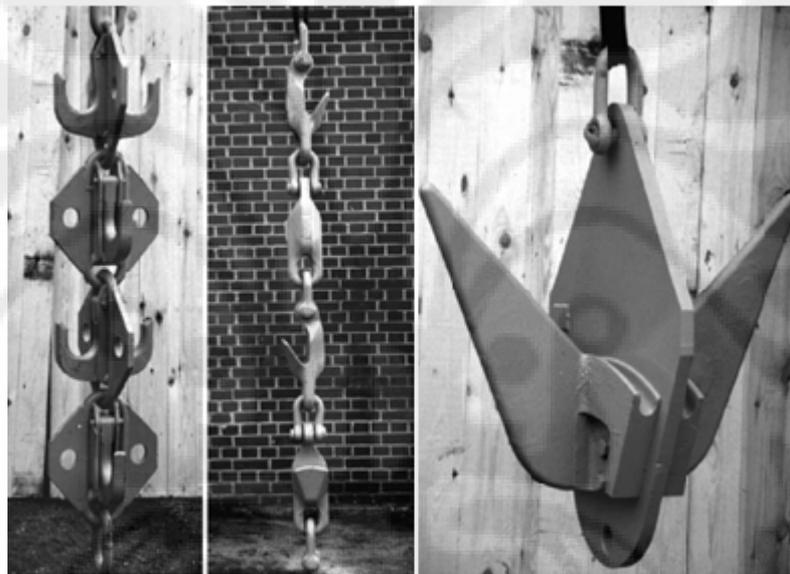
2.3.1.4. *Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*

AUV adalah alat teknologi baru dalam instalasi kabel laut. AUV sebenarnya memiliki fungsi yang hampir sama hanya saja AUV lebih cocok untuk digunakan pada instalasi dengan kedalaman 2000 m karena lebih ekonomis. AUV bekerja dengan memancarkan cahaya dengan dengan panjang gelombang tertentu dan

pantulan dari panjang gelombang cahaya tersebut diterima kembali oleh sensor yang dihubungkan ke sistem deteksi sehingga AUV mampu mengawasi beberapa parameter seperti kedalaman kabel laut tertanam, topografi permukaan laut dan lebih dari itu informasi yang diperoleh AUV dapat ditampilkan pada bentuk gambar dan kita dapat menyimpannya dalam suatu *disc*.

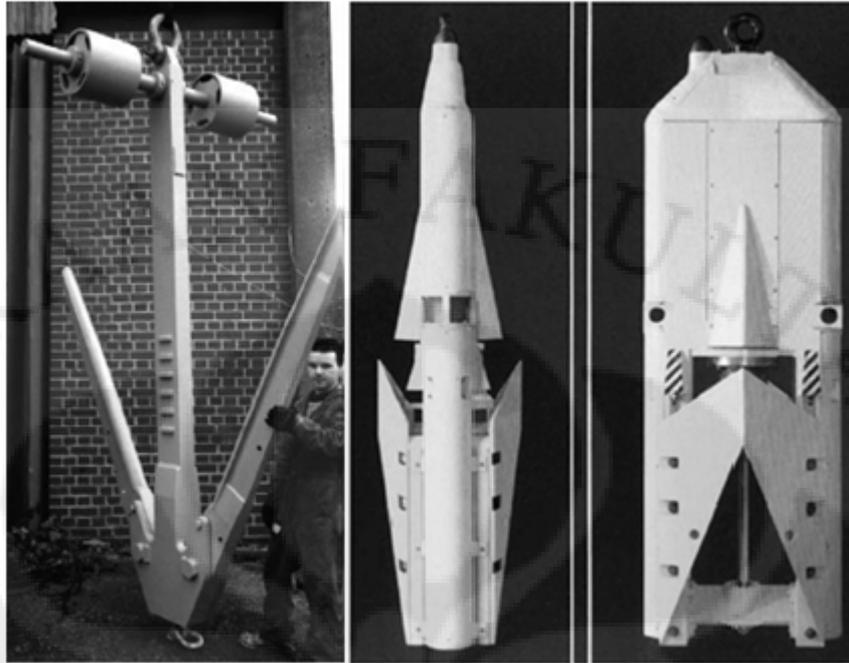
2.3.1.5. Jangkar Kabel

Jangkar kabel adalah alat yang penting dalam instalasi maupun perbaikan kabel laut. Terdapat berbagai macam jenis jangkar sesuai dengan fungsinya antara lain sebagaimana gambar berikut:



Gambar 2.3.4. Bajak *Rennie*, *Gifford*, *Flatfish* (kiri-kanan)^[4]

Kombinasi jangkar *Rennie* dan *Gifford* digunakan untuk instalasi kabel permukaan, jangkar *Flatfish* dengan pemotong digunakan untuk instalasi kabel laut dengan bahan *armored*/campuran. *Flatfish* dilengkapi dengan sensor yang dapat mendeteksi keadaan kabel yang rusak atau tidak akibat aktivitas pemotongan kabel pada kondisi laut yang buruk. Sedangkan untuk jangkar jenis *deepwater cut-and-hold* biasa digunakan dalam instalasi kabel jenis *lightweight*. Berikut adalah gambar jangkar *deepwater cut-and-hold* dan *detrenching*:



Gambar 2.3.5. Bajak *Detrenching*, *Deepwater Cut-and-Hold* (kiri-kanan)^[4]

2.3.1.6. *Software Tool*

Bagian akhir dari peralatan instalasi kabel laut adalah *software tool*. *Software* berfungsi untuk mengawasi keseluruhan proses instalasi dengan memberikan simulasi secara waktu nyata. Oleh karena itu *software tool* harus dapat menunjukkan posisi dari kabel, *repeaters*, *amplifiers*, *branching units*, dan daerah persambungan antara dua kabel karena hal tersebut adalah informasi yang penting untuk pemeliharaan sistem. *Software tool* diletakkan dalam ruangan pengendali atau kontrol yang terdapat pada kapal.

2.3.2. PROSES INSTALASI KABEL BAWAH LAUT

Terdapat beberapa langkah dalam melakukan instalasi kabel laut. Proses instalasi dimulai dari wilayah pesisir pantai dan diakhiri dengan penyambungan antara dua cabang kabel di tengah laut. Berikut ini adalah tahapan tahapan yang harus dilakukan dalam melakukan instalasi kabel laut:

2.3.2.1. *Shore and Landing*

Shore and landing adalah tahapan awal yang dilakukan dalam instalasi kabel laut. Kegiatan yang dilakukan adalah menggali wilayah pesisir pantai sebagai tempat untuk menanam kabel dengan kedalaman tertentu (sekitar 2–3 m).

2.3.2.2. *Plough Lay*

Plough lay adalah tahapan dimana kabel optik yang sudah ditanam di wilayah pesisir pantai kemudian ditarik sampai kedalam laut daerah permukaan dengan kedalaman sekitar 20 m untuk kemudian di bajak.

Proses bajak dilakukan dengan menggunakan *plough*. Ketika kabel yang ditanam di daerah pantai sudah ditarik hingga ke dalam laut zona dangkal, bajak diturunkan dari kapal. Kemudian bajak ini menanam kabel laut dengan kedalaman sekitar 2-3 m. Jauhnya daerah tanam dari kabel laut biasanya dalam orde puluhan kilometer.

Setelah itu bajak ditarik kembali ke kapal bersamaan dengan ujung dari kabel laut yang ditanam. Ujung kabel laut dari bajak yang telah ditarik ke permukaan laut dengan menggunakan jangkar. Setelah itu, kabel laut tersebut diapungkan dengan pelampung untuk proses penyambungan.

2.3.2.3. *Penyambungan*

Setelah *Plough Lay*, proses instalasi selanjutnya adalah penyambungan kabel laut dengan menggunakan *branching unit*. Proses penyambungan kabel laut dilakukan diatas permukaan laut yaitu diatas kapal dengan menggunakan *branching unit*.

Caranya adalah ujung akhir dari kabel laut yang telah dibajak dan diapungkan diatas permukaan laut akan ditarik keatas permukaan kapal dengan menggunakan jangkar. Bersamaan dengan itu kita juga menarik cabang lain dari kabel laut pada sisi lain keatas permukaan kapal. Setelah kedua cabang berada diatas permukaan kapal, penyambungan dapat dilakukan dengan teknik *splicing* kedalam alat *branching unit*. Setelah penyambungan selesai, *branching unit* dan kabel yang telah tersambung kita tempatkan kembali kedalam laut.

2.4. PROTOKOL MULTIPLEKS

Protokol multipleks adalah suatu struktur yang dimultipleks secara padat dalam proses pengiriman data. Protokol multipleks biasanya memiliki modul-modul dengan tingkatan-tingkatannya, maka dari itu dipakai kata hirarki. Ada 2 protokol multipleks yang dikenal, yakni *Plesiochronous Digital Hierarchy* (PDH), dan *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH). Dewasa ini PDH sudah sepenuhnya digantikan oleh SDH.

Synchronous Digital Hierarchy (SDH) merupakan hirarki pemultiplekan yang berbasis pada transmisi sinkron yang telah ditetapkan oleh CCITT (ITU-T). Dalam dunia telekomunikasi, rentetan pemultiplekan sinyal-sinyal dalam transmisi menimbulkan masalah dalam hal pencabangan dan penyisipan (*drop and insert*) yang tidak mudah serta keterbatasan untuk memonitor dan mengendalikan jaringan transmisinya.

Adapun *Synchronous Digital Networking* (SONET) merupakan ekuivalensi dari SDH. SONET lebih dahulu dikembangkan sebelum SDH, dan saat ini digunakan oleh Amerika Serikat dan Kanada. SDH dan SONET sebetulnya adalah teknologi yang identik, dan sekalipun lebih muda, SDH lebih banyak dikenal diseluruh dunia sekarang sehingga SONET hanya dianggap sebagai suatu varian. Kita juga nanti dapat melihat bahwa SONET dan SDH, walaupun berbeda standar, memiliki kompatibilitas dan tingkatan hirarki yang saling ekuivalen satu sama lain. Karena pada tugas akhir ini dibahas SKKL diluar kawasan Amerika Utara, sudah jelas protokol multipleks yang digunakan adalah SDH.

Sebelum kemunculan SDH, standar transmisi yang ada dikenal dengan PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) yang sudah lama ditetapkan oleh CCITT. Suatu jaringan *plesiochronous* tidak menyinkronkan jaringan tetapi hanya menggunakan pulsa-pulsa detak (*clock*) yang sangat akurat di seluruh simpul penyakelarnya (*switching node*) sehingga laju slip di antara berbagai simpul tersebut cukup kecil dan masih bisa diterima (misalnya plus/minus 50 bit atau 5×10^{-5} untuk jaringan/kanal 2,048 atau 1,544 Mbps). Mode operasi seperti ini

barangkali memang merupakan suatu implementasi yang paling sederhana karena bersifat menghindari pendistribusian pewaktuan di seluruh jaringan.

Ternyata bahwa PDH tidak begitu cocok untuk mendukung perkembangan teknik pengendalian dan pemrosesan sinyal untuk masa kini yang makin banyak dibutuhkan oleh perusahaan-perusahaan penyedia layanan telekomunikasi. Dalam PDH, sebuah peralatan transmisi tertentu umumnya hanya menangani dengan baik satu fungsi tertentu saja dalam jaringan, sementara dalam SDH, ada integrasi dari berbagai tipe peralatan yang berbeda-beda yang mampu memberikan kebebasan baru dalam perancangan jaringan. Sudah bukan merupakan berita baru bahwa SDH dapat dipergunakan untuk transmisi optik kapasitas besar, pengaturan lalu lintas komunikasi dan restorasi jaringan.

SDH memiliki dua keuntungan pokok: fleksibilitas yang demikian tinggi dalam hal konfigurasi-konfigurasi kanal pada simpul-simpul jaringan dan meningkatkan kemampuan-kemampuan manajemen jaringan baik untuk *payload traffic*-nya maupun elemen-elemen jaringan. Secara bersama-sama, kondisi ini akan memungkinkan jaringannya untuk dikembangkan dari struktur transport yang bersifat pasif pada PDH ke dalam jaringan lain yang secara aktif mentransportasikan dan mengatur informasi.

Tawaran-tawaran spesifik yang diciptakan oleh SDH diantaranya termasuk:

- *Self-healing*; yakni pengarahannya ulang (*rerouting*) lalu lintas komunikasi secara otomatis tanpa interupsi layanan.
- *Service on demand*; provisi yang cepat *end-to-end customer services on demand*.
- Akses yang fleksibel; manajemen yang fleksibel dari berbagai *bandwidth* tetap ke tempat-tempat pelanggan.

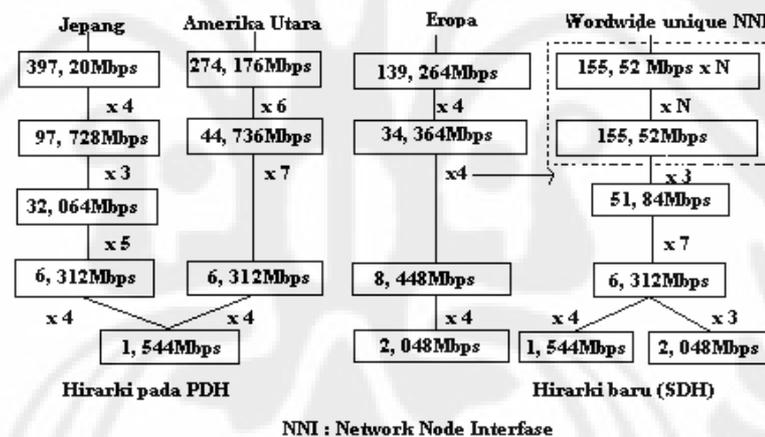
Standar SDH juga membantu kreasi struktur jaringan yang terbuka, sangat dibutuhkan dalam lingkup yang kompetitif sekarang ini bagi perusahaan-perusahaan penyedia layanan telekomunikasi. restorasi jaringan. Adapun sebelum munculnya SDH, hirarki pemultiplekan sinyal digital untuk Amerika Utara

(Kanada dan Amerika Serikat), Jepang dan Eropa berbeda-beda seperti dinyatakan pada tabel berikut:

Tabel 2.4.1. Hirarki PDH di Beberapa Wilayah^[7]

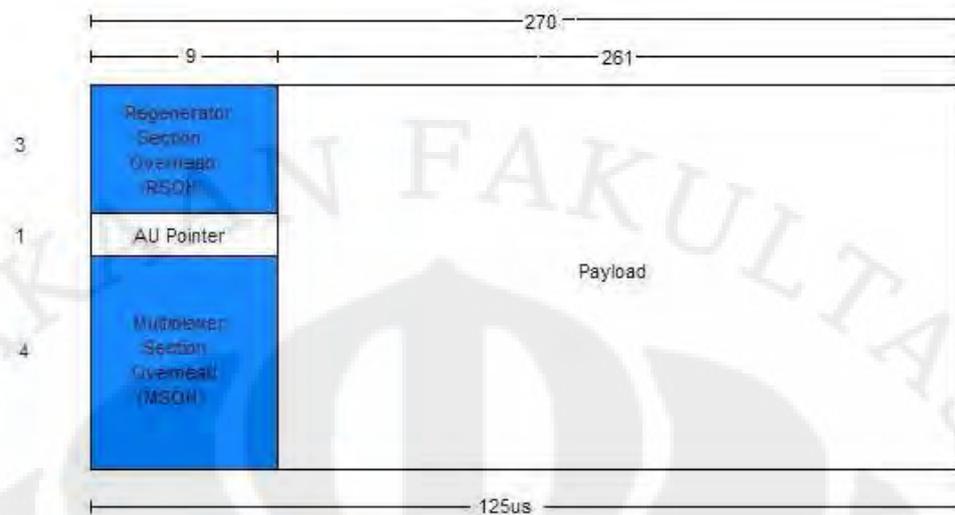
Level Hirarki	Amerika Utara (Mbps)	Jepang (Mbps)	Eropa (Mbps)
1	1.544	1.544	2.048
2	6.312	6.312	2.442
3	44.736	32.064	34.368
4	274.176	97.728	139.264
5	-	397.200	560.840

Dengan adanya SDH, hirarkinya diseragamkan menjadi seperti pada gambar berikut ini:



Gambar 2.4.1. Perbandingan Hirarki PDH dan SDH^[7]

Dari gambar diatas, terlihat bahwa pada level atau tingkat yang paling tinggi, jaringan transport SDH adalah jaringan n x STM-1 (n x 155 Mbps). STM-1 (*Synchronous Transport Module*) adalah modul transpor sinkron level-1. Sebuah frame tunggal STM-1 dinyatakan dengan sebuah matriks yang terdiri dari sembilan baris dan 270 kolom.



Gambar 2.4.2. Penampang STM-1^[8]

Frame diatas dibentuk dari 2430 *byte*, setiap *byte* terdiri dari 8 bit. Frame STM-1 berisi dua bagian, bagian SOH (*Section Overhead*) dan bagian VC (*Virtual Container*) yang merupakan *payload*-nya.

Dalam bagian *payload* yang berukuran 9x261, terdapat unit administratif yang diidentifikasi oleh *pointer*. Dalam unit administratif ada satu atau lebih VC (*Virtual Container*). Kolom pertama dari VC berupa *Path Overhead* (POH) yang sendirinya dapat membawa kontainer lain. Unit administratif dapat memiliki pengaturan fasa dalam *frame* STM, yang diindikasikan oleh *pointer* di baris ke 4.

Bagian SOH dari STM-1 pun terbagi menjadi 2 bagian: *Regenerator Section Overhead* (RSOH) dan *Multiplex Section Overhead* (MSOH). RSOH terletak pada 3 baris pertama bagian SOH (baris 1-3), dan MSOH terletak pada 5 baris terakhir bagian SOH (baris 5-9). Keduanya dipisahkan oleh 1 baris berisi *pointer* pada baris ke 4. Keduanya mengandung informasi dari sistem itu sendiri, yang digunakan untuk membawa banyak fungsi manajerial seperti pengawasan kualitas transmisi, deteksi gangguan, pengaturan alarm, kanal komunikasi daya, kanal servis, dan lain lain.

Frame STM bersifat kontinu dan ditransmisikan secara serial, *byte-per-byte* dan baris-per-baris tepat setiap 125 μ s. Adapun *frame* STM-1 mengandung:

- 1 *byte* = 8 bit
- Isi total: $9 \times 270 \text{ byte} = 2.430 \text{ byte}$
 - *Overhead* : 8 baris x 9 *byte*
 - *Pointer* : 1 baris x 9 *byte*
 - *Payload* : 9 baris x 261 *byte*
- Periode : 125 μs
- Laju bit : 155,520 Mbps ($2.400 \text{ byte} \times 8 \text{ bit/byte} \times 8000 \text{ fps}$)
- Kapasitas *payload* : 150,336 Mbps ($(2.400-81) \times 8 \times 8000$)

Transmisi dari *frame* dilakukan per baris, dari kiri ke kanan dan dari atas ke bawah.

STM-1 menjadi modul dasar dari SDH. Namun dalam aplikasinya pada sistem komunikasi kabel laut, tentu saja perlu modul yang kapasitasnya jauh lebih besar dari STM-1. Seperti PDH, modul yang kapasitasnya lebih besar dibuat dengan menggabungkan 4 modul di tingkat dibawahnya. Dengan demikian, penggabungan 4xSTM-1 akan menghasilkan STM-4 dengan kapasitas total 622,080 Mbps atau 4x155,520 Mbps. Berikut adalah tabel tingkatan modul SDH, berikut ekivalensinya dengan SONET:

Tabel 2.4.2. Hirarki Modul SDH dan SONET^[8]

Tingkat Pembawa Optik SONET	Bentuk Frame SONET	Tingkat dan Bentuk Frame SDH	<i>Payload Bandwidth</i> (kbit/s)	Laju bit (kbit/s)
OC-1	STS-1	STM-0	50,112	51,840
OC-3	STS-3	STM-1	150,336	155,520
OC-12	STS-12	STM-4	601,344	622,080
OC-24	STS-24	–	1,202,688	1,244,160

OC-48	STS-48	STM-16	2,405,376	2,488,320
OC-192	STS-192	STM-64	9,621,504	9,953,280
OC-768	STS-768	STM-256	38,486,016	39,813,120
OC-3072	STS-3072	STM-1024	153,944,064	159,252,240

Pengecualian dari penggabungan 4 modul adalah OC-24 yang distandarisasi ANSI T1.105, namun bukan merupakan standar SDH pada ITU-T G.707. Ada pula tingkat lain seperti OC-9, OC-18, OC-36, OC-96, OC-1536, yang sesekali didefinisikan namun masih kurang jelas apakah ada implementasinya. Yang jelas, tingkat-tingkat tersebut tidak lazim dan tidak sesuatu dengan standar.

Adapun tingkat yang kapasitasnya terbesar, yakni 160 Gbps pada OC-3072 dan STM-1024, belum distandarisasi karena *transceiver*-nya masih mahal dan teknologi saat ini memungkinkan pemultipleksan panjang gelombang berkapasitas 10 dan 40 Gbps (STM-64 dan STM-256) secara lebih murah dan nyaman.

2.5. TEKNOLOGI MULTIPLEKS

Pada sistem komunikasi serat optik modern, teknologi/teknik multipleks yang dipakai adalah *Wavelength Division Multiplexing*. Teknologi ini menggabungkan (multipleks) beberapa sinyal pembawa optik pada serat optik tunggal dengan memanfaatkan panjang gelombang (*wavelength*) cahaya laser yang berbeda-beda, untuk membawa sinyal yang berbeda-beda pula. Ini memungkinkan pelipatgandaan kapasitas, dan juga memungkinkan komunikasi 2 arah pada suatu serat optik tunggal.

Adapun istilah WDM pada umumnya disebut pada gelombang pembawa sinyal optik (yang biasanya dinyatakan dalam panjang gelombangnya). Adapun FDM

(*Frequency Division Multiplexing*) biasanya disebut pada gelombang pembawa radio (yang biasanya dinyatakan dalam frekuensi). Namun karena panjang gelombang dan frekuensi berbanding terbalik secara langsung, dan baik radio maupun cahaya adalah bentuk radiasi elektromagnetik, kedua konsep ini ekuivalen satu sama lainnya.

Konsep ini pertama kali dipublikasikan pada tahun 1970, dan pada tahun 1978 sistem WDM telah terealisasi di laboratorium. Sistem WDM pertama hanya menggabungkan 2 sinyal. Pada perkembangan WDM, beberapa sistem telah sukses mengakomodasikan sejumlah panjang-gelombang dalam sehelai serat optik yang masing-masing berkapasitas 2,5 Gbps sampai 5 Gbps. Namun penggunaan WDM menimbulkan permasalahan baru, yaitu kenonlinieran serat optik dan efek dispersi yang semakin kehadirannya semakin signifikan yang menyebabkan terbatasnya jumlah panjang-gelombang, yakni hanya 2-8 buah saja di kala itu.

Pada perkembangan selanjutnya, jumlah panjang-gelombang yang dapat diakomodasikan oleh sehelai serat optik bertambah mencapai puluhan buah dan kapasitas untuk masing-masing panjang gelombang pun meningkat pada kisaran 10 Gbps, kemampuan ini merujuk pada apa yang disebut DWDM.

WDM populer karena memungkinkan untuk mengembangkan kapasitas jaringan tanpa menambah jumlah serat optik. Dengan menggunakan WDM dan penguat, beberapa generasi perkembangan teknologi dapat diakomodasi pada infrastruktur optiknya tanpa menyebabkan *overhaul* pada *backbone network*-nya. Kapasitas dari hubungan dapat dikembangkan hanya dengan meningkatkan *multiplexers* dan *demultiplexers* yang digunakan.

WDM secara aplikasi sebetulnya sudah bukan nama yang umum lagi, karena perkembangan teknologi sudah mengembangkan teknik WDM menjadi 2 macam, *dense* and *coarse* WDM. Sistem dengan lebih dari 8 panjang gelombang aktif perserat dikenal sebagai **Dense WDM (DWDM)**, sedangkan untuk panjang gelombang aktif kurang dari 8 diklasifikasikan sebagai **Coarse WDM (CWDM)**. Jadi, WDM yang disebut-sebut lebih sebagai suatu konsep awal/teoritis

merangkap bentuk implementasi awalnya, sementara sekarang konsep itu terapannya sudah bergeser ke pemilihan antara DWDM dan CWDM.

Teknologi CWDM dan DWDM secara konsep sama, tetapi berbeda pada beberapa aspek. Berikut adalah perbandingan kedua teknologi tersebut dalam tabel:

Tabel 2.5.1. CWDM vs DWDM

No.	Parameter	CWDM	DWDM
1.	Spasi Kanal	20 nm	0.2 – 1.2 nm
2.	Pita Frekuensi	1290 – 1610 nm	1470 – 1610 nm
3.	Tipe Serat Optimal	ITU-T G.652, G.653, G.655	ITU-T G.655
4.	Aplikasi	<i>point-to-pont, chain, ring, mesh</i>	
5.	Area Implementasi	metro	jarak jauh
6.	Ukuran Perangkat	lebih kecil	lebih besar
7.	Regenerator	tidak butuh	butuh
8.	Konsumsi Daya	lebih kecil (15%)	lebih besar
9.	Divais Laser	lebih murah	lebih mahal
10.	Penyaring	lebih rendah (50%)	lebih tinggi

Dari tabel perbandingan diatas, kita dapat menyimpulkan bahwa CWDM dapat disebut sebagai miniaturisasi dari DWDM, yang ditujukan untuk sistem komunikasi serat optik yang jangkauannya lebih pendek (metro). CWDM menawarkan pemultipleksan yang lebih murah implementasi dan pengoperasiannya daripada DWDM, namun tentunya dengan performa yang tak sebaik DWDM. Sekalipun demikian, CWDM hadir dengan beberapa modifikasi untuk mengakali kekurangannya dari DWDM dalam segi performa, seperti melebarkan pita frekuensi yang digunakan agar lebih banyak panjang gelombang yang dapat dimultipleks (dan dengan demikian dapat disandingkan dengan DWDM). Dengan segala keuntungan dan kerugiannya, sampai sekarang CWDM selalu menjadi teknologi pembanding bagi DWDM yang seimbang dan ramai diperbincangkan.

2.6. GANGGUAN PADA SISTEM KABEL LAUT

Pembentangan suatu SKKL yang dapat mencapai puluhan ribu kilometer tentu saja rentan terhadap gangguan yang dapat terjadi kapan saja dan pada bagian mana saja sepanjang kabel yang dibentangkan. Kerusakan yang diakibatkan pun bervariasi, dari yang ringan sampai yang serius.

Menurut laporan *Submarine Cable Improvement Group*, dikatakan bahwa 75% dari seluruh gangguan pada SKKL diakibatkan oleh gangguan dari luar (*external aggression*). Selain faktor dominan tersebut, dikelompokkan pula 2 faktor penyebab lain yakni komponen sistem dan faktor yang tak diketahui. Gangguan akibat dari luar meliputi aktivitas manusia seperti perikanan dan jangkar kapal, serta gangguan dari alam seperti gempa bumi dasar laut, arus laut yang deras, abrasi, dan lain-lain.

Saat suatu kabel mengalami gangguan, tentunya perbaikan perlu segera dilakukan. Tidak ada cara yang elegan dalam memperbaiki kerusakan kabel serat optik bawah laut. Satu-satunya cara adalah kabel tersebut harus ditarik/diapungkan ke permukaan, dan bagian yang rusak diganti dengan kabel baru.

Tentu saja mula-mula hal yang perlu dilakukan adalah mengetahui titik kerusakan dari kabel. Teknisi kabel dapat menentukan perkiraan lokasi dari laporan pusat kontrol layanan internet atau telepon. Kemudian dari terminal di pantai, koordinat persis kerusakan dapat diketahui dengan mengirimkan pulsa cahaya sepanjang serat optik. Serat optik yang masih berfungsi akan mentransmisikan pulsa ini sampai ke tujuan, namun serat optik yang rusak akan memantulkan pulsa ini pada titik kerusakan. Dengan mengukur waktu yang dibutuhkan pulsa ini untuk berangkat dan kembali, teknisi dapat mengetahui dimana persisnya kabel mengalami kerusakan.

Setelah lokasi persis diketahui, perusahaan yang bertanggungjawab memperbaiki kabel akan mengirimkan kapal kabel berukuran besar yang membawa cukup kabel serat optik baru untuk proses perbaikan. Bila kerusakan terjadi pada kedalaman kurang dari 6500 kaki, kru kapal akan mengirimkan robot yang mampu bergerak pada dasar laut. Sinyal dapat dikirimkan melalui kabel untuk membimbing robot

ke titik kerusakan. Saat robot menemukannya, robot tersebut akan mencengkram kabel tersebut, kemudian memotong bagian yang rusak, lalu menarik kedua ujung kabel ke permukaan.

Robot ini tidak dapat dipakai untuk kedalaman lebih dari 6.500 kaki karena tekanan yang terlalu tinggi. Dalam situasi seperti ini, teknisi akan menggunakan kabel pengait yang panjang untuk mengkaitkan kabel dari dasar laut. Kabel berkait ini menggunakan alat pencengkram dan pemotong mekanik yang dapat memutuskan kabel yang rusak serta menarik ujung kedua kabel ke permukaan. Salah satu ujung diikatkan ke pengapung (*buoy*) agar tidak tenggelam, dan satunya lagi diperbaiki dalam kapal.

Bagian kabel yang rusak dapat diperbaiki diatas kabal. Teknisi ahli akan menyambungkan serat kaca dan menggunakan perekat kuat untuk memasang kabel baru untuk menyambungkan kedua ujung kabel. Proses ini dapat berlangsung selama 16 jam. Setelah itu, kabel yang telah diperbaiki akan ditenggelamkan kembali ke dasar laut.

BAB 3

ANALISIS ASPEK PENTING DALAM SEA-ME-WE 3 DAN 4

Bab ini berisi pengintegrasian dan aplikasi hal-hal penting dalam sistem komunikasi kabel laut yang sekiranya dapat dijadikan bahan untuk menganalisis kenyataan yang terdapat pada SEA-ME-WE 4. Aspek-aspek penting tersebut meliputi peningkatan kapasitas, efektifitas penguat, dan ketahanan terhadap gangguan.

3.1. PENINGKATAN KAPASITAS

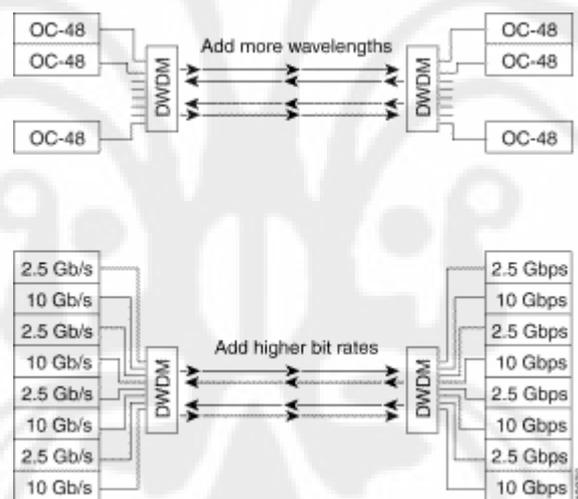
Berbicara mengenai peningkatan kapasitas, suatu cara termudah yang dapat dipikirkan orang awam sekalipun adalah dengan menambah jaringan kabel serat optik bawah laut baru. Hal tersebut sebenarnya ada relevansinya dengan skripsi ini, namun pada bagian lain yang akan diungkapkan nanti. Subbab mengenai peningkatan kapasitas terbatas pada analisis mengenai peranan teknologi dan protokol multipleks yang memungkinkan peningkatan kapasitas tanpa membentangkan jaringan baru, seperti yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya.

Berangkat dari peranan teknologi maupun protokol multipleks dalam meningkatkan kapasitas, tersedia 2 cara untuk meningkatkan kapasitas. Pertama dengan menaikkan kapasitas modul SDH (STM-N) dan menambah jumlah panjang gelombang yang digabungkan oleh peralatan WDM.

Modul SDH memiliki beberapa tingkat menurut tabel 2.3.2. STM-1 (155 Mbps) merupakan modul dasar SDH yang biasa digunakan sebagai model untuk proses pembelajaran. Modul yang digunakan dalam SKKL modern memiliki kapasitas paling tidak 2.5 Gbps, artinya paling rendah STM-16. Ada beberapa SKKL yang menggunakan modul berkapasitas 1.25 Gbps namun modul tersebut tidak

memiliki standar ekivalen SDH, hanya terdapat standar SONET (OC-24). Adapun modul yang paling populer dibicarakan dan diaplikasikan saat ini adalah STM-64 dan STM-256 (10 dan 40 Gbps) yang sudah distandarisasi oleh ITU-T.

Perangkat WDM memiliki keterbatasannya sendiri-sendiri dalam menggabungkan jumlah panjang gelombang. WDM pada awal penemuannya hanya mampu menggabungkan 2 panjang gelombang, yakni pada daerah 1550 nm dan 1310 nm. Dalam pengembangannya WDM sudah berevolusi menjadi DWDM dan CWDM, dengan CWDM berada diluar konteks skripsi ini karena perbedaan lingkup penerapannya. Teknologi DWDM mampu menggabungkan 16, 32, 64, bahkan 160 panjang gelombang. Ada pula sumber yang mengatakan bahwa dipercaya DWDM dapat berkembang hingga pengembangan 15.000 panjang gelombang dimasa depan.



Gambar 3.1.1. Konfigurasi DWDM dan Modul SONET^[9]

Gambar diatas memperlihatkan konfigurasi DWDM dengan modul SONET. OC-48, dari tabel 2.4.2 ekivalen dengan STM-16 yang berkapasitas 2.5 Gbps. Bila kita sudah mengintegrasikan teknologi dan protokol multipleks dalam perspektif peningkatan kapasitas, dari gambar diatas ada 3 cara yang dapat ditempuh, yakni menambah jumlah panjang gelombang, meningkatkan modul SDH, dan kombinasi keduanya.

Metode pertama adalah menambah jumlah panjang gelombang. Hal tersebut diperoleh dengan cara menambah modul SDH setingkat yang sama sampai

tercapai kapasitas yang diinginkan. Penambahan modul SDH berarti penambahan jumlah panjang gelombang yang digabungkan, berarti dibutuhkan *multiplexer* yang lebih padat.

Sebagai contoh, bila kita ingin meningkatkan kapasitas 160 Gbps menjadi 640 Gbps (4 kalinya):

Peningkatan kapasitas: 160 Gbps → 640 Gbps, dengan STM-64 (10 Gbps)

Modul STM-64 (10 Gbps) yang dibutuhkan = $640 \text{ Gbps} / 10 \text{ Gbps}$
 = 64 buah

Modul STM-64 yang sudah ada = 16 buah

Modul STM-64 yang perlu ditambahkan = 48 buah

Sisa = 0

Selain itu, bila *multiplexer* yang digunakan sebelumnya tak mampu menggabungkan sampai 48 panjang gelombang, tentu *multiplexer* tersebut harus diganti.

Metode kedua adalah peningkatan modul SDH. Subbab 2.4 menyebutkan bahwa ada banyak tingkatan modul SDH dengan faktor pengali 4 untuk tingkat yang makin tinggi. Dengan demikian, peningkatan kapasitas yang dicapai metode ini pasti berupa kelipatan 4 dari kapasitas sebelumnya. Mengambil contoh yang sama untuk metode pertama:

Peningkatan kapasitas: 160 Gbps → 640 Gbps, dengan STM-256 (40 Gbps)

Modul STM-256 yang dibutuhkan = $640 \text{ Gbps} / 40 \text{ Gbps}$
 = 16 buah

Modul STM-256 yang sudah ada = 0

Modul STM-256 yang perlu ditambahkan = 16 buah

Sisa = 16 x STM-64 (10 Gbps)

Metode ketiga adalah kombinasi kedua metode diatas. Pada metode ini, modul SDH yang sudah ada tetap digunakan, sementara penambahan kapasitas dilakukan oleh modul SDH yang lebih tinggi tingkatannya. Mengambil contoh yang sama untuk kedua metode sebelumnya:

Peningkatan kapasitas: 160 Gbps → 640 Gbps, dengan STM-64 dan STM-256

Kapasitas yang perlu ditambah = 640 Gbps – 160 Gbps = 480 Gbps

Modul STM-256 yang dibutuhkan = 480 Gbps / 40 Gbps

= 12 buah

Modul STM-256 yang sudah ada = 0

Modul STM-256 yang perlu ditambahkan = 12 buah

Sisa = 0

Saat perhitungan harga dimasukkan kita membutuhkan data dari komponen-komponen yang disebutkan diatas. Harga *multiplexer* relatif terhadap modul SDH dapat diabaikan. Adapun harga modul SDH terus berubah seiring waktu. Umumnya, perusahaan telekomunikasi mematok harga yang wajar dan tepat untuk mengimplementasikan modul SDH setingkat lebih tinggi adalah saat harganya mencapai 2,5 kali dari harga modul yang dipakai sekarang. Patokan ini akan digunakan untuk perhitungan perbandingan 3 metode diatas.

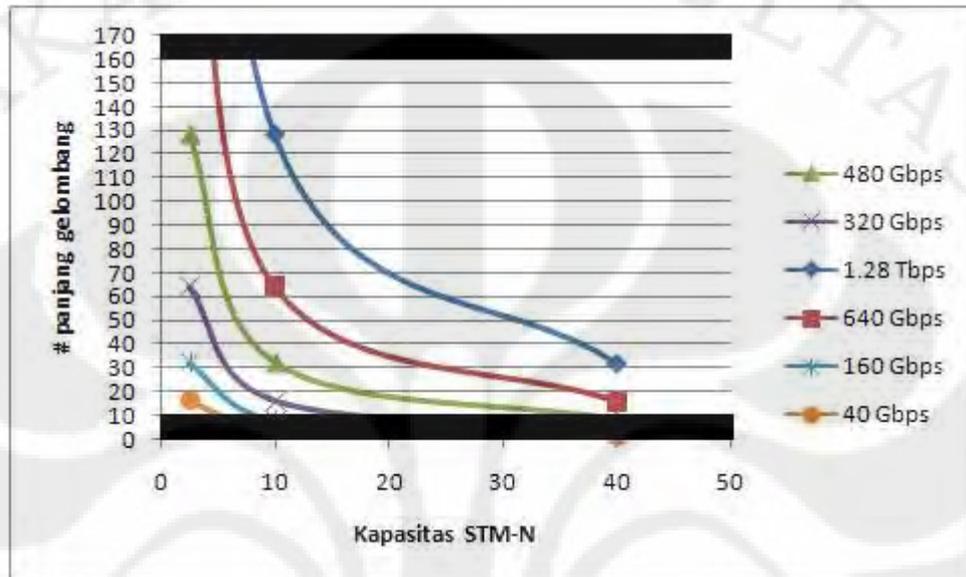
Bila kita asumsikan harga STM-64 senilai x dan STM-256 senilai 2,5x:

- Metode pertama membutuhkan dana sebesar 48x harga STM-64, yakni senilai 48x.
- Metode kedua membutuhkan dana sebesar 16x harga modul STM-256, yang ekuivalen dengan 40x.
- Metode ketiga hanya membutuhkan 12x STM-256 yang berarti 30x.

Terlihat bahwa metode ketiga memberikan hasil yang paling ekonomis. Perhitungan ini juga menjelaskan mengapa rasio 2,5 ditentukan sebagai patokan.

Andai rasionya lebih dari 3, biaya metode kedua akan lebih mahal dari yang pertama.

Berikut adalah grafik plot modul SDH versus jumlah panjang gelombang yang dibutuhkan untuk beberapa nilai kapasitas total:



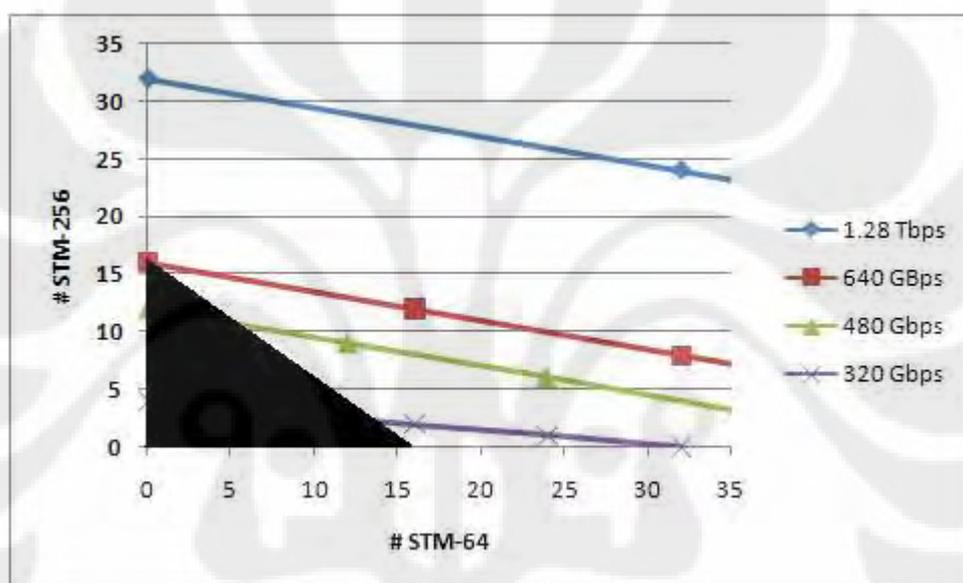
Grafik 3.1.1. Kapasitas Modul SDH vs. # Panjang Gelombang

Grafik diatas mengambil modul SDH sebagai patokan, dengan modul yang dipakai berkisar antara 2.5-40 Gbps. Bagian yang dihitamkan di bawah menandakan teknologi WDM yang sudah ketinggalan jaman, dan bagian yang dihitamkan di atas menandakan teknologi WDM (DWDM) yang belum tercapai. Karena untuk suatu kapasitas total perkalian keduanya menghasilkan nilai yang sama, jelas didapatkan bahwa keduanya berbanding terbalik. Perlu diingat bahwa sumbu x maupun y harus berupa bilangan bulat, sehingga sebetulnya grafik 3.1.1 tidak dapat diplot layaknya kurva. Namun hal tersebut dilakukan untuk mempermudah pelacakan titik-titik yang berasal dari kapasitas total yang sama.

Grafik diatas diplot berdasar metode 1 dan 2, yakni dengan menggunakan masing-masing STM-16, STM-64, atau STM-256 saja. Grafik tersebut dapat digunakan untuk mengetahui opsi apa saja yang dimiliki bila terdapat garis yang mewakili kapasitas total yang diinginkan. Kita cukup menutup bagian yang tidak mungkin digunakan, seperti misalnya untuk modul diatas STM-16 dan rentang jumlah

panjang gelombang antara 16 sampai 160 untuk kapasitas total 1.28 Tbps, kita dapatkan opsi STM-256 dengan 32 panjang gelombang termultipleks atau STM-64 dengan 128 panjang gelombang termultipleks.

Bila digunakan metode ketiga, plot grafik rasio jumlah modul SDH yang diperlukan untuk beberapa kapasitas total dapat dibuat. Karena plot dengan 3 variabel modul SDH kompleks dan menghasilkan grafik 3 dimensi, dipilih 2 modul SDH saja, yakni STM-64 dan STM-256 untuk beberapa kapasitas total yang sama dengan grafik 3.1.1:



Grafik 3.1.2. # STM-64 vs. # STM-256

Sama seperti grafik 3.1.1, baik sumbu x maupun y grafik 3.1.2 berupa bilangan bulat. Bagian yang dihitamkan adalah daerah $x + y < 16$ yang mengindikasikan jumlah STM-64 dan STM-256 tidak mencapai 16. Artinya, kurang dari 16 panjang gelombang digabungkan, yang sudah tidak merepresentasikan teknologi DWDM sekarang ini. Grafik diatas juga menunjukkan bahwa kapasitas yang ingin ditambah tidak selalu harus dicapai dengan penggunaan modul SDH bertingkat lebih tinggi, namun dapat juga dengan menambah modul kedua tingkat secara bersamaan dengan proporsi jumlahnya masing-masing.

Dari analisis dan perhitungan pada subbab ini didapatkan kesimpulan bahwa penentuan proporsi jumlah modul SDH memainkan peranan utama dalam

penentuan kapasitas total. Jumlah modul SDH yang telah ditentukan, baik homogen atau heterogen, masih harus direferensikan ke teknologi DWDM yang ada saat itu, apakah memungkinkan atau tidak.

3.2. EFEKTIFITAS PENGUAT

Pada subbab 2.2.1. telah dibahas jenis-jenis penguat yang digunakan pada sistem komunikasi kabel laut. Selain itu telah diturunkan rumus untuk penguat hibrid. Subbab ini akan menggunakan landasan teori pada 2.2.1. untuk menganalisis terapannya pada SEA-ME-WE 3 dan 4 dalam kaitannya dalam jarak antar penguat.

Bila kita berbicara tentang penguat, parameter yang paling utama dipertimbangkan adalah seberapa jauh penguat itu mampu ditempatkan satu terhadap lainnya. Semakin panjang bentangan kabel antar penguat, semakin sedikit jumlah penguat yang dibutuhkan yang berarti penurunan biaya proyek sistem komunikasi kabel laut.

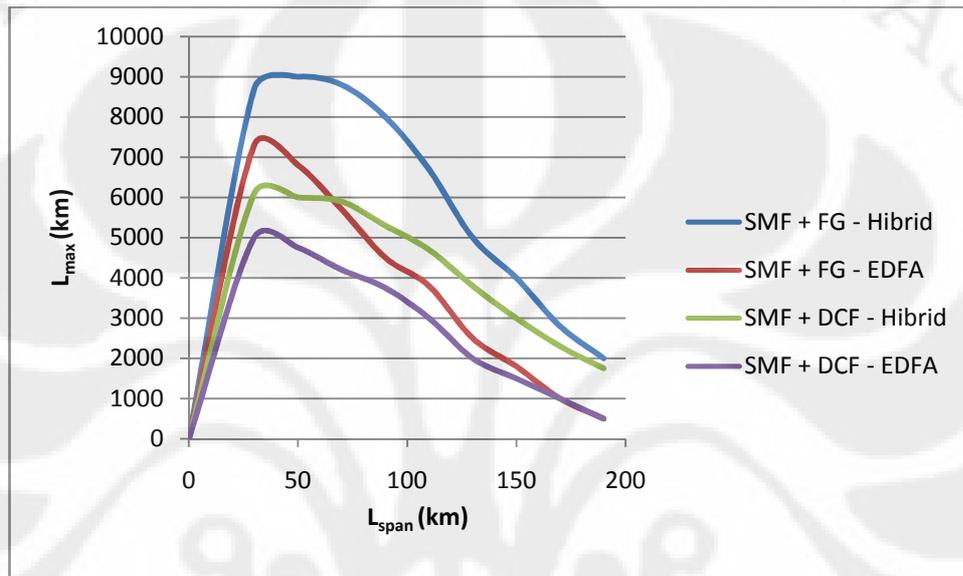
Setelah menurunkan beberapa persamaan pada subbab 2.2.1.3, kita dapat menggunakan persamaan tersebut dengan menggunakan *single-mode fiber* (SMF) maupun *non-zero dispersion-shifted fiber* (NZDSF). Kita dapat melihat data karakteristik kedua serat pada tabel dibawah ini:

Tabel 3.2.1. Parameter Serat yang Diujicobakan^[3]

Serat	Rugi (dB/km)		D [ps/nm/km]	A_{eff} [μm^2]	γ [l/W/km]	Raman eff [dB/W]
	Sinyal	Pompa				
SMF	0.2	0.3	16	80	1.27	26
NZDSF	0.2	0.3	5	55	1.85	38
DCF	0.5	-	-100	25	4.1	-

Nilai diatas adalah nilai pada umumnya dan belum tentu sama persis dengan serat optik komersial yang spesifik. Kita kembali berasumsi bahwa dispersi yang ada

tiap bentangan sepenuhnya terkompensasi ($k_{comp} = 1$). Kita mengasumsikan kompensasi dilakukan dengan memasukkan panjang DCF yang sesuai seperti pada gambar 2.2.5, atau menggunakan *fiber grating* (FG) menggantikan DCF. FG menimbulkan rugi tambahan, namun tidak menambah nonlinearitas. Kita berasumsi bahwa GFF membawa rugi 4 dB (T_F) dengan merujuk pada kanal yang paling teratenuasi. Derau EDFA ditetapkan sebesar 4.5 dB.



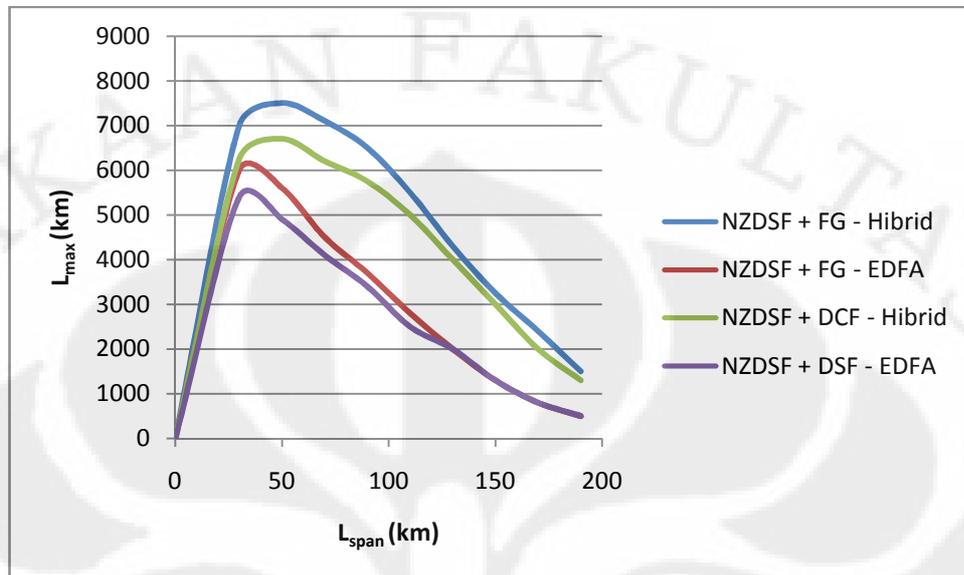
Grafik 3.2.1. L_{span} vs. L_{max} untuk SMF^[3]

Grafik diatas diplot dengan OSNR penerima sebesar 20 dB, bobot nonlinear (k_{NL}) = 1. Selain plot penguat hibrid, konfigurasi penguat EDFA murni pada kondisi sama persis juga diplot pada grafik yang sama. Grafik ini menggunakan SMF dengan variasi DCF dan FG. Grafik tersebut menunjukkan keunggulan FG daripada DCF, kecuali untuk penguat EDFA pada $L_{max} < 6.000$ km ($L_{span} > 70$ km), dimana FG yang mula-mula unggul menjadi tertinggal.

Grafik 3.2.2 ini serupa dengan 3.2.1, bedanya pada grafik ini digunakan NZDSF. Berbeda dengan grafik 3.2.1, pada grafik ini FG selalu lebih unggul dari DCF.

Grafik 3.2.1 dan 3.2.2 dapat digunakan untuk melihat perbandingan langsung penguat hibrid dan penguat EDFA murni. Untuk keempat kombinasi, penguat hibrid selalu lebih baik dari EDFA murni. Hal tersebut ditunjukkan dengan L_{span}

yang sama, L_{\max} hibrid lebih besar, atau sebaliknya, untuk L_{\max} yang sama, L_{span} hibrid juga lebih besar.

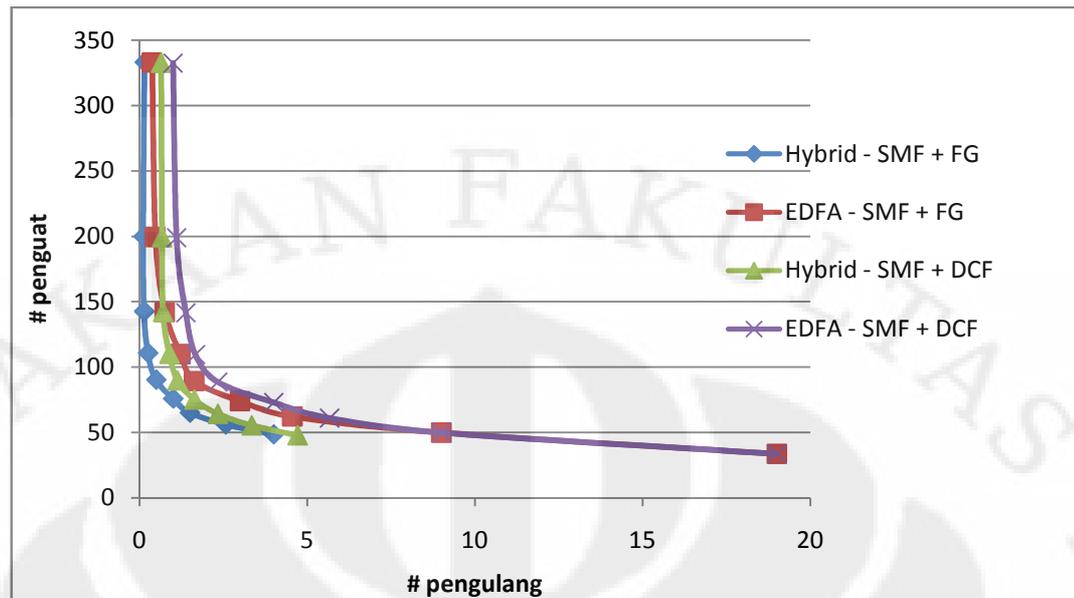


Grafik 3.2.1. L_{span} vs. L_{\max} untuk NZDSF^[3]

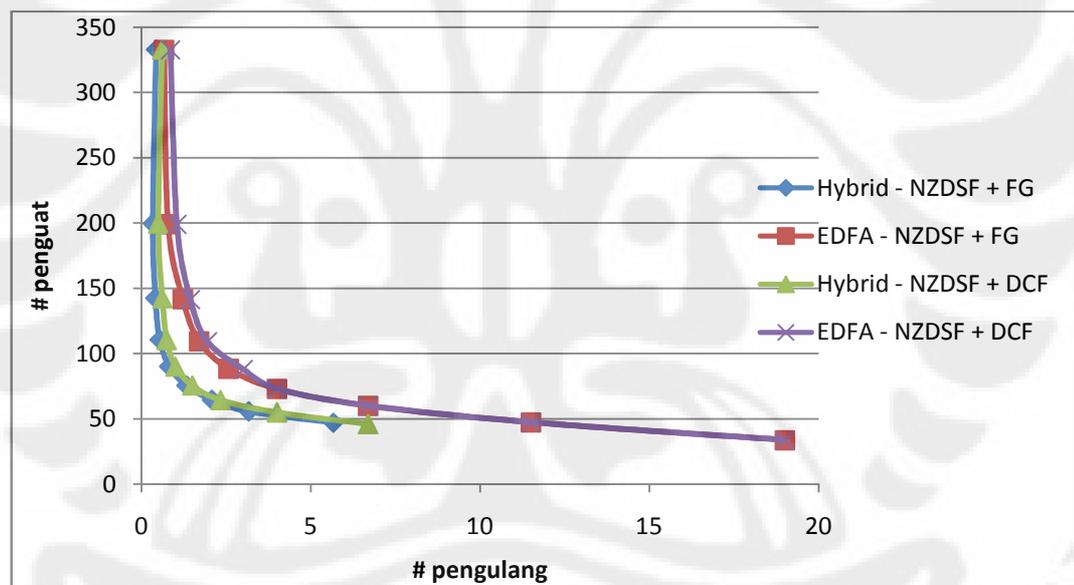
Pada grafik 3.2.1 dan 3.2.2, terlihat bahwa untuk L_{span} yang semakin tinggi, L_{\max} akan menurun. Selain itu, kita dapatkan bahwa kombinasi serat optik yang lebih baik selalu berada diatas. Dari perbandingan kedua grafik diketahui bahwa FG memberi hasil yang lebih baik karena tidak menambah nonlinearitas. SMF juga lebih baik dari NZDSF, maka dari itu kombinasi terbaik adalah SMF + FG.

Bila kita membandingkan kombinasi apapun (dari 4 yang ada), penguat hibrid selalu memberikan hasil lebih baik dari EDFA murni. Kita mengambil contoh kombinasi terbaik yakni SMF+FG, untuk mencapai 7.000 km (L_{\max}), EDFA hanya memiliki L_{span} maksimum sebesar 30 km, sementara penguat hibrid memiliki L_{span} maksimum sampai sekitar 120 km, artinya 4 kalinya EDFA.

Grafik 3.2.3 dan 3.2.4 dibuat dengan asumsi jarak yang ingin dicapai sejauh 10.000 km. Adapun nilai pengulang tidak dibulatkan (dibiarkan dalam koma), karena 10.000 km masih merupakan angka patokan dan belum disesuaikan dengan panjang sesungguhnya dari SKKL yang ingin dianalisis.



Grafik 3.2.3. # penguat vs. # pengulang untuk SMF



Grafik 3.2.4. # penguat vs. # pengulang untuk NZDSF

Dari kedua grafik diatas, perbedaan L_{\max} dari serat optik yang berbeda dalam orde ribuan kilometer untuk nilai L_{span} yang sama dan kecil (sekitar 50 km) tidak memberikan efek yang berarti pada jumlah pengulang yang digunakan. Hal ini dikarenakan asumsi jarak yang digunakan hanya 10.000 km. Sebagai ilustrasi, L_{\max} 8.000 atau 5.000 km akan sama-sama membutuhkan 1 pengulang (bila dibulatkan) sehingga keunggulan serat optik yang memiliki L_{\max} 8.000 km seolah-

olah menjadi hilang untuk jarak 10.000 km. Namun bila jaraknya jauh lebih besar dari 10.000 km, tentunya hasilnya akan berbeda.

Untuk L_{span} yang semakin besar (dalam grafik diplot hingga 190 km), jumlah pengulang yang diinginkan melonjak. Pada $L_{\text{span}} = 190$ km (jumlah penguat sekitar 50), ada perbedaan tajam antara serat yang menggunakan DCF dan FG. Seperti $L_{\text{span}} = 50$ km, perbedaan ini akan menjadi semakin tajam bila jangkauan SKKL yang diinginkan jauh diatas 10.000 km.

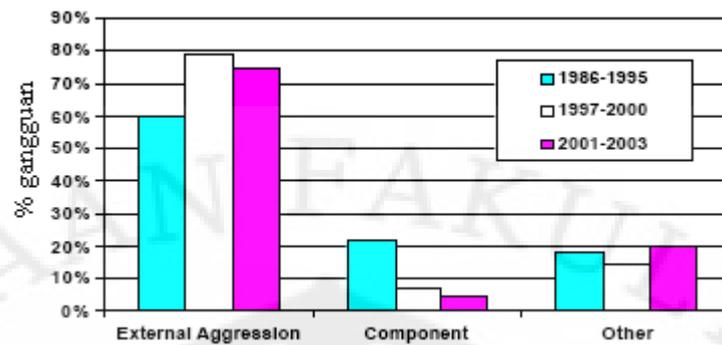
Pengulang merupakan suatu peralatan yang biayanya mahal dan ingin diminimalkan penggunaannya. Seperti yang disebutkan sebelumnya, perkembangan teknologi penguat telah memungkinkan pengurangan jumlah pengulang secara besar-besaran. Oleh karena itu jenis serat optik yang kita pilih tentunya yang paling mendukung hal tersebut.

Namun satu hal yang harus diingat, perhitungan jumlah pengulang perlu dilakukan terlebih dahulu, karena baik EDFA maupun hibrid mampu menjangkau sejauh 0.1~0.5 dari jangkauan total suatu SKKL sehingga kita dapat memperoleh nilai L_{span} yang lebih baik (mengurangi jumlah penguat), dengan sedikit penurunan L_{max} yang tak berpengaruh terhadap jumlah pengulang.

3.3. KETAHANAN TERHADAP GANGGUAN

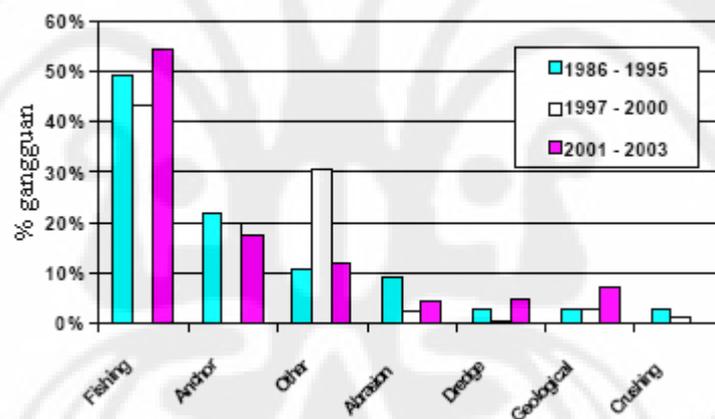
Subbab ini akan diisi dengan prediksi mengenai kerentanan SEA-ME-WE 3 dan 4 terhadap gangguan. Dari pembahasan di subbab 2.6, kita mengetahui bahwa SKKL tidak kebal terhadap gangguan yang ada. Pada subbab tersebut telah dibahas mengenai penyebab utama gangguan pada SKKL dan cara memperbaiki kabel serat optik bawah laut yang mengalami gangguan.

Berikut adalah grafik penyebab gangguan pada kabel optik bawah laut berdasar 3 faktor utama yang disusun oleh analis dari *Submarine Cable Improvement Group*:



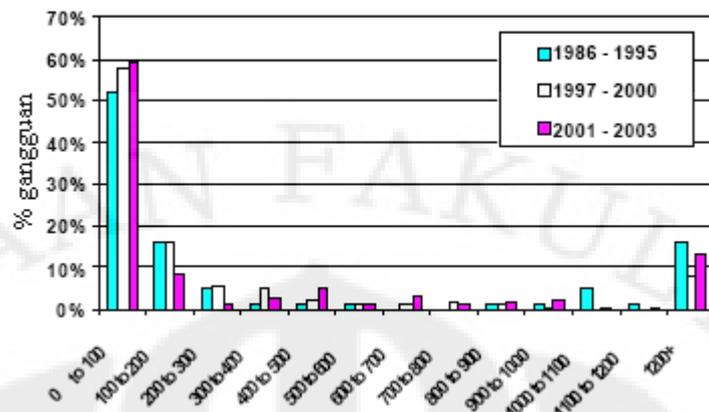
Grafik 3.3.1. Penyebab Utama Kerusakan Kabel Laut 1986-2003^[10]

Faktor gangguan dari luar meliputi bencana/gangguan alam seperti cuaca ekstrim, gempa bawah laut, arus laut yang kencang, maupun aktivitas manusia seperti perikanan dan penenggelaman jangkar kapal. Karena signifikannya faktor gangguan dari luar, faktor tersebut akan dibuatkan grafik sendiri sebagai berikut:



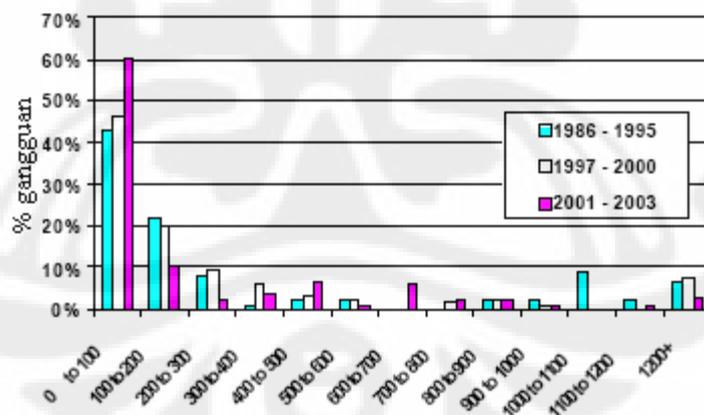
Grafik 3.3.2. Faktor Gangguan dari Luar 1986-2003^[10]

Dari grafik diatas dapat kita lihat bahwa aktivitas manusia seperti perikanan dan jangkar kapal memiliki kontribusi sampai 70% dari faktor gangguan dari luar. Porsi terbesar dimiliki oleh perikanan dimana 50% dari faktor gangguan dari luar diakibatkan olehnya. Adapun gangguan geografis mengalami peningkatan, dan gangguan berupa goresan menurun. Dapat kita katakan bahwa bila aktivitas geografis pada dasar laut intensitasnya tinggi, kerusakan serius pada kabel dapat terjadi. Bila sebaliknya, biasanya kabel hanya bergeser dan tergores sedikit.



Grafik 3.3.3. Distribusi Gangguan dari Luar berdasar Kedalaman^[10]

Grafik diatas mendistribusikan faktor gangguan dari luar berdasar kedalaman dimana gangguan terjadi. Dapat kita lihat bahwa mayoritas gangguan terjadi pada kedalaman kurang dari 200 meter, bahkan 60% dari gangguan terjadi pada kedalaman kurang dari 100 meter. Walaupun hanya sedikit gangguan terjadi antara kedalaman 300-1000 meter, data menunjukkan perubahan signifikan dari periode 97-00 ke 01-03. Pada kedalaman 500-700 meter terjadi lonjakan gangguan.



Grafik 3.3.4. Distribusi Gangguan oleh Perikanan berdasar Kedalaman^[10]

Grafik diatas mirip dengan grafik 3.3.3 hanya saja berasal dari faktor perikanan saja, sebagai faktor paling dominan. Kita melihat bahwa gangguan terbesar ada pada kedalaman kurang dari 200 meter, dan periode 01-03 menyaksikan peningkatan drastis untuk gangguan pada kedalaman < 100 meter. Suatu analisis

yang dapat digunakan adalah kedalaman dangkal terasosiasi dengan kawasan pelabuhan/pantai dimana kabel serat optik mungkin saja ditanam kurang dalam sehingga masih dapat terganggu oleh ramainya aktivitas perikanan. Menanggapi hal ini, perhatian ekstra berupa penanaman kabel serat optik lebih dalam pada kawasan pantai menjadi salah satu solusi untuk menekan jumlah gangguan.

Meninjau rute geografis SEA-ME-WE 3 dan 4 (gambar 4.1.1. dan 4.1.2.), kita lihat bahwa dengan sistem *landing points* (di darat) yang ada, SEA-ME-WE 3 dan 4 banyak menyusuri daerah pantai dan pelabuhan. Untuk SEA-ME-WE 3, hanya pada 2 bagian, yakni dari Djibouti (14) sampai Mumbai, India (18) dan dari Jakarta (26) sampai Perth, Australia (27), terlihat SKKL ini melintasi perairan yang jauh dari daratan. Adapun untuk SEA-ME-WE 4, hal tersebut bahkan hanya dijumpai pada 1 bagian, yakni dari Jeddah (8), sampai Mumbai (11).

Hal tersebut mengimplikasikan SEA-ME-WE 3 dan 4 banyak berada di perairan dangkal, dimana menurut analisis dari data gangguan kabel serat optik bawah laut di atas, merupakan kedalaman yang paling banyak terdapat gangguan pada kabel serat optik. Logikanya, perairan dangkal merupakan wilayah perairan yang kepadatan aktivitas manusianya paling tinggi, maka dari itu tentunya resiko gangguan oleh faktor aktivitas manusia (yang merupakan faktor paling dominan) juga cukup tinggi.

Selain itu, daerah Laut Mediterania di dekat Terusan Suez di Mesir juga merupakan perairan yang sangat ramai oleh kapal-kapal yang ingin memotong jalur antara Asia Tengah dan Eropa. Banyaknya kapal yang berlalu-lalang akan menambah resiko gangguan akibat jangkar, yang juga menurut analisis diatas adalah faktor kedua paling dominan setelah perikanan.

Dari kedua hal diatas, dapat dikatakan bahwa berdasarkan studi gangguan pada subbab ini, SKKL SEA-ME-WE 3 dan 4 secara geografis memiliki resiko gangguan dari aktivitas manusia yang cukup tinggi. Perbandingan yang cukup radikal mungkin dapat dilakukan dengan melihat sistem kabel Trans-Atlantik (membentangi Samudra Pasifik menghubungkan Asia Timur dengan Amerika

Serikat), dimana tentunya dengan panjang bentangan yang mayoritas berada di tengah Samudra, resiko gangguan akibat aktivitas manusia cukup kecil.



Gambar 3.3.1. Peta SKKL Dunia^[11]

Dari peta kabel serat optik dunia diatas, dapat kita lihat ramainya kabel yang melintasi Samudra Atlantik (menghubungkan Amerika Serikat dengan Eropa Barat), yang diikuti dengan Samudra Pasifik. Sementara kawasan Asia Selatan dan khususnya Timur Tengah tidak banyak dilewati kabel optik bawah laut. Selain itu, kabel optik yang ada juga melewati daerah yang sama yakni Laut Mediterania. Dari peta diatas juga kita melihat bahwa akses internet Afrika Utara dan Timur Tengah sepenuhnya bergantung pada kabel optik disekitarnya.

Dengan asumsi *server* yang umumnya dikunjungi pengguna internet berada di Amerika Serikat, adanya gangguan serius dapat berakibat fatal bagi hubungan telekomunikasi di daerah Timur Tengah dan Afrika Utara karena minimnya jalur alternatif. Sebagai *backbone* utama di kawasan tersebut, tentunya SEA-ME-WE 3 dan 4 mengemban tanggung jawab yang sangat besar.

Berangkat dari pemikiran diatas, mungkin kemutakhiran teknologi serat optik modern yang mampu ditingkatkan kapasitasnya tanpa membentangkan kabel baru tidak mampu menjawab tantangan dari segi ancaman terhadap kestabilan sistem. Mau tidak mau, penambahan sistem kabel laut baru harus dipertimbangkan sebagai salah satu opsi penting dalam memastikan kestabilan sistem kabel laut pada suatu kawasan.

BAB 4

ANALISIS PERBANDINGAN DAN KINERJA

SEA-ME-WE 3 DAN 4

Pada bagian ini, analisis pendahuluan pada bab 3 yang berupa aspek penting hasil pengintegrasian landasan teori akan digunakan ke sistem komunikasi kabel laut SEA-ME-WE 3 dan 4. Bab ini juga dilengkapi dengan analisis perbandingan berdasar data teknis maupun nonteknis dari kedua sistem kabel laut tersebut. Maka dari itu, bab ini akan dimulai dengan profil SEA-ME-WE 3 dan 4 sebelum masuk ke bagian analisis kinerja dan perbandingan.

4.1. PROFIL SEA-ME-WE 3 DAN 4

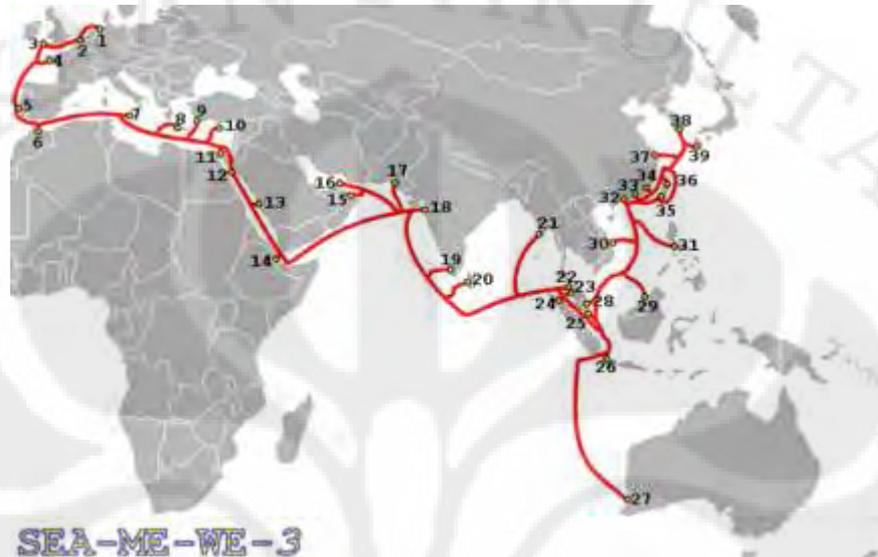
4.1.1. SEA-ME-WE 3

SEA-ME-WE 3 adalah kabel sistem ketiga pada seri SEA-ME-WE, melalui suatu proyek konsorsium yang ditandatangani oleh 92 perusahaan telekomunikasi internasional pada November 1997. Proyeknya selesai pada akhir tahun 2000, dengan 39 *landing points* di 33 negara dan 4 benua membentang dari Jerman sampai Australia. Panjangnya mencapai 39.000 km dan sampai saat ini merupakan sistem kabel bawah laut terpanjang di dunia. Perusahaan manufaktur yang bertanggungjawab atas pembangunan sistem ini adalah Alcatel Submarine Networks, AT&T – SSI, KDD-SCS, dan Pirelli. Teknologi multipleks yang digunakan adalah WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Protokol multipleks yang digunakan adalah SDH atau (*Synchronous Digital Hierarchy*). Penguat yang digunakan adalah penguat EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*)

Setelah beberapa tahun beroperasi, anggota konsorsium sepakat meningkatkan kapasitas SEA-ME-WE 3. Sampai sekarang, SEA-ME-WE 3 sudah ditingkatkan kapasitasnya 2 kali. Pada mulanya, kapasitas SEA-ME-WE 3 hanyalah 2x8x2.5 Gbps. Setelah itu, SEA-ME-WE 3 ditingkatkan kapasitasnya menjadi 10 Gbps

untuk beberapa ruas pada 2003 dan 2006. Pada Mei 2007 kapasitasnya ditingkatkan lagi menjadi 2x48x10 Gbps, dan bertahan sampai sekarang.

Berikut adalah *landing points* beserta rute dari SEA-ME-WE 3:



Gambar 4.1.1. Rute SEA-ME-WE 3^[12]

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| 1. Norden, Jerman | 17. Karachi, Pakistan |
| 2. Oostende, Belgia | 18. Mumbai, India |
| 3. Goonhilly, Inggris | 19. Cochin, India |
| 4. Penmarch, Perancis | 20. Mount Lavinia, Sri Lanka |
| 5. Sesimbra, Portugal | 21. Pyapon, Myanmar |
| 6. Tetuan, Maroko | 22. Satun, Thailand |
| 7. Mazara del Vallo, Italia | 23. Penang, Malaysia |
| 8. Chania, Yunani | 24. Medan, Indonesia |
| 9. Marmaris, Turki | 25. Tuas, Singapura |
| 10. Yeroskipou, Siprus | 26. Jakarta, Indonesia |
| 11. Alexandria, Mesir | 27. Perth, Australia |
| 12. Suez, Mesir | 28. Mersing, Malaysia |
| 13. Jeddah, Arab Saudi | 29. Tungku, Brunei |
| 14. Djibouti, Djibouti | 30. Da Nang, Vietnam |
| 15. Muscat, Oman | 31. Batangas, Filipina |
| 16. Fujairah, Uni Emirat Arab | 32. Taipa, Macau |

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 33. Deep Water Bay, Hong Kong | 37. Shanghai, China |
| 34. Shantou, China | 38. Keoje, Korea Selatan |
| 35. Fengshan, Taiwan | 39. Okinawa, Jepang |

36. Toucheng, Taiwan

4.1.2. SEA-ME-WE 4

SEA-ME-WE 4 adalah sistem kabel serat optik bawah laut yang menghubungkan banyak negara yakni Singapura, Malaysia, Thailand, Bangladesh, India, Sri Lanka, Pakistan, Uni Emirat Arab, Arab Saudi, Sudan, Mesir, Italia, Tunisia, Algeria, dan Perancis. Kehadiran SEA-ME-WE 4 sebetulnya lebih ditujukan untuk membantu SEA-ME-WE 3, bukan menggantikannya.

SEA-ME-WE 4 dikembangkan oleh konsorsium 16 perusahaan telekomunikasi yang menyetujui usulan proyek pada 27 Maret 2004. Pemasangan sistem dilakukan oleh Alcatel Submarine Networks (sekarang Alcatel-Lucent Submarine Networks, divisi dari Alcatel-Lucent) dan Fujitsu. Konstruksi selama 18 bulan akhirnya selesai pada 13 Desember 2005 dengan estimasi biaya 500 juta dollar AS. SEA-ME-WE 4 membentang sepanjang 18.800 km dan melewati 17 landing points di 15 negara dari 3 benua. Konsorsium ini ditandatangani oleh 16 perusahaan, yakni masing-masing negara diwakili 1 perusahaan, kecuali India (2 perusahaan). SEA-ME-WE 4 hadir dengan protokol multiplex SDH, teknologi multiplex DWDM, dan penguat hibrid (EDFA/Raman).

Pada mulanya, SEA-ME-WE 4 berkapasitas 16x10 Gbps. Pada tahun 2007 kapasitasnya ditingkatkan besar-besaran menjadi 2x64x10 Gbps atau 1.28 Tbps. Saat skripsi ini ditulis, Fujitsu dan Alcatel-Lucent masih berada dalam proyek peningkatan kapasitas SEA-ME-WE 4, yang dikabarkan menjadi lebih dari 2x atau hampir 3x kapasitas saat ini.

SEA-ME-WE 4 dibagi menjadi 4 segmen sebagai berikut:

- Segmen 1 : Tuas, Singapura – Mumbai, India
- Segmen 2 : Mumbai, India – Suez, Mesir
- Segmen 3 : Suez, Mesir – Cairo, Mesir
- Segmen 4 : Cairo, Mesir – Marseille, Perancis

Adapun berikut adalah *landing points* berikut rute yang ditempuh SEA-ME-WE 4:



Gambar 4.1.2. Rute SEA-ME-WE 4^[13]

- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| 1. Marseille, Perancis | 10. Karachi, Pakistan |
| 2. Annaba, Algeria | 11. Mumbai, India |
| 3. Bizerte, Tunisia | 12. Colombo, Sri Lanka |
| 4. Palermo, Italia | 13. Chennai, India |
| 5. Alexandria, Mesir | 14. Cox's Bazar, Bangladesh |
| 6. Kairo, Mesir | 15. Satun, Thailand |
| 7. Suez, Mesir | 16. Malaka, Malaysia |
| 8. Jeddah, Arab Saudi | 17. Tuas, Singapura |
| 9. Fujairah, Uni Emirat Arab | |

4.2. HAL NONTEKNIS YANG PERLU DIKETAHUI

Subbab ini akan membandingkan SEA-ME-WE 3 dan 4 dari segi nonteknis, dalam arti aspek yang tidak berhubungan secara langsung dengan dasar ilmu keteknikan pada umumnya dan dasar sistem komunikasi serat optik pada khususnya. Walaupun demikian, aspek ini tetap penting sekaligus menarik untuk dianalisis karena ada perbedaan cukup signifikan yang membedakan kedua SKKL ini. Subbab ini mencakup perbandingan jumlah perusahaan anggota konsorsium, negara (dan benua), *landing points*, dan tentu saja nilai investasi.

Dari segi jumlah perusahaan, terdapat penurunan signifikan dari SEA-ME-WE 3 ke 4, yakni dari 92 perusahaan menjadi 16 perusahaan. Jumlah negara yang dilintasi pun menurun, dari 33 menjadi 15 saja, serta dari 4 benua (termasuk Australia, bagian barat) menjadi kembali 3 benua saja (Asia-Afrika-Eropa). Sejalan dengan itu, *landing points* SEA-ME-WE 3 yang berjumlah 39 pun berkurang menjadi 17 untuk SEA-ME-WE 4.

Penyebab yang dominan tentunya adalah penekanan proyek yang berbeda dimana SEA-ME-WE 4 lebih ditekankan untuk membantu SEA-ME-WE 3 dengan memiliki kapasitas yang jauh lebih besar, namun hanya memiliki bentangan sepanjang setengahnya. Selain itu, faktor ekonomis juga tentu berperan, dimana penyedia jasa telekomunikasi di setiap negara akan memperhitungkan seberapa besar tuntutan kapasitas yang ada, kemampuan finansial perusahaan itu sendiri, dan alternatif SKKL/media telekomunikasi lain, sebelum sampai pada keputusan final mengenai keikutsertaan dalam konsorsium.

Bila dibandingkan rasio perusahaan banding negara, dari rata-rata 2.79 perusahaan telekomunikasi per negara yang berpartisipasi dalam konsorsium SEA-ME-WE 3, turun menjadi 1 perusahaan/negara saja untuk SEA-ME-WE 4. Adapun hanya India yang memiliki lebih dari 1, yakni 2, perusahaan yang menjadi anggota konsorsium SEA-ME-WE 4. PT Indosat Tbk. dari Indonesia awalnya berencana berpartisipasi, sekaligus dengan penambahan 1 *landing point* di Indonesia. Namun akhirnya rencana tersebut batal dan otomatis *landing point* SEA-ME-WE 4 di Indonesia pun ditiadakan.

Dari segi investasi, investasi SEA-ME-WE 3 sebesar 1500 juta dollar AS menghasilkan SKKL sepanjang 39.000 km dan kapasitas awal 40 Gbps. Bila masing-masing dibagi, kita mendapat 2 nilai berikut untuk SEA-ME-WE 3:

1. Investasi per km untuk kapasitas 40 Gbps, senilai 38.462 dollar AS
2. Investasi per Mbps untuk bentang 39.000 km, senilai 37.500 dollar AS

Adapun untuk SEA-ME-WE 4, investasi sebesar 500 juta dollar AS menghasilkan SKKL sepanjang 18.800 km dan kapasitas awal 160 Gbps. Bila dibagi kita mendapat 2 nilai berikut untuk SEA-ME-WE 4:

1. Investasi per km untuk kapasitas 160 Gbps senilai 26.596 dollar AS
2. Investasi per Mbps untuk bentang 18.800 km senilai 3.125 dollar AS

Untuk nilai investasi per km pada kapasitas masing-masing, ada penurunan sebesar 30,85% dari SEA-ME-WE 3 ke 4, dengan kapasitas yang meningkat 300%. Adapun untuk nilai investasi per Mbps pada bentangan masing-masing, ada penurunan sebesar 91,67% dari SEA-ME-WE 3 ke 4, dengan panjang bentangan menurun 51,8%.

Namun perlu diingat bahwa dari awal peluncuran SEA-ME-WE 4, konsorsium pemilik sudah mengklaim kecepatan hingga 1.28 Tbps walaupun kapasitas awalnya hanya 160 Gbps. Dalam hitungan 1-2 tahun, 40 vs. 160 Gbps secara cepat berkembang ke 160 Gbps (2x8x10) vs. 1.28 Tbps (2x64x10). Jika dibandingkan kondisi saat ini, perbandingannya sudah 960 Gbps (2x48x10) vs. 1.28 Tbps (2x64x10). Perbandingan tersebut perlu memperhitungkan tambahan dana dalam proses peningkatan kapasitas, namun datanya tidak tersedia sehingga perbandingan yang aktual pada saat sekarang tak dapat dilakukan.

Selain itu, tidak ada juga data rincian alokasi modal ke setiap elemen pendukungnya (kabel, stasiun darat, *multiplexer*, dlsb.) dalam proyek SEA-ME-WE 3 dan 4, sehingga perhitungan yang lebih mendalam dari sekedar pembagian sederhana diatas tak dapat dilakukan.

Paparan diatas dapat dirangkum dalam suatu tabel:

Tabel 4.2.1: SEA-ME-WE 3 vs. 4 dari Segi Nonteknis

Aspek	SEA-ME-WE 3	SEA-ME-WE 4
Benua	4	3
Negara	33	15
<i>Landing Points</i>	39	17
Perusahaan	92	16
Bentangan	39.000 km	18.800 km
Tahun <i>Upgrade</i>	2003, 2006, 2007	2007, 2009
Nilai Investasi	1500 juta dollar AS	500 juta dollar AS

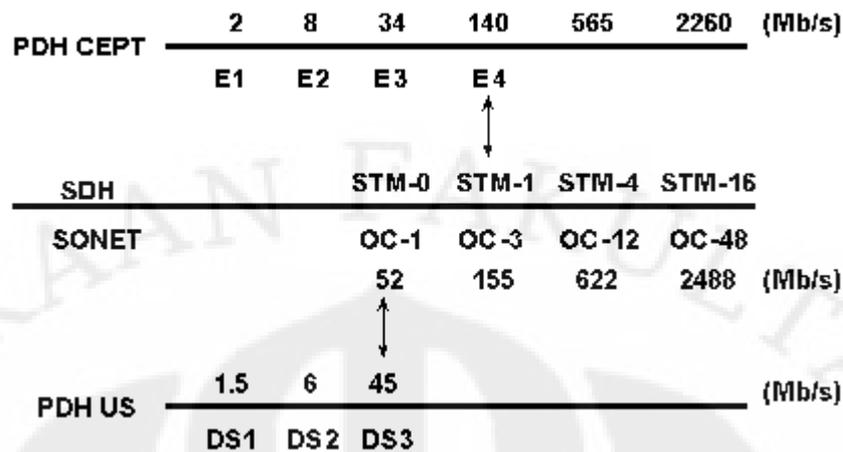
US \$/km	38.462	26.596
US \$/Mbps	37.500	3.125

4.3. PROTOKOL MULTIPLEKS

Sebetulnya pada aspek ini, SEA-ME-WE 3 dan 4 menggunakan protokol multipleks yang sama, yakni SDH atau *Synchronous Digital Hierarchy*. Protokol multipleks ini hadir untuk menggantikan protokol multipleks lama yakni PDH atau *Plesiochronous Digital Hierarchy*. Berikut keuntungan beberapa poin keuntungan dari SDH:

- Standar dunia pertama dalam bentuk digital
- Struktur multipleks sinkron yang fleksibel
- Kapabilitas hubung-silang dan *and-and-drop* lalu lintas yang mudah dan efisien dari segi ongkos
- Pengurangan jumlah antarmuka *back-to-back* meningkatkan kemampuan jaringan dan kemudahan dalam perawatan atau perbaikan
- Kapabilitas manajemen yang kuat
- Arsitektur jaringan yang baru. Sangat fleksibel dan *self-healing rings* tersedia
- Kompabilitas ke depan dan kebelakang, ke belakang artinya kompatibel dengan PDH, ke depan artinya kompatibel dengan B-ISDN masa depan, dan lain lain

Bit-rate atau laju-bit yang umum dari PDH dapat dikonversikan ke dalam sistem SDH. Pada umumnya PDH menggunakan *bitrate* 155 MBps, yang ekuivalen dengan STM-1 dari SDH. Adapun berikut adalah diagram bagaimana standar dalam PDH dikonversikan ke dalam PDH:



Gambar 4.3.1. Diagram Ekivalensi PDH-SONET-SDH-PDH US^[14]

Gambar lebih lengkap mengenai hirarki SDH berdasar standar PDH yang berbeda-beda dapat dilihat pada bagian sebelumnya, yakni gambar 2.4.1. dan tabel mengenai perbandingan standar SONET dan SDH dapat dilihat pada tabel 2.4.2. Berdasar subbab protokol multipleks pada bab 2, dijelaskan bahwa modul yang saat ini populer untuk SKKL adalah STM-64 (10 Gbps) dan STM-256 (40 Gbps) karena kemudahan dan kemurahan pengimplementasiannya.

Disaat protokol SDH memberi batasan yang jelas pada seri SEA-ME-WE 2 (menggunakan PDH) dengan 3 dan 4, antara SEA-ME-WE 3 dan 4 tetap terdapat perbedaan dari tingkatan unit *frame*. Seperti yang disimak pada subbab sebelumnya, pada awalnya SEA-ME-WE 3 berkapasitas 2.5 Gbps per panjang gelombang, yang artinya pada awalnya SEA-ME-WE 3 menggunakan STM-16. Kemudian SEA-ME-WE 3 sempat ditingkatkan kapasitasnya beberapa kali, yakni menaikkan kapasitas per panjang gelombang dari 2.5 ke 10 Gbps, yang artinya menggunakan STM-64.

Adapun untuk SEA-ME-WE 4, dari awal pengimplementasiannya sudah menggunakan modul STM-64 berkapasitas 10 Gbps per panjang gelombang. Kemudian ada peningkatan kapasitas, namun peningkatan tersebut berkuat pada teknologi multipleks yang akan dipaparkan pada subbab berikutnya. Dengan kata lain, pada peningkatan kapasitas pertama ini modul yang digunakan tetap STM-64. Ada rencana peningkatan kapasitas oleh 2 perusahaan penyedia alat-alat

SKKL yakni Fujitsu dan Alcatel-Lucent, dan diproyeksikan selesai tahun 2009. Sampai skripsi ini disusun, belum ada kepastian berapa persisnya peningkatan kapasitas yang sedang atau akan diimplementasikan. Dari semua penjelasan diatas, dapat disusun tabel berikut:

Tabel 4.3.1 SEA-ME-WE 3 vs 4 dari Segi Protokol Multipleks

Aspek	SEA-ME-WE 3	SEA-ME-WE 4
Protokol Multipleks	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>	
Modul SDH	STM-16	STM-64
Ekivalensi SONET	OC-48	OC-192
Kapasitas Modul	2.405.376 Kbps	9.621.504 Kbps
<i>Upgrade</i>	STM-64	tetap

4.4. TEKNOLOGI MULTIPLEKS

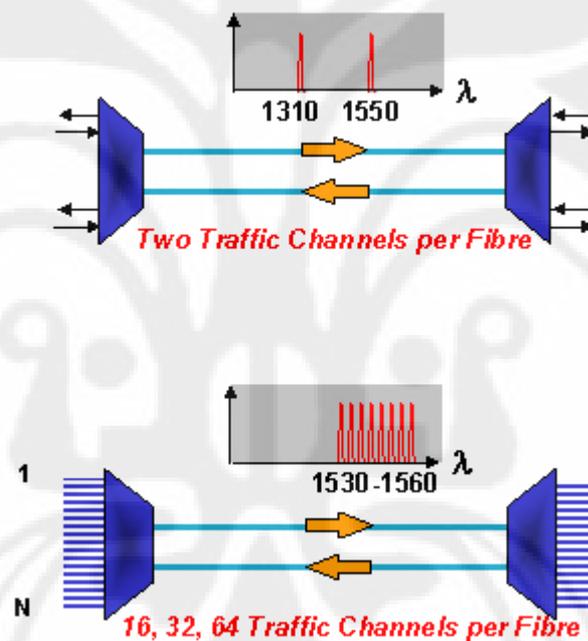
Seperti yang telah dijabarkan sebelumnya, pemultipleksan sudah menjadi harga mati dalam aplikasi sistem komunikasi serat optik modern. Teknik atau jenis multipleks yang paling populer dan banyak digunakan pada sistem kabel serat optik adalah WDM atau *Wavelength Division Multiplexing*. Baik SEA-ME-WE 3 maupun 4 sudah menggunakan teknologi ini untuk memampatkan, yang berimbas pada mengaktifkan kabel serat optik yang sudah dibentangkan.

Adapun dari segi WDM sebagai teknologi multipleks ini, terdapat perbedaan yang cukup substansial antara SEA-ME-WE 3 dan 4. Kembali ke bagian sebelumnya, kita mengingat bahwa yang digunakan pada SEA-ME-WE 3 adalah WDM saja, sedangkan pada SEA-ME-WE 4, yang digunakan adalah DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*).

WDM dan DWDM sebetulnya tidak setara sehingga perbandingan antara keduanya tidak lazim dibahas dalam topik teknologi multipleks berdasar panjang gelombang. Hal tersebut dikarenakan WDM tak lain adalah basis dari teknologi multipleks ini, merangkap istilah yang dipakai pada saat implementasi awalnya. Dari bagian sebelumnya, kita mengetahui bahwa WDM pertama kali

dipublikasikan tahun 1970 dan baru pada tahun 1978 berhasil diujicobakan di laboratorium. Setelah mengalami penyempurnaan, sekarang yang dikenal sekaligus aplikatif dari WDM adalah DWDM dan CWDM (*Coarse Wavelength Division*). Kembali ke masalah perbandingan, DWDM dan CWDM-lah yang menjadi bahan perbandingan yang seimbang serta ramai dibicarakan.

Namun, mengingat isi dari tugas akhir ini adalah perbandingan beberapa aspek dari SEA-ME-WE 3 dan 4, mau tidak mau perlu dibuat suatu perbandingan antara WDM dan DWDM. Perbandingan antara WDM pada awal penemuannya dengan DWDM ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.4.1. WDM vs. DWDM ^[15]

Pada gambar diatas kita dapat melihat bahwa WDM pada awalnya hanya menggabungkan 2 panjang gelombang, sementara teknologi DWDM mutakhir sudah dapat menggabungkan sampai 64, bahkan 160 panjang gelombang. Asumsi kapasitas (dalam hal ini tingkat modul SDH) tiap panjang gelombang sama, artinya DWDM menawarkan kapasitas sebesar 8, 16, 32, atau 80 kali dari WDM klasik.

Namun bila kita amati dari informasi SEA-ME-WE 3 pada bagian sebelumnya, kita melihat bahwa teknologi WDM yang digunakan oleh SEA-ME-WE 3 pada awalnya adalah penggabungan 8 panjang gelombang (pada awalnya, 8x2.5 Gbps). Adapun untuk SEA-ME-WE 4, teknologi DWDM yang digunakan pada awalnya menggabungkan 16 panjang gelombang (16 x 10 Gbps). Bila kita membandingkan kapasitas awal kedua SKKL ini dari segi teknologi multipleks, kita dapatkan bahwa SEA-ME-WE 4 memiliki kapasitas 2 kali SEA-ME-WE 3.

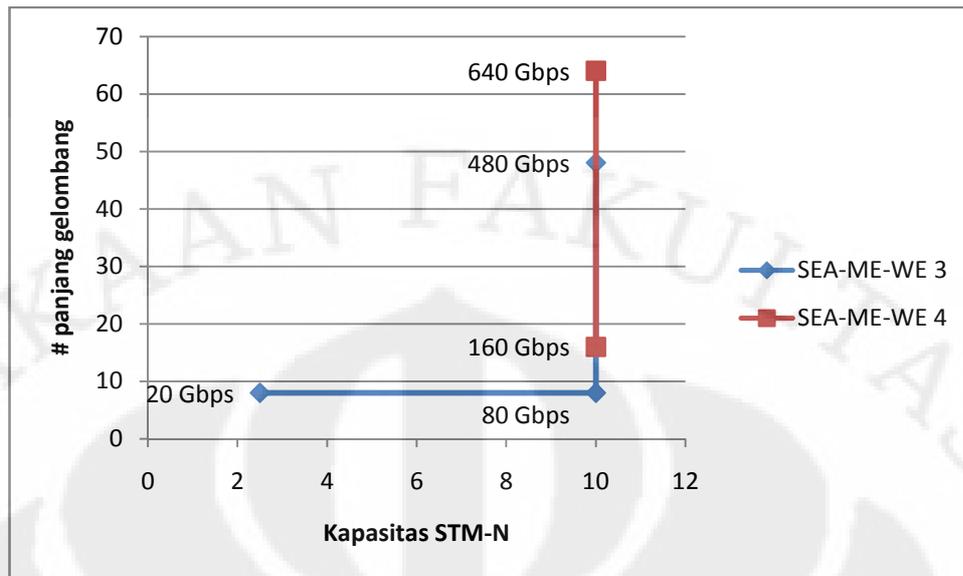
Satu hal yang tidak boleh kita lupakan, baik SEA-ME-WE 3 maupun 4 masing-masing mengalami penambahan kapasitas. Sesuai yang disebutkan sebelumnya, SEA-ME-WE 3 ditingkatkan pemadatan panjang gelombangnya menjadi 48 panjang gelombang. Pada titik ini, kita melihat bahwa SEA-ME-WE 3 sudah menggunakan DWDM dari sebelumnya WDM konvensional. Sementara SEA-ME-WE 4 saat ini menggabungkan 64 panjang gelombang. Dengan demikian, rasionya menjadi 4:3. Dari semua penjelasan diatas, dapat disusun tabel berikut:

Tabel 4.4.1: SEA-ME-WE 3 vs 4 dari Segi Teknologi Multipleks

Aspek	SEA-ME-WE 3	SEA-ME-WE 4
Teknologi Multipleks	WDM kemudian DWDM	DWDM
λ Awal	8	16
Rasio Awal	1	2
λ Sekarang	48	64
Rasio Sekarang	3	4

4.5. PENINGKATAN KAPASITAS

Seperti yang telah dibahas pada 3.1, peningkatan kapasitas dapat dicapai dengan 2 cara yakni dengan penambahan jumlah panjang gelombang dan tingkat modul SDH. SEA-ME-WE 3 dan 4 masing-masing sudah (dan akan) mengalami lebih dari satu kali peningkatan kapasitas, yang sampai sekarang ini dapat disajikan dalam grafik berikut:



Grafik 4.5.1. Kapasitas STM-N vs. # Panjang Gelombang

Grafik diatas diplot dalam kondisi kapasitas sepasang serat optik. SEA-ME-WE 3 dan 4 sama-sama memiliki 2 pasang serat optik. Dari sebab itu, kapasitas total yang sesungguhnya adalah nilai pada grafik dikalikan dengan 2. Tentu saja kita juga dapat meningkatkan kapasitas dengan menambah pasangan serat optik namun dalam subbab ini jelas hal tersebut tidak relevan karena yang dibahas adalah jaringan SEA-ME-WE 3 dan 4 yang sudah ada.

Dari grafik diatas kita melihat bahwa tren peningkatan kapasitas SEA-ME-WE 3 dan 4 berada pada pemadatan panjang gelombang, bukan peningkatan modul SDH. SEA-ME-WE 3 menggunakan metode 1 dan 2, yakni STM-16 → STM-64 dan kemudian # panjang gelombang ditambah pada sesi peningkatan kapasitas yang berbeda. SEA-ME-WE 4 menggunakan metode 1 saja yakni pemampatan # panjang gelombang.

Hasil tersebut, berdasar perhitungan pada subbab 3.1. kurang ekonomis. Ada beberapa penjelasan akan hal tersebut:

- Harga STM-256 belum memenuhi keinginan perusahaan telekomunikasi, yakni masih diatas 3x harga STM-64

- Hal diatas digabungkan dengan masih cukup barunya teknologi STM-256 secara otomatis menetapkan akan standar industri SKKL saat ini, yakni STM-64.

Bagi SEA-ME-WE 4, bila kita berasumsi peningkatan kapasitas diperkirakan akan sampai 2.5 kali kapasitas sekarang, yakni 1.6 Tbps (640 Gbps x 2.5), artinya hanya ada 2 opsi, yakni dari metode 1 dan 3. Dari metode 1 diperlukan tambahan 96 STM-64 (1.5x64) untuk menjadikannya 160 x 10 Gbps. Dari metode 3 diperlukan 24 STM-256 (96:4) untuk menjadikannya 64 @10Gbps + 24 @40 Gbps. Metode 2 tidak dimungkinkan karena faktor pengalinya bukan kelipatan 4, sementara metode 1 dimungkinkan karena teknologi DWDM sudah dapat menggabungkan 160 panjang gelombang.

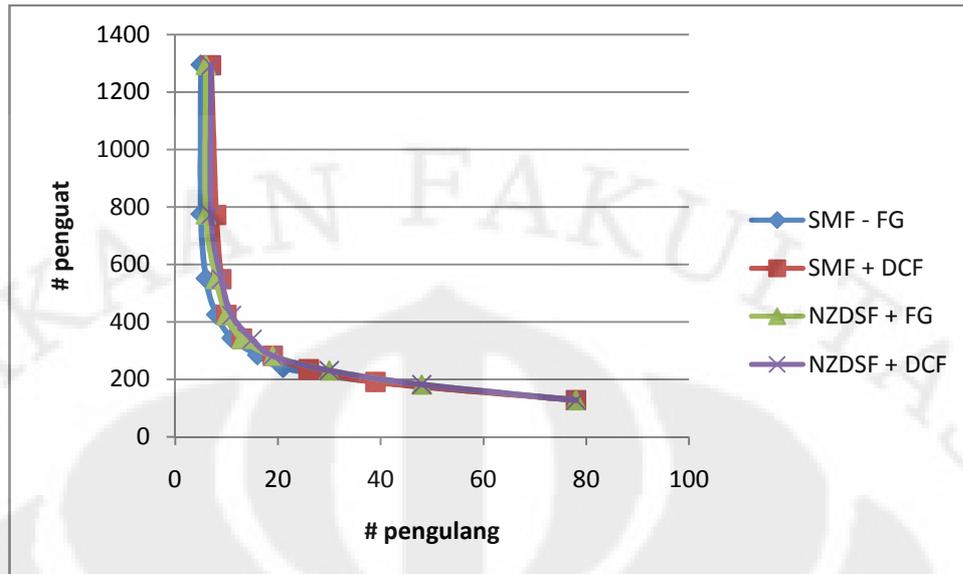
Dari pemaparan diatas dapat disusun lagi tabel perbandingan sebagai berikut:

Tabel 4.5.1: SEA-ME-WE 3 vs 4 dari Segi Peningkatan Kapasitas

Aspek	SEA-ME-WE 3	SEA-ME-WE 4
# peningkatan	3	2
Peningkatan Modul SDH	STM-16 → STM-64	tetap
Peningkatan Jumlah λ	8 → 48	16 → 64
Kapasitas Awal	2x8x2.5 Gbps	16x10 Gbps
Rasio Kapasitas Awal	1	4
Rasio Kapasitas Sekarang	3	4

4.6. EFEKTIFITAS PENGUAT

Subbab 3.2. telah membahas mengenai perhitungan matematis dari jangkauan kedua jenis penguat yang ada, yakni EDFA dan hibrid untuk beberapa kombinasi serat optik. Setelah mengetahui bahwa SEA-ME-WE 3 menggunakan penguat EDFA dan SEA-ME-WE 4 menggunakan penguat hibrid, kita dapat menggunakan analisis pada bab 3 untuk kedua SKKL ini.

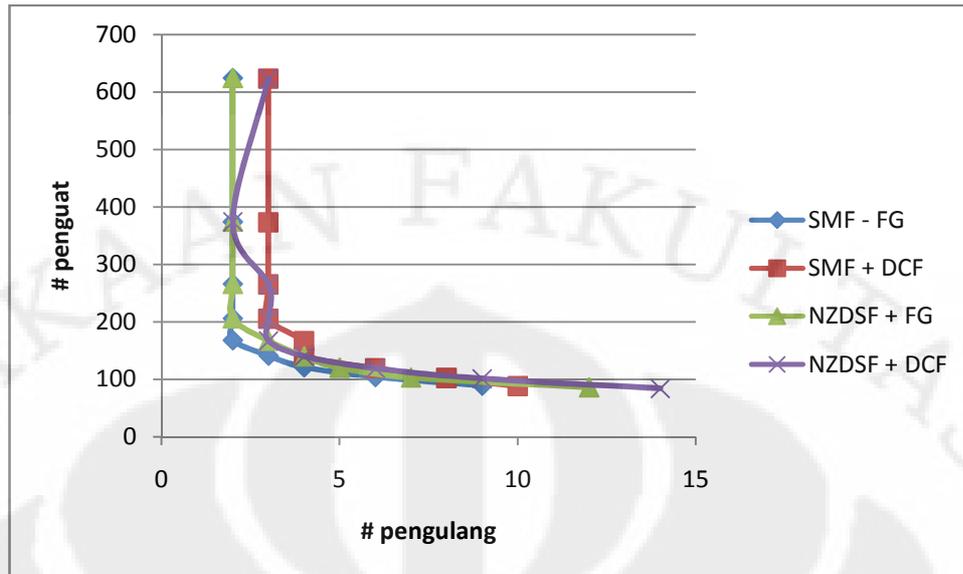


Grafik 4.6.1. # pelanggan vs. # penguat untuk SEA-ME-WE 3

Berbeda dengan grafik 3.2.2 dan 3.2.3, grafik diatas sudah diplot berdasar panjang jangkauan yang diinginkan, 39.000 km dan sudah dibulatkan ke atas serta dikompensasi sedekat mungkin. Kompensasi yang dimaksud adalah pengurangan 1 untuk jangkauan total/jangkauan maksimum penguat, dan pengurangan 1 penguat setiap 1 pelanggan karena pelanggan juga menjalankan peran penguat. Adapun yang diplot hanya penguat EDFA karena penguat itulah yang digunakan.

Dari grafik diatas, sesuai dengan analisis sebelumnya, pasangan data dengan L_{max} tinggi dan L_{span} rendah ternyata tidak memberikan hasil paling ekonomis. Kita lihat di sisi kiri grafik, proporsi L_{span} dan L_{max} yang paling baik adalah sekitar 5 pelanggan dan 775 penguat yang diberikan serat optik jenis SMF + FG. Pengamatan grafik memang tidak mungkin menghasilkan bacaan seteliti itu, data tersebut diambil dari data persis yang menyusun grafik tersebut.

Untuk SEA-ME-WE 4 dengan panjang bentangan 18.800 km, grafik 3.2.2 dan 3.2.3 dapat kembali diplot menjadi:



Grafik 4.6.2. # pengulang vs. # penguat untuk SEA-ME-WE 4

Seperti grafik 4.6.1, grafik inipun sudah disesuaikan dengan bentangan sesungguhnya dari SEA-ME-WE 4 yakni 18.800 km dan diambil penguat hibrid saja (sesuai dengan penguat yang digunakan SEA-ME-WE 4).

Dari grafik diatas, kembali hal yang sama seperti pada SEA-ME-WE 3 ditemui. Karena bentangan total lebih pendek, keunggulan L_{max} menjadi kurang berarti karena setelah dibagi dan dikompensasi, beberapa pasangan data memiliki jumlah pengulang sama, padahal setiap pasangan data L_{span} nya berbeda-beda. Dari grafik diatas didapatkan hasil terbaik diberikan oleh serat optik SMF + FG dengan 2 pengulang + 168 penguat.

Dari jumlah pengulang dan penguat SEA-ME-WE 3 dan 4 terdapat perbedaan yang cukup signifikan. Hal tersebut dikarenakan total bentangan SEA-ME-WE 3 memiliki panjang 2 kali dari SEA-ME-WE 4. Bila kita bandingkan ekuivalennya (dengan mengandaikan SEA-ME-WE 4 sepanjang SEA-ME-WE 3), kita dapatkan $(2 \times 2) + 1 = 5$ pengulang dan $(2 \times 168) = 332$ penguat. Hasil perhitungan ini menandakan teknologi hibrid tidak berhasil membuat perbedaan akan banyaknya pengulang yang dipakai, namun berhasil mengurangi jumlah penguat untuk jarak yang sama sebesar 57.16%. Hal ini sesuai dengan perhitungan pada subbab 3.2 yang mengindikasikan untuk L_{max} yang sama (jumlah pengulang sama), penguat hibrid pasti memiliki L_{span} yang lebih baik dari EDFA murni.

Jumlah penguat dan pengulang dari SEA-ME-WE 3 dan 4 yang diperoleh dari perhitungan diatas hanya merupakan suatu perkiraan yang didasarkan oleh banyak asumsi:

- Karakteristik kedua penguat yang dipakai dalam perhitungan masih dalam skala penelitian, bukan terapan.
- Digunakan kombinasi terbaik dari setiap plot grafik, padahal yang sebenarnya digunakan tidak diketahui.
- Diasumsikan SKKL dibentangkan lurus, sedangkan pada terapannya kedua SKKL ini bercabang-cabang sehingga konfigurasi penguat dan pengulang pun harus disesuaikan.
- Tahun data diambil dan tahun pembentangan SKKL terpaut beberapa tahun sehingga tingkat teknologinya juga pastinya berbeda.

Maka dari itu, perhitungan pada skripsi ini tidak memiliki cukup dasar untuk diklaim sebagai hasil hitungan yang mendekati nilai sebenarnya. Namun perhitungan jumlah pengulang dan penguat yang diperlukan sudah dilakukan dengan proses yang benar.

Dari subbab efektifitas penguat ini, dapat disusun kembali tabel perbandingan SEA-ME-WE 3 dan 4:

Tabel 4.6.1: SEA-ME-WE 3 vs 4 dari Segi Penguat

Aspek	SEA-ME-WE 3	SEA-ME-WE 4
Penguat	EDFA	Hybrid Raman/EDFA
Prediksi Jumlah Penguat	775	168
Prediksi Jumlah Pengulang	5	2
Rasio Penguat: Pengulang	155	84
Pengulang Ekuivalen	5	5
Penguat Ekuivalen	775	332

4.7. KESTABILAN SISTEM

Subbab ini akan mengupas segala gangguan terhadap SEA-ME-WE 3 dan 4 dalam kaitannya dengan analisis awal yang dibentuk pada subbab 3.3. Walaupun gangguan menjadi topik utama dari subbab ini, implikasi dari topik ini meluas dari ketahanan sampai ke vitalnya SEA-ME-WE 3 dan 4 sebagai jalur telekomunikasi.

SEA-ME-WE 3 mengalami tercatat mengalami 3 gangguan serius yakni:

- Pada Juli 2005, bagian kabel yang terletak 35 km selatan dari Karachi mengalami kerusakan, memutus hampir seluruh sambungan internet Pakistan dengan dunia luar, dan dirasakan oleh sekitar 10 juta pengguna internet.
- Gempa bumi Hengchun 2006 di Taiwan memutus 7 dari 9 jaringan SKKL yang melaluinya, salah satunya adalah SEA-ME-WE 3.
- Terputusnya kabel pada 19 Desember 2008 bersama SEA-ME-WE 3 dan FLAG Telecom di kawasan Laut Mediterania.

Adapun SEA-ME-WE 4 juga pernah mengalami beberapa gangguan serius yakni:

- 30 Januari 2008, pukul 04.30 UTC, pada segmen 4 antara Alexandria-Marseilles, berjarak 25 km dari Alexandria, Mesir.
- 4 Februari 2008, jam tidak diketahui, terjadi lagi kerusakan di dekat Penang, Malaysia.
- 19 Desember 2008, bersama SEA-ME-WE 3.

Dari total 6 gangguan diatas (5 bila gangguan 19 Desember 2008 dihitung satu), semuanya menimbulkan dampak serius bagi jalur internet. Satu-satunya yang kurang serius hanyalah kerusakan dekat Karachi pada Juli 2005 karena praktis hanya Pakistan yang mengalami dampaknya.

Pada akhir Desember 2006, terjadi gempa Hengchun berkekuatan sekitar 7 skala Richter tepatnya pada kawasan selat Luzon. Berikut adalah peta pusat gempa Taiwan pada Desember 2006:



Gambar 4.7.1. Gempa Hengchun Taiwan 2006^[16]

Gempa tersebut menyebabkan kerusakan serius pada mayoritas kabel serat optik bawah laut yang melewati daerah tersebut, SEA-ME-WE 3 salah satunya. Beberapa negara yang mengalami gangguan internet:

- Cina
- Korea Selatan
- Taiwan
- India
- Indonesia
- Vietnam
- Malaysia
- Hong Kong
- Filipina
- Jepang
- Thailand
- Singapura
- Bangladesh
- Pakistan

Gangguan pada 30 Januari 2008 mengakibatkan gangguan internet 70% di Mesir dan 60% di India, serta juga negara-negara berikut:

- Afganistan
- Bahrain
- Bangladesh
- Kuwait
- Maldives
- Pakistan
- Qatar
- Arab Saudi
- Uni Emirat Arab
- Lebanon
- Sudan
- Iran

dengan peta titik gangguan sebagai berikut:



Gambar 4.7.2. Peta Kerusakan SKKL – Awal 2008^[17]

Berikut adalah peta kawasan yang terkena efek gangguan 19 Desember 2008:



Gambar 4.7.3. Peta Kawasan Terimbas Gangguan Desember 2008^[18]

Dengan rincian negara yang terkena gangguan serius:

- Arab Saudi
- Djibouti
- Mesir
- Uni Emirat Arab
- India
- Lebanon
- Malaysia
- Maldives
- Pakistan
- Qatar
- Syria
- Taiwan
- Yemen
- Zambia

Disaat penyebab gangguan pada SEA-ME-WE 3 tahun 2006 sudah jelas, sampai sekarang masih belum ada penyebab pasti yang dapat disimpulkan dari gangguan pada awal dan akhir 2008. Penyebab gangguan pada 2008 masih menjadi bahan perdebatan, ada yang menyebutkan gempa bawah laut, ada pula karena jangkar kapal, sampai teori konspirasi atau sabotase. Berdasar perkembangan kasus ini, kita dapat mengklasifikasikan penyebab gangguan pada 2008 kedalam ‘faktor tak diketahui’.

Menurut Stephen Beckert, seorang analis senior di TeleGeography, sebetulnya gangguan pada kabel, termasuk putusnya kabel terjadi kapan saja. Menurutnya, kira-kira ada kabel yang putus setiap 3 hari, sampai ada sekitar 25 kapal yang khusus ditugaskan untuk menangani hal seperti ini. Kerusakan minor seperti sayatan dan goresan dengan batu-batu di dasar lautan menjadi masalah sehari-hari yang dihadapi.

Dalam kaitannya dengan analisis awal pada subbab 3.3, didapatkan bahwa pada kenyataannya, walaupun mungkin gangguan akibat perikanan dan jangkar kapal sering terjadi untuk SEA-ME-WE 3 dan 4, kedua faktor paling dominan tersebut ternyata bukan merupakan ancaman yang berbahaya terhadap sistem. Gempa bumi bawah laut, apalagi yang pusatnya berdekatan dengan bentangan kabel menjadi ancaman yang sangat berbahaya bagi sistem kabel laut. Data mengenai gangguan kecil untuk SEA-ME-WE 3 dan 4 tidak dipublikasikan ke publik, dan sejauh ini tak ada laporan media massa mengenai gangguan-gangguan tersebut. Dengan kata lain, dapat diperkirakan bahwa gangguan tersebut, seperti pendapat Stephen Beckert, merupakan gangguan sehari-hari yang tidak signifikan bagi performa sistem komunikasi kabel laut.

Dari 3 gangguan besar diatas, kita dapat menarik suatu benang merah bahwa kerusakan SEA-ME-WE 3 dan 4 pada kawasan Timur Tengah berakibat fatal bagi sambungan internet di kawasan tersebut. Walaupun tidak gangguan tidak sampai 100%, penurunan drastis pada kapasitas internet dapat sangat mengganggu, menghambat, bahkan mencegah aktivitas vital seperti perbankan, perkantoran, bursa saham, transaksi bisnis, maskapai penerbangan, dan lain sebagainya. Pemerintah beberapa negara yang terkena dampak parah meminta warganya untuk

memprioritaskan kapasitas internet untuk pihak-pihak yang memerlukannya untuk kegiatan yang lebih penting.

Khusus untuk gangguan pada SKKL SEA-ME-WE 3 dan 4, hal tersebut menjadi serius, karena seperti analisis pada subbab 3.3, sedikitnya jumlah sistem komunikasi kabel laut di wilayah Timur Tengah menjadikan SEA-ME-WE 3 dan 4 sebagai satu-satunya rute utama yang paling banyak digunakan. Saat salah satu atau kedua SKKL ini mengalami gangguan, sambungan internet di kawasan ini akan sangat terpengaruh sehingga menjadi berita besar yang terdengar ke seluruh dunia.

Di sisi lain, putusnya kabel sering terjadi juga di kawasan Samudra Atlantik, namun karena banyaknya SKKL yang dibentangkan disana, jalur internet yang terputus akan segera dirutekan ulang melalui SKKL lain sehingga gangguan menjadi nyaris tak terasa di sisi pengguna. Sementara itu, kapal akan diberangkatkan untuk memperbaiki kerusakan tanpa menjadi berita besar yang ramai diberitakan media.

Berbicara mengenai kinerja, studi gangguan SEA-ME-WE 3 dan 4 ini mengindikasikan bahwa kedua SKKL ini memiliki performa yang memuaskan sehingga dipercaya dan diandalkan menjadi *backbone* utama di kawasan Timur Tengah. Untuk SEA-ME-WE 3 yang sudah beroperasi 8,5 tahun dan SEA-ME-WE 4 yang 3,5 tahun, 3 gangguan serius adalah angka yang wajar. Dari sisi kerentanan, sebetulnya kedua SKKL ini juga tidak dapat dikatakan rentan terhadap gangguan, karena seperti yang disebutkan diatas, gangguan pada serat optik bawah laut oleh faktor apapun adalah hal yang biasa.

Masalah kestabilan sebetulnya lebih terletak pada banyaknya SKKL yang dibentangkan, daripada seberapa besar kapasitas yang dapat dipenuhi SKKL yang sudah ada. Hendaknya para perencana SKKL dapat mengambil pelajaran dari beberapa gangguan serius yang terjadi dalam hitungan 3 tahun dengan mendirikan lebih banyak proyek SKKL baru daripada hanya meningkatkan kapasitas dari SKKL yang sudah ada (yang dari penjelasan-penjelasan sebelumnya, dapat dilakukan hanya dengan mengubah-ubah peralatan terminal di darat). Dengan

demikian, bila satu atau beberapa SKKL mengalami gangguan serius, diharapkan rute internet dapat dialihkan SKKL lain yang masih berfungsi dan tidak sampai mengganggu aktivitas sehari-hari yang vital.

Dari subbab analisis kestabilan SEA-ME-WE 3 dan 4 ini dapat disusun tabel:

Tabel 4.7.1: SEA-ME-WE 3 vs 4 dari Segi Kestabilan

Aspek	SEA-ME-WE 3	SEA-ME-WE 4
# Gangguan Serius	3	3
Tahun Gangguan Serius	2005, 2006, 2008	2008
Rata-rata per Tahun	0,33	0.6
Jumlah Negara Terbanyak yang Terimbas*	14 (2006 dan 2008)	14 (Desember 2008)

* = dampak gabungan dari kerusakan serempak beberapa SKKL

4.8. PERBANDINGAN KESELURUHAN

Setelah melewati rangkaian analisis perbandingan maupun kinerja dari segala segi, dapat disusun suatu tabel yang menyimpulkan secara keseluruhan:

Tabel 4.8.1: SEA-ME-WE 3 vs 4

Aspek	SEA-ME-WE 3	SEA-ME-WE 4
Benua	4	3
Negara	33	15
<i>Landing Points</i>	39	17
Perusahaan	92	16
Bentangan	39.000 km	18.800 km
Tahun <i>Upgrade</i>	2003, 2006, 2007	2007, 2009
Nilai Investasi	1500 juta dollar AS	500 juta dollar AS
Protokol Multipleks	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>	
Modul SDH	STM-16	STM-64
Ekivalensi SONET	OC-48	OC-192

Kapasitas Modul	2.405.376 Kbps	9.621.504 Kbps
<i>Upgrade</i>	STM-64	tetap
Teknologi Multipleks	WDM kemudian DWDM	DWDM
λ Sekarang	48	64
Rasio λ	3	4
Penguat	EDFA	Hybrid Raman/EDFA
Prediksi Jumlah Penguat	775	168
Prediksi Jumlah Pengulang	5	2
Rasio Penguat: Pengulang	155	84
# Gangguan Serius	3	3
Tahun Gangguan Serius	2005, 2006, 2008	2008
Rata-rata per Tahun	0,33	0.6
Jumlah Negara Terbanyak yang Terimbas*	14 (2006 dan 2008)	14 (Desember 2008)

* = dampak gabungan dari kerusakan serempak beberapa SKKL

BAB 5

PENUTUP

5.1. KESIMPULAN

- Biaya peningkatan kapasitas SKKL dapat ditekan dengan mengkombinasikan peralatan yang sudah ada dengan yang akan ditambahkan, namun pada penerapannya lebih banyak digunakan pemampatan panjang gelombang.
- Penentuan jumlah pengulang dan penguat paling ekonomis tidak semata-mata dapat dilakukan dengan mengambil L_{\max} terjauh, perlu adanya plot grafik #pengulang vs. #penguat hasil perhitungan dan pembulatan setelah memasukkan panjang SKKL yang ingin dianalisis.
- Sebagai *backbone* utama kawasan Timur Tengah, SEA-ME-WE 3 dan 4 cukup terlindung terhadap gangguan dengan jumlah kerusakan serius yang relatif sedikit yakni masing-masing 0,33 dan 0,6 kerusakan per tahun.
- SKKL di kawasan Mediterania perlu dibantu dengan pembentangan SKKL baru untuk mencegah krisis gangguan internet pada awal dan akhir 2008 terulang kembali.

5.2. HARAPAN

- Perusahaan telekomunikasi Indonesia dapat berpartisipasi lebih aktif dalam pembentangan SKKL baru untuk meningkatkan kualitas sambungan internet di Indonesia.
- Perencana jaringan SKKL di kawasan Asia Selatan-Timur Tengah tergerak untuk membentangkan lebih banyak SKKL baru agar sambungan internet di kawasan tersebut dapat mendekati kestabilan yang dimiliki kawasan Pasifik dan Atlantik.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Gumaste, Ashwin, dkk. 2003. *DWDM Network Designs and Engineering Solutions*. Cisco Press.
- [2] Varallyay, Zoltan, dkk. 2003. *Broadband Raman amplifiers in modern telecommunication systems*. Departement of Atomic Physics, Budapest University Technology and Economics.
- [3] Carena, Curri, dan Poggiolini. 2001. *On the Optimization of Hybrid Raman/Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. IEEE Photonics Technology Letters, Vol 13 No. 11.
- [4] Sunardi, Astatine, dkk. 2008. *Sistem Kabel Laut SEA-ME-WE*. Departemen Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [5] *Introduction to Optical Transmission in a Communications Network*. Tutorial oleh <http://www.iec.org/online/tutorials/>
- [6] *Submarine Communications Cable*. Artikel oleh web Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Submarine_communications_cable
- [7] Sunomo. 1999. *Synchronous Digital Hierarchy*. No 11, Tahun V. www.elektroindonesia.com
- [8] *Synchronous Digital Hierarchy (SDH)*. Artikel oleh web Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_Digital_Hierarchy
- [9] *Introducing DWDM*. Tutorial oleh <http://www.cisco.com>
- [10] Kordahi, Maurice E, dkk. *Worldwide Trends in Submarine Cable Faults*. Submarine Cable Improvement Group. <http://www.scig.net/>
- [11] *The Internet's Undersea World*. Peta oleh <http://www.wordpress.com>

- [12] *SEA-ME-WE 3 – Rute dan Landing Points*. Artikel oleh web Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/South_East_Asia-Middle_East-Western_Europe_3
- [13] *SEA-ME-WE 4 – Rute dan Landing Points*. Artikel oleh web Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/South_East_Asia-Middle_East-Western_Europe_4
- [14] *SDH/SONET vs. PDH rates*. Gambar dari www.pulsewan.com
- [15] Connely, Julie. *WDM vs. DWDM*. Microsoft Power Point Slide 39 of 63
<http://www.compapp.dcu.ie>
- [16] *Asian quake disrupts internet and e-mail networks*. Berita dari www.amchamvietnam.com
- [17] *2008 Submarine Cable Disruption*. Artikel oleh web Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/2008_submarine_cable_disruption
- [18] *Déjà vu All Over Again: Cable Cuts in Mediterranean*. Artikel pada blog renesys. <http://www.renesys.com>

LAMPIRAN

POWER POINT PRESENTATION SLIDES

+

LEMBARAN TATAP MUKA