

# APLIKASI PENGUATAN RAMAN TERDISTRIBUSI PADA SISTEM KOMUNIKASI OPTIS

**Wismalaili**

Program Studi Teknik Elektro Universitas Wangsa Manggala Yogyakarta  
Jln. Wates KM 9, Yogyakarta  
e-mail: wismalaili@yahoo.com

## Abstrak

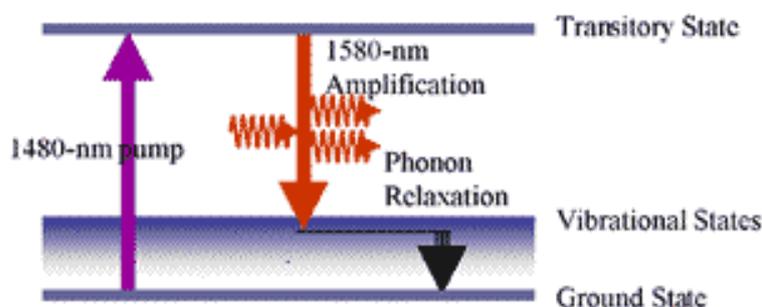
Penguat Raman Terdistribusi (*Distributed Raman Amplifier, DRA*) telah diterapkan pada sistem transmisi serat optis jarak jauh atau *ultra long-haul*, sehingga menjadikan penguat ini merupakan perangkat optis nonlinier yang sangat komersial dalam sistem telekomunikasi. *DRA* mampu meningkatkan *noise figure*, peletakan jarak antar penguat yang jauh, *bit rate* tinggi, jarak kanal lebih dekat dan beroperasi pada panjang gelombang dengan dispersi nol. *DRA* digunakan untuk meningkatkan kapasitas jaringan serat optis. Penguat hybrid/erbium-doped fiber merupakan teknologi penguatan yang menjanjikan untuk sistem broadband dan memaksimalkan kualitas jaringan untuk pengembangan di masa depan.

**Kata Kunci:** *Distributed Raman Amplifier, Hybrid/erbium-doped, noise figure, penguat Raman.*

## 1. PENDAHULUAN

Penguatan Raman didasarkan pada *Stimulated Raman Scattering (SRS)*, efek ketidaklinieran pada transmisi serat optis yang menghasilkan penguatan sinyal jika gelombang pompa optis yang mempunyai panjang gelombang dan daya tertentu ditransmisikan melalui serat.

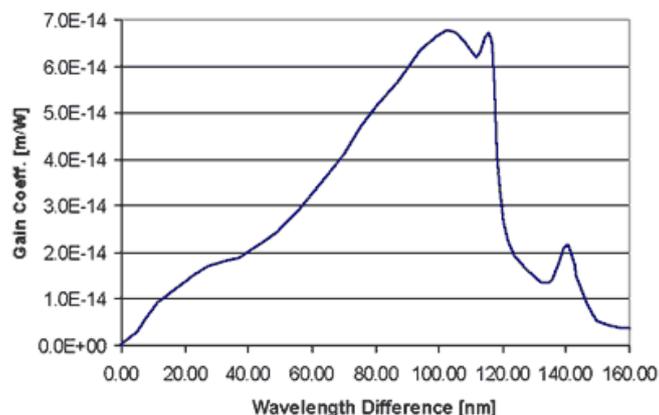
Penguat Raman menggunakan bahan instrinsik serat silika untuk penguatan sinyal. Hal ini berarti bahwa transmisi serat dapat digunakan sebagai media penguatan dan atenuasi instrinsik sinyal yang ditransmisikan melalui serat dapat dilawan dalam serat itu sendiri. Penguat bekerja dengan menggunakan prinsip dasar apa yang disebut *Distributed Raman Amplifier (DRA)* yang pada dasarnya merupakan *SRS*. Penguatan terjadi jika gelombang pompa cukup besar dipancarkan kembali pada panjang gelombang yang lebih kecil dari sinyal yang akan dikuatkan. *Gain* Raman bergantung pada daya pompa dan frekuensi *offset* antar sinyal dan pompa. Penguatan terjadi pada saat photon pompa menggunakan energinya untuk membentuk photon baru pada panjang gelombang sinyal ditambah residu energi yang diserap sebagai phonon seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Keadaan Energi Selama SRS.

Pada daerah yang diarsir (pada Gambar 1) terlihat bahwa keadaan vibrasional mempunyai lebarbidang yang lebar diatas keadaan *ground state*. Secara umum, *gain* Raman meningkat secara linier terhadap panjang gelombang *offset* antara sinyal dan pompa dengan

puncaknya pada kira-kira 100 nm dan kemudian turun dengan cepat jika *offset* terus dinaikkan. Gambar 2 menunjukkan kurva pengukuran *gain* Raman.



Gambar 2. Kurva *gain* Raman terhadap panjang gelombang.

Posisi lebarbidang *gain* pada kawasan panjang gelombang dapat diatur secara sederhana dengan pengaturan panjang gelombang pompa. Penguatan Raman dapat ditingkatkan pada setiap daerah transmisi serat optis. Hal ini hanya bergantung pada ketersediaan daya sumber pompa pada panjang gelombang yang dibutuhkan. Kerugian penguatan Raman adalah membutuhkan daya pompa yang besar untuk memberikan *gain* yang diinginkan.

Metode penguatan Raman memberikan alternatif cara penguatan sinyal baru untuk mengurangi atenuasi serat sehingga mengurangi kebutuhan perangkat EDFA. Gelombang pompa Raman dapat diletakkan pada lokasi EDFA. Hal ini tentu saja mengurangi biaya karena lebih sedikit dibutuhkan perangkat EDFA. Aplikasi lainnya adalah dengan menggunakan *hybrid* EDFA/penguat Raman yang dapat mengurangi ketidakrataan *gain* EDFA dengan *gain* Raman yang lebih fleksibel.

Selain itu, efek Raman-nya sendiri dapat digunakan untuk penguatan sinyal pada jalur transmisi yang tidak dapat dilakukan dengan menggunakan EDFA. Beberapa daerah frekuensi sinyal *wideband* WDM dapat dikuatkan oleh EDFA, sementara yang lainnya dikuatkan dengan menggunakan efek Raman.

## 2. PERBANDINGAN ANTARA PENGUATAN EDFA DAN PENGUATAN RAMAN

Penguatan Raman memberikan beberapa keuntungan dibandingkan dengan penguatan EDFA, yaitu:

- a. Derau rendah
- b. Perancangan dapat dilakukan dengan lebih simpel, penguatan sinyal langsung dilakukan di dalam serat optis dan tidak membutuhkan media transmisi khusus.
- c. Penjataan frekuensi yang fleksibel, *gain* Raman bergantung pada panjang gelombang pompa dan tidak bergantung pada parameter media peka-panjang gelombang, sebagaimana yang terjadi pada emisi permukaan dopan pada *erbium-doped* (EDF).
- d. Meningkatkan lebarbidang *gain* dengan menggabungkan efek penguatan Raman banyak gelombang pompa yang ditempatkan pada kawasan panjang gelombang.

Namun, penguatan Raman juga punya kelemahan, antara lain, pada penguatan Raman tidak hanya memancarkan gelombang pompa tetapi juga beberapa kanal WDM akan menguatkan kanal lainnya. Hal ini akan mengakibatkan pertukaran daya antar kanal WDM dan memperbesar cakap-silang (*cross-talk*) sehingga akan menurunkan kualitas sinyal.

Efek negatif ini terjadi pada transmisi WDM *unidirectional* maupun WDM *bidirectional*. Sehingga untuk ketepatan analisis pengembangan sistem WDM, perlu dilakukan pemodelan

semua interaksi Raman. Selain itu juga perlu dipertimbangkan efek hamburan Raman spontan dan *backward rayleigh scattering* (hamburan *rayleigh* mundur).

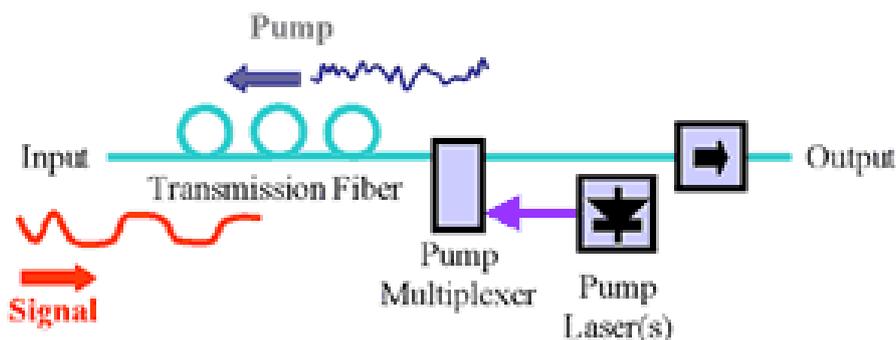
Table 1 menunjukkan karakteristik penguat Raman dan EDF. Umumnya untuk mendapatkan keuntungan optimal ditempuh cara dengan menggabungkan kedua teknik penguatan Raman dan EDFA.

Tabel 1. Perbandingan karakteristik penguatan Raman dan EDFA

Karakteristik	Penguat Doped-Fiber	Penguat Raman
Bidang penguatan	Bergantung dopan	Bergantung pada ketersediaan panjang gelombang pompa
Lebarbidang penguatan	20 nm, > 20 nm untuk banyak dopan/serat	48 nm, >48 nm untuk banyak gelombang pompa
Gain	20 dB atau lebih, bergantung pada konsentrasi ion, panjang serat dan konfigurasi pompa	4 – 11 dB, sebanding dengan intensitas pompa dan panjang serat efektif
Daya jenuh	Bergantung pada <i>gain</i> dan konstanta material	Sama dengan daya gelombang pompa
Panjang gelombang pompa	980 nm atau 1480 nm untuk EDFA	100 nm, lebih rendah dari panjang gelombang sinyal pada <i>gain</i> puncak

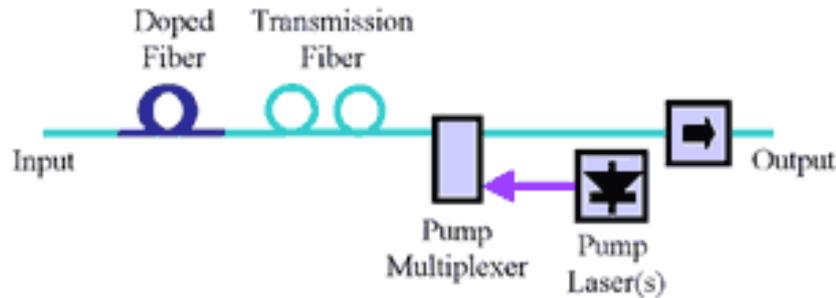
Perancangan penguat Raman lebih sederhana daripada perancangan menggunakan penguatan EDFA, seperti misalnya serat transmisi yang ada dapat digunakan sebagai media jika dipompa dengan tepat. Pemilihan daya dan panjang gelombang dapat dilakukan dengan mudah seperti pemisahan pompa dan jumlah pompa akan sangat menentukan sifat panjang gelombang *gain* Raman dan serat.

Pada saat pemasangan DRA, umumnya digunakan pemompaan mundur (*backward pumping*) karena memberikan beberapa keuntungan. Derau pompa mengakibatkan sinyal WDM akan ikut dikuatkan jika digunakan pemompaan maju (*forward pumping*). Jika gelombang pompa Raman mempunyai daya acak yang berfluktuasi secara perlahan, maka satu persatu bit secara keseluruhan akan dikuatkan, sehingga mengakibatkan fluktuasi amplitudo atau *jitter*. Jika digunakan pemompaan mundur (*backward pumping*), fluktuasi daya pompa Raman akan seimbang. Gambar 3 menunjukkan set up DRA yang dipompa mundur dan *counter-propagating* sinyal dan pompa.



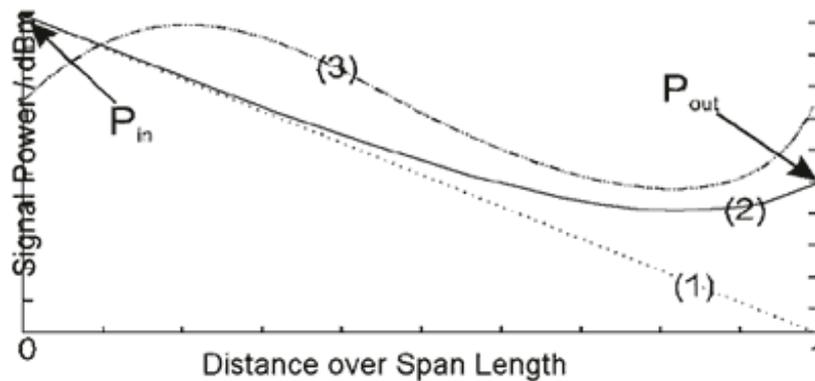
Gambar 3. *Counter-propagasi* gelombang pompa dan Sinyal pada penguat raman terpompa Mundur

Penguatan *hybrid* (EDF dan Raman) saat ini digunakan secara bersama-sama untuk mendapatkan SNR Optis (OSNR) pada DWDM kapasitas tinggi atau untuk mengurangi kebutuhan jumlah penguat. Gambar 4 menunjukkan perancangan penguat *hybrid* EDF/Raman. *Doped-Fiber* dipompa melalui serat transmisi dimana penguatan Raman terjadi.



Gambar 4. Set up rancangan penguat Raman wideband

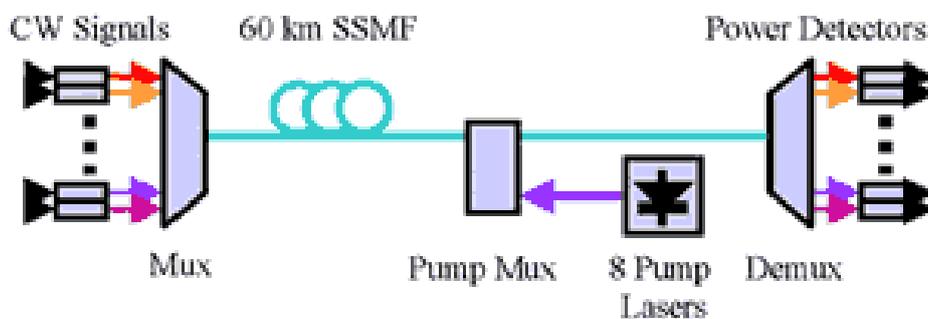
Distribusi daya transversal sinyal melalui jarak serat penguat (*amplified fiber span*) sangat bergantung pada skema penguatan yang diterapkan dan dapat dikontrol oleh daya pompa Raman dan arah pompa. Gambar 5 menunjukkan profil *transversal span power* yang menerapkan skema penguatan EDF/Raman berbeda.



Gambar 5. Profil *transversal span power* yang menerapkan skema penguatan EDF/Raman berbeda.

**3. PENGUATAN RAMAN DALAM TRANSMISI WIDEBAND WDM**

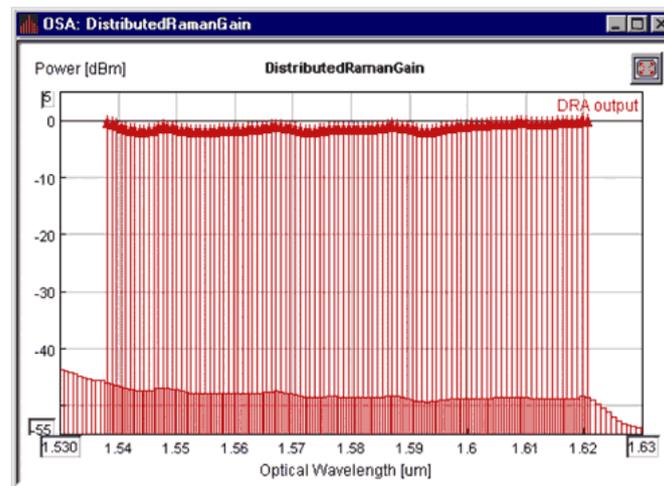
Berikut contoh perancangan DRA untuk transmisi *ultra wideband* WDM menggunakan banyak pompa untuk memacu *gain flatness* melalui sinyal dengan panjang gelombang 80 nm. Penguatan *flat* dengan lebarbidang sangat lebar dapat ditingkatkan dengan pemilihan daya pancar dan panjang gelombang emisi pompa Raman secara tepat. Gambar 6 menunjukkan set up rancangan.



Gambar 6. Set up rancangan penguat Raman Wideband

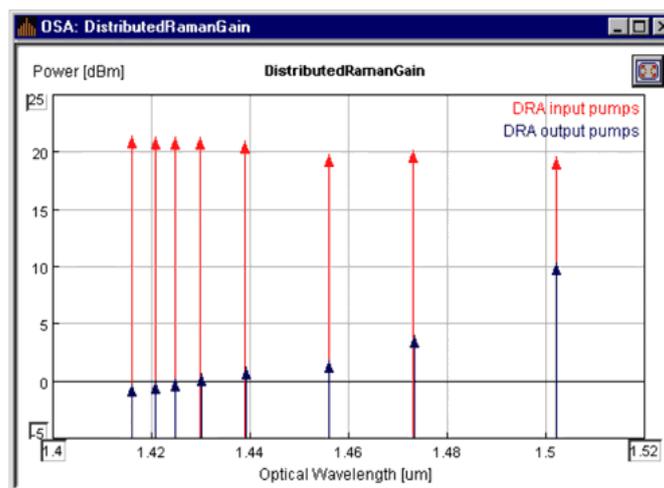
Pada 100 kali pengetesan *carrier* yang digunakan untuk mensample respon *gain* Raman melalui lebarbidang mendekati 82 nm. Masing-masing dipancarkan dengan rerata daya -3 dBm pada jarak 60 km SSMF. Akumulasi atenuasi serat dapat dikurangi dengan menggunakan efek SRS pada 8 pompa Raman *counter-propagating*.

Pada penerima, 100 detektor daya digunakan untuk mengevaluasi respon *gain* Raman pada keluaran serat. Gambar 7 menunjukkan spektrum optis pada penerima. *Ripple gain* kurang dari 2 dB pada 81 nm. Masih cukup margin daya untuk menggunakan tapis *gain-flattening* pada keluaran *span* fiber untuk meningkatkan *ripple gain* total kurang dari 0,5 dB.



Gambar 7. Spektrum keluaran optis setelah propagasi sepanjang 60 km SSMF dengan menerapkan penguatan Raman mundur menggunakan 8 pompa Raman

Rerata daya pancar pompa Raman hanya berubah antara 19,5 dBm sampai 21,5 dBm. Respon *flat gain* penguat dicapai dengan memilih frekuensi emisi pompa. Pompa Raman ditempatkan pada jarak sama sekitar 86 nm, dengan *offset band* sinyal WDM antara 77 nm sampai 163 nm, seperti terlihat pada Gambar 8. Perlu dicatat bahwa, 4 pompa yang memancarkan panjang gelombang terpendek ditempatkan pada jarak yang sama dan 4 lainnya ditempatkan dengan jarak yang lebih besar/jauh.

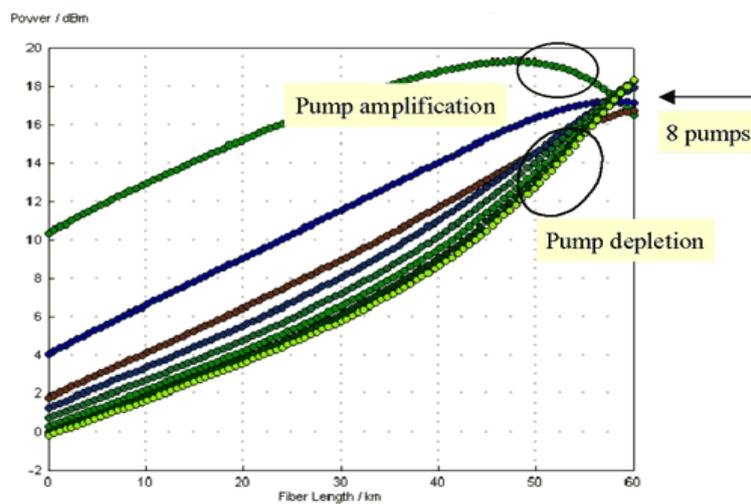


Gambar 8. Distribusi spektral 4 pompa Raman

Serat diberi masukan mundur (warna merah) dan serat diberi masukan maju (warna biru) Ada dua alasan penentuan jarak letak pompa ini, yaitu:

1. respon *gain* Raman sangat asimetris, hal ini meningkatkan *offset* antara sinyal dan pompa secara hampir linier yaitu < 100 nm dan kemudian menurun secara tiba-tiba setelah puncak *gain* tercapai (lihat Gambar 3).
2. interaksi antar pompa sangat kuat, seperti pompa Raman ditempatkan lebih dari 86 nm dimana efisiensi sangat besar. Pompa memancarkan pada panjang gelombang sangat rendah menguatkan *band* sinyal WDM.

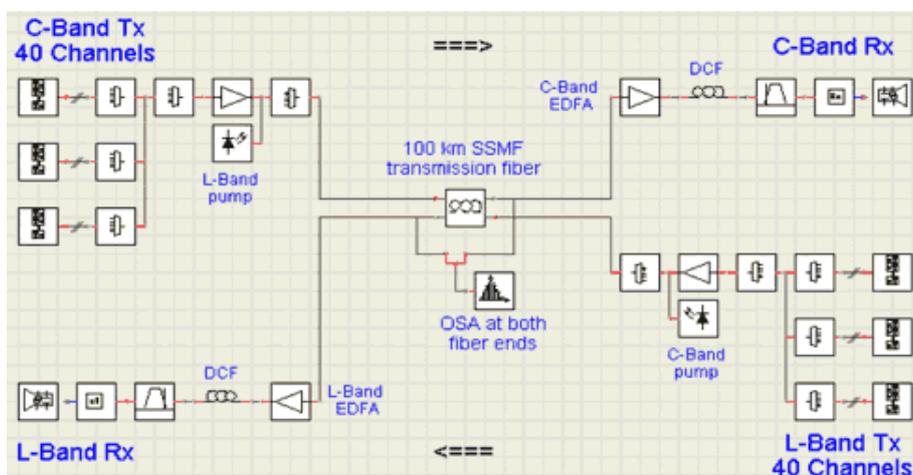
Gambar 9 menunjukkan profil daya pompa sepanjang serat, pompa pada panjang gelombang lebih tinggi pertama-tama dikuatkan oleh pompa dengan panjang gelombang-rendah dikurangi, yang mengakibatkan transfer energi ke panjang gelombang lebih tinggi dan atenuasi serat, akibatnya penguatan pompa ke pompa menjadi berkurang. Pada Gambar 9 menunjukkan interaksi gelombang pompa berbeda tidak diabaikan.



Gambar 9. Propagasi empat pompa Raman melalui serat

#### 4. PENGUATAN RAMAN UNTUK MEMBANGUN SISTEM WDM BIDIRECTIONAL

Contoh berikut mendemonstrasikan transmisi sinyal WDM *bidirectional* dan pemompaan Raman untuk mengurangi atenuasi sinyal pada transmisi serat.

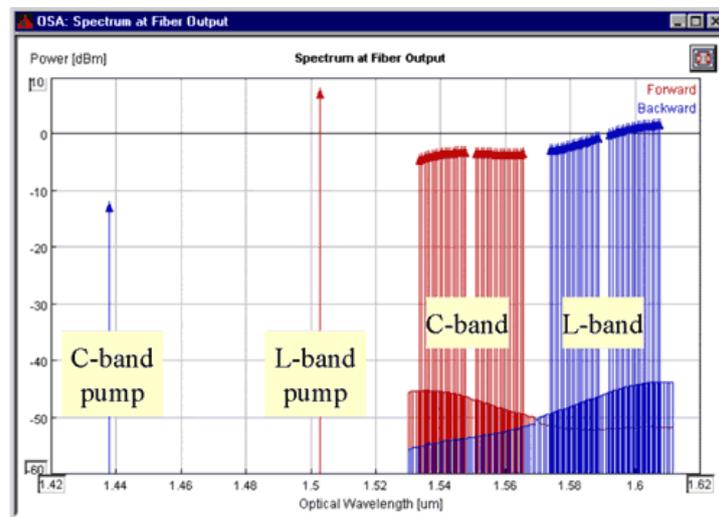


Gambar 10. Sistem DWDM *bidirectional*

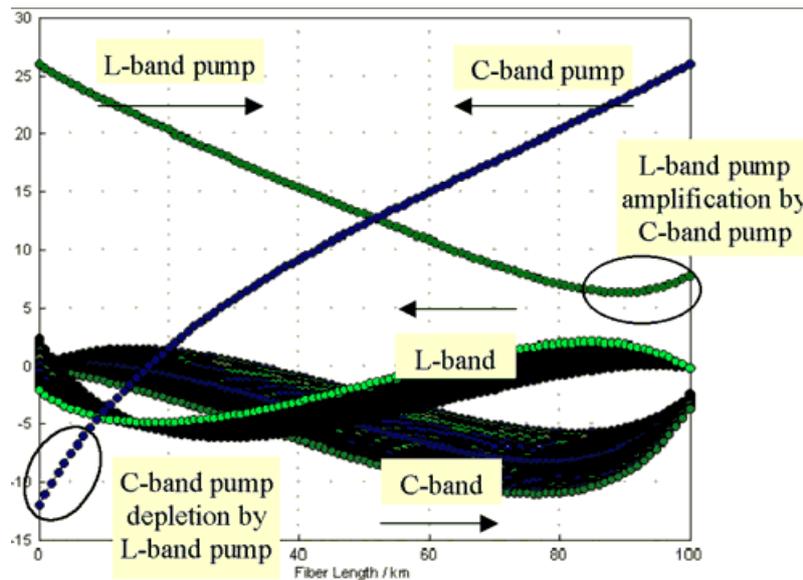
Pada konfigurasi sistem ini, *C-band* untuk transmisi pada satu arah dan *L-band* untuk transmisi arah sebaliknya. Atenuasi serat sebagian dapat dikompensasi oleh DRA. Penerapan skema pemompaan mundur untuk setiap *band* membutuhkan pompa *L-band* yang ditempatkan pada ujung serat yang sama sebagaimana pada pengirim *C-band* dan sebaliknya. Jadi jelas bahwa konfigurasi menerapkan pemompaan *bidirectional*.

Jika pemodelan sistem demikian, maka pertukaran daya *co* dan *counter-propagating* sinyal dan pompa (pompa ke pompa, pompa ke sinyal dan sinyal ke sinyal) dapat ditentukan secara akurat. Pemodelan akurat hanya mungkin jika semua interaksi *bidirectional* dimodelkan.

Spektra sinyal dan pompa ditunjukkan pada Gambar 11. Ketidakdataran spektrum sinyal berakibat pada perubahan *gain* Raman. Hal ini dapat diganti dengan tapis perataan *gain* yang diletakkan setelah EDFA.



Gambar 11. Spektrum keluaran transmisi serat



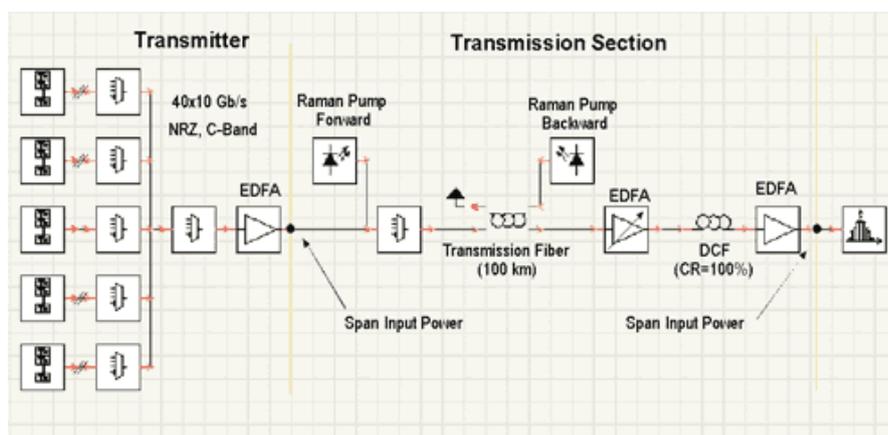
Gambar 12. Propagasi sinyal dan pompa C-band dan L-band

Gambar 12 menunjukkan propagasi sinyal dan pompa dua arah. Sinyal *L-band* dipancarkan pada arah mundur pada ujung serat ( $z = 100$  km) akan memberikan penguatan Raman yang cukup signifikan pada gelombang pompa *C-band* propagasi mundur, yang juga dipancarkan pada ujung serat. Pada sisi lain, sinyal *C-band* yang dipancarkan pada arah maju pada ujung serat lainnya ( $z = 0$  km) akan memberikan penguatan Raman pada panjang gelombang pompa *L-band* propagasi-maju. Penguatan sinyal oleh gelombang pompa lain dimungkinkan karena lebarbidang *gain* Raman. Selanjutnya, sinyal akan dikuatkan dua kali yaitu saat gelombang pompa berada disekitar titik pancar dan penguatan kedua terjadi oleh gelombang pompanya sendiri pada keluaran serat.

Contoh ini juga menunjukkan bahwa kehati-hatian pemodelan interaksi pompa ke pompa merupakan satu hal yang harus diperhatikan. Pada ujung serat, pompa *C-band* menguatkan pompa ujung serat *L-band*. Pengosongan pompa pada pompa *C-band* terjadi pada pangkal/ujung dekat serat.

## 5. PENGUATAN RAMAN DAN NONLINIERITAS SERAT

Contoh berikut merupakan studi kasus efek ketidaklinieran propagasi saat penentuan kondisi daya sinyal optimum. Perhatikan Gambar 13.



Gambar 13. Sistem WDM untuk mengoptimalkan *Span input power* menggunakan hybrid Raman/EDF dengan daya berbeda

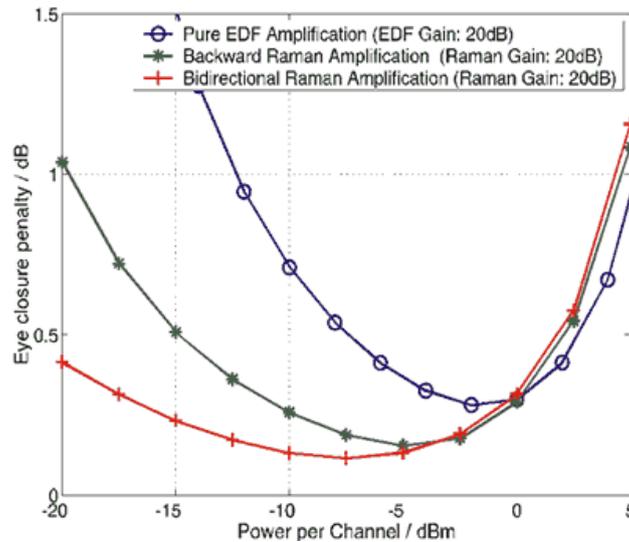
Keuntungan penguatan *hybrid* untuk sistem WDM 40 kanal. Kanal mengirimkan sinyal pada pesat data 10 Gbps dan ditempatkan pada jarak sama yaitu 50 GHz. Dispersi terjadi pada jarak 100 km DSF atau SSMF. Akumulasi atenuasi serat adalah sebesar 20 dB.

Perbandingan antara ketiga skenario penguatan yang diuraikan di atas yang terdiri atas:

- penguatan Raman mundur
- penguatan Raman *bidirectional*
- penguatan EDF murni (dengan *noise figure* 4 dB)

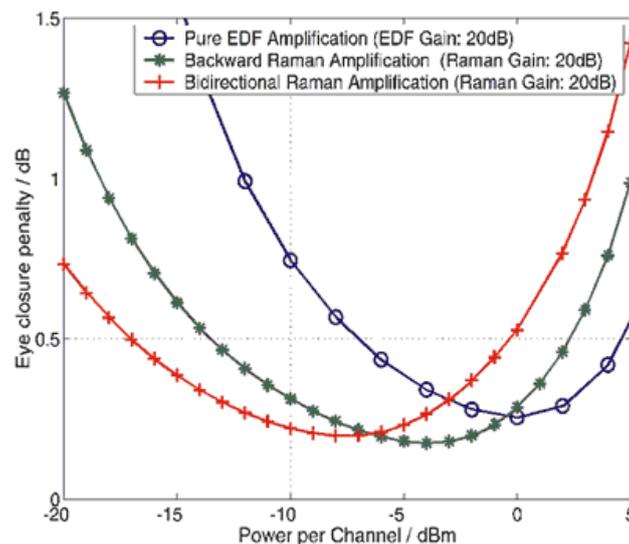
Profil daya untuk ketiga skenario penguatan di atas ditunjukkan pada Gambar 13. Untuk mengetahui dampak ketidaklinieran serat dan derau penguat, daya pancar kanal diubah-ubah antara -5 dBm dan 20 dBm. Eye-closure pada kanal sentral (1550 nm) diukur setelah penerima yang terdiri atas tapis *drop* optis, photodiode dan tapis *post detection*, sebelum dan setelah serat propagasi.

Gambar 14 menunjukkan *eye-closure penalty* terhadap daya kanal untuk 3 skenario penguatan di atas. Pada Gambar juga secara jelas diperlihatkan nilai maksimum daya kanal terhadap *eye-closure penalty*. Pada daya kanal rendah, unjukkerja dibatasi oleh derau penguat, sementara untuk daya kanal tinggi, unjukkerja dibatasi oleh ketidaklinieran serat, yang disebut *Cross Phase Modulation (XPM)* dan *four wave mixing (FWM)*. Pada kurva ditunjukkan juga bahwa, semua kurva meningkat dengan gradien yang hampir sama.



Gambar 14. *Eye-closure penalty* terhadap daya kanal untuk skema penguatan berbeda setelah propagasi menggunakan DSF

Sistem yang menggunakan penguatan Raman merupakan satu-satunya sistem yang dapat memberikan toleransi fluktuasi daya khususnya pada penguatan Raman *bidirectional*. Sebagai perbandingan, Gambar 15 menunjukkan *eye-closure penalty* terhadap daya kanal untuk ketiga skenario penguatan setelah propagasi menggunakan SMF standard. Selain itu, Gambar 15 juga menunjukkan daya kanal optimal terhadap *eye-closure penalty*. Sekarang terlihat jelas perbedaan sebagai akibat ketidaklinieran serat.



Gambar 15. *Eye-closure penalty* terhadap daya kanal untuk skema penguatan berbeda setelah propagasi menggunakan SMF

Pada kedua serat yang dipakai, daya pancar maksimum berbeda sampai lebih dari 7 dBm, bergantung pada skenario penguatan. Hal ini mempunyai dampak pada sistem WDM menggunakan banyak kanal, seperti lebih banyak jumlah kanal yang dapat dikuatkan pada daya pompa yang sama. Juga perbedaan nilai *eye-closure* minimum, yang menunjukkan bahwa perbedaan jarak transmisi total.

Sebagai hasil pada contoh studi kasus ini adalah bahwa efek ketidaklinieran propagasi dalam proses perancangan sistem merupakan hal yang penting pada saat penentuan daya pompa dan sinyal maksimum.

## 6. SIMPULAN

1. Penguatan Raman sangat membantu pada saat perancangan sistem komunikasi serat optis di masa depan yang membutuhkan kapasitas besar.
2. Dengan bantuan ketiga skenario penguatan yang diuraikan di atas, masalah yang sering muncul pada perancangan sistem telah dijelaskan dengan baik, yang menunjukkan bahwa kehati-hatian pemodelan pada semua efek propagasi fisik merupakan masalah yang krusial pada saat perancangan sistem.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.Carena , V. Curri, P. Poggiolini, **“On the optimaztion of hybrid Raman/erbium-doped fiber amplifiers, photonics Technology Letters”**, IEEE, Vol. 13, pages 1170 – 1172 (2001).
- [2] A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini, **“Comparison between different configurations of hybrid Raman/erbium-doped fiber amplifiers”**, Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, Volume:2, pages: TuA3-1 – TuA3-3, 2001.
- [3] C.R.S.Fludger, V.handerek, and R.J. Mears, **“Ultra-wide bandwith Raman Amplifier “**
- [4] J.Bromage, H.J.Thiele, and L.E.Nelson, **“Raman amplification in the S-band”**in Optical Fiber Communication Conf.Tech.Dig., paper, pp 383-385, 2002.
- [5] N. Islam Mohammed, **“Raman Amplifiers for Telecommunication”**, IEEE Journal of Quantum electronics, paper, pp.548-559, Vol.8, No.3, 2002.
- [6] S. Tenenbaum, V. Curri, **“Optimization of Hybrid Fiber Amplifiers on Dispersion managed Links”**, IEEE LEOS, 17th Annual Meeting, Puerto Rico, 2004.
- [7] T. Naito, T.Tanaka, K, K.Torii, N. Shimojoh, H. Nakamoto, and M.Suyana, **“A broadband distributed Raman amplifier for bandwith beyond 100 nm in Optical Fiber Communication”**, Conf. Technical Dig., paper TuR1, pp 116-119, 2002.
- [8] V.Curri,S.Tenenbaum, **“Simultaneous Optimization of hybrid Fiber Amplifier and Dispersion maps”**, OpneTec, Pisa, 2004.