

## PENGURANGAN CROSSTALK JARINGAN MULTI-CORE FIBER OPTIK

Riklan Kango<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah

Jl. Prof Mansoer Pateda, Pentadio Timur, Telaga Biru, Gorontalo

\*Email: riklan@umgo.ac.id

### Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah mengurangi *intercore crosstalk* jaringan *Multi-core Fiber*. Metode yang digunakan adalah *core allocation*, yaitu manajemen *core* dan manajemen *slot spectrum*. Metode ini menggunakan paralelisasi dua algoritma. Pertama, algoritma *core prioritization* didasarkan struktur *core MCF*. Kedua, algoritma *core classification* didasarkan *bandwidth koneksi* yang diperlukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini bekerja dengan baik dan efektif untuk mengurangi jumlah spektrum yang tumpang tindih sehingga menurunkan *intercore crosstalk MCF* sampai 18.75%. Disimpulkan bahwa metode yang diusulkan dapat mengurangi permasalahan *crosstalk* jaringan *MCF*.

**Kata kunci:** *allocation core, classificasi core, crosstalk, multi-core fiber, priority core*

### 1. PENDAHULUAN

Permintaan trafik dalam jaringan telekomunikasi terus meningkat pada masa akan depan, penelitian mengenai teknologi untuk mengatasi trafik yang berubah secara dinamis terus dilakukan dengan dengan mempelajari jaringan serat optik yang merupakan teknologi komunikasi berkecepatan tinggi (Achmad dkk., 2010) dan mempunyai kapasitas *bandwidth* transmisi yang besar (Dewiani et al., 2012). Suatu komunikasi yang menggunakan jaringan serat optik mempunyai *transfer data* dengan kecepatan sangat tinggi dibandingkan menggunakan kabel *twisted pair*, *inframerah*, dan radio komunikasi *nirkabel* (Condrad dan Howiit, 2016). Perkembangan yang ada dalam jaringan fiber optik dari segi kapasitas transmisi yang ada akan segera mencapai batas fisik maksimum (Hayashi et al., 2012). Dalam mewujudkan perluasan kemajuan lebih lanjut dari kapasitas fiber, *Space-Division Multiplexing* (SDM) telah secara intensif diteliti dalam beberapa tahun terakhir oleh (Fini et al., 2010; Tu et al., 2012). Jaringan serat optik *single-mode* dapat mengatasi kekurangan kapasitas transmisi, dimana menunjukkan kapasitas transmisi secara dramatis meningkat dibandingkan dengan jaringan transmisi konvensional (Igarashi et al., 2013). Namun, kapasitas transmisi per serat akan segera mencapai batas maksimum untuk fiber *single-mode* (Fujii et al., 2013a; Fujii et al., 2013b). *Multi-core Fiber* (MCF) merupakan serat optik berbasis teknologi SDM (Fujii et al., 2013b). MCF memiliki beberapa *core* dalam mentransmisikan sinyal sehingga data ditransmisikan secara paralel dengan mendistribusikan data ke beberapa *core* secara simultan (Fujii et al., 2013a) dan dapat mencapai kapasitas transmisi jauh lebih besar daripada serat optik *single-mode*. Pada saat ini, kapasitas transmisi jaringan MCF telah mencapai 1 Pbps (Fujii et al., 2013a). Namun, salah satu masalah penting yang ada MCF adalah *inter-core crosstalk* yaitu gangguan sinyal transmisi karena sinyal dari satu saluran tiba di saluran lain (Reza et al., 2013). Sinyal yang ditransmisikan pada beberapa *core* akan saling mengganggu menjadi *noise* di tempat lain sehingga akan terjadi *degradasi* sinyal yang memiliki dampak serius pada proses transmisi data dalam jaringan optik.

Penelitian tentang pengurangan *crosstalk* MCF telah dilakukan oleh Fujii et al (2013a) dan Fujii et al (2013b), berkaitan dengan manajemen *core* dan *slot spektrum*. Referensi Fujii et al (2013a), menggunakan algoritma *first-fit* dan algoritma *random* untuk mengevaluasi nilai *crosstalk* per slot. Penggunaan algoritma *first-fit* yaitu dengan mengisi spektrum tanpa celah dengan memanfaatkan *core* dan spektrum secara efektif dalam jaringan optik, karena karakteristik fragmentasi lebih sedikit. Sedangkan penggunaan algoritma *random* yaitu dengan mengisi *spectrum core* secara acak. Hasil referensi ini menunjukkan bahwa, algoritma *first-fit* menghasilkan *crosstalk* per slot yang lebih dibanding dengan algoritma *random*. Namun, penggunaan kedua algoritma tersebut cenderung berkonsentrasi menghasilkan *crosstalk* yang lebih di MCF. Oleh karena itu penting untuk menghindari *overlap* dalam spektrum *core* yang berdekatan dalam rangka

mengurangi *crosstalk*. Referensi Fujii et al (2013b), menggunakan algoritma *core classification* sebagai perbandingan terhadap algoritma *first-fit* dan algoritma *random*. Penggunaan algoritma *core classification* ini berdasarkan *bandwidth* yang dibutuhkan. Hasilnya menunjukkan bahwa terjadi penurunan *crosstalk* dengan menggunakan algoritma yang mereka usulkan. Namun pada jaringan optik ada beberapa koneksi yang membutuhkan *bandwidth* yang berbeda yang butuh penanganan berbeda. Hasil referensi ini juga menunjukkan metode yang mereka usulkan sebagian juga tergantung struktur atau jumlah *core* MCF. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, peneliti mengusulkan manajemen *bandwidth* jaringan yang disesuaikan dengan *core* MCF terlepas dari struktur atau jumlah *core*

Referensi Fujii et al (2013a) dan Fujii et al (2013b), menunjukkan bahwa efek *crosstalk* MCF tergantung pengaturan sinyal mengenai spektrum dan *core* serta diasumsikan bahwa sinyal dari frekuensi yang sama ditransmisikan secara simultan pada semua *core* dalam satu serat. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan pendekatan masalah *crosstalk* di MCF berkaitan dengan manajemen *core* dan slot frekuensi dari perspektif jaringan optik. Selanjutnya, peneliti mengusulkan metode manajemen *core* dan slot spektrum untuk meningkatkan efisiensi jaringan dengan dalam hal ini mengurangi *crosstalk* dan *fragmentasi* dalam jaringan MCF. Metode yang diusulkan didasarkan dua pemilihan algoritma terkait dengan *crosstalk* dan fragmentasi. Pertama, algoritma *core prioritization*, berdasarkan struktur MCF. Algoritma ini mengalokasikan *core* dengan menghindari mengisi *core* berdekatan untuk mengurangi *crosstalk*. Kedua adalah algoritma *core classification* berdasarkan *bandwidth* yang diperlukan saat koneksi. Algoritma ini mengurangi fragmentasi spektrum dengan mengalokasikan koneksi *bandwidth* yang seragam untuk masing-masing *core*.

Berdasarkan latar belakang permasalahan diatas, maka tujuan penelitian ini adalah melakukan simulasi dan pengujian kinerja dari algoritma *core prioritization* dan *core classification* untuk mengurangi *crosstalk* jaringan MCF.

## 2. METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Komputer, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Gorontalo. Data penelitian ini adalah data primer yang merupakan data hasil simulasi dari software bahasa pemrograman Microsoft Visual Basic 6.0 pada komputer dan data sekunder yang merupakan data studi literature berupa buku, jurnal ilmiah, thesis dan laporan penelitian yang terkait serta sumber lain yang dianggap menunjang dalam penelitian ini.

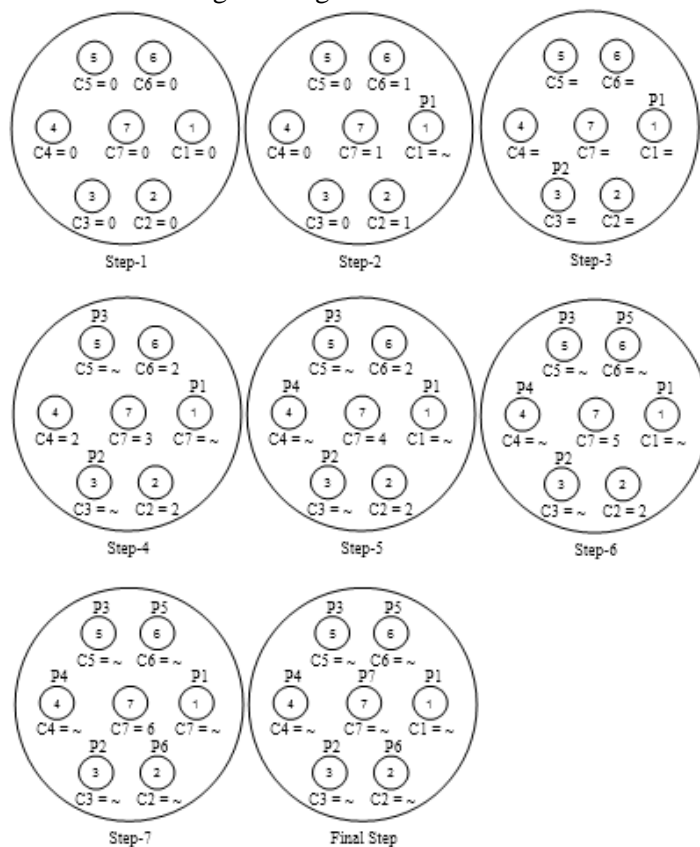
Dalam rancangan penelitian ini, penulis memilih struktur MCF dengan jumlah *core*-nya adalah 7 *core*. Sebuah koneksi dengan ilustrasi koneksi yang membutuhkan tiga jenis *bandwidth* (Blue, Green dan Red) yang masing-masing memiliki tiga, empat dan lima slot frekuensi dengan jumlah total slot spektrum frekuensi per *core* adalah  $W=320$ . Penelitian ini, mengasumsi lebar slot frekuensi 12,5 GHz sehingga total sumber daya slot spektrum per *core* adalah 4 THz (C-band). Permintaan koneksi jalur optik antara Tx-Rx, diasumsikan telah didirikan untuk permintaan koneksi dalam mengirimkan data. Setiap link memiliki satu MCF untuk setiap arah. Penulis hanya menduga bahwa semua link memiliki MCF tunggal. Dalam penelitian ini, permintaan koneksi memiliki waktu pelayanan konstan dan waktu antar Tx-Rx mengikuti distribusi eksponensial. Ketersediaan *core* MCF dan slot spektrum frekuensi telah tersedia untuk memenuhi algoritma yang diusulkan. Sehingga fokus penelitian ini adalah perutean sinyal *core* dengan cara mengalokasikan *core* serta slot frekuensi dalam mentransmisikan data *bandwidth* yang telah ditetapkan. Hasil dari simulasi akan diambil sebagai data yang diinginkan. Kemudian hasil data tersebut akan dianalisis nilai *crosstalk* per slot dalam jaringan MCF.

Sistem yang dibuat menerapkan dua algoritma yaitu solusi prioritas *core* menggunakan algoritma *core prioritization* dan solusi manajemen slot spektrum frekuensi menggunakan algoritma *core classification*. Selanjutnya sistem dievaluasi kinerja algoritma yang diterapkan.

Algoritma *core prioritization*, bertujuan mengurangi *crosstalk* dengan mengalokasikan *core* sesuai prioritas, hal ini untuk menghindari pengisian *core* yang berdekatan. Gambar 1 memberikan contoh penentuan prioritas *core* dalam 7-MCF.

Berikut ini step-by-step dalam penentuan *core* prioritas berdasarkan algoritma *core prioritization* untuk 7-MCF.

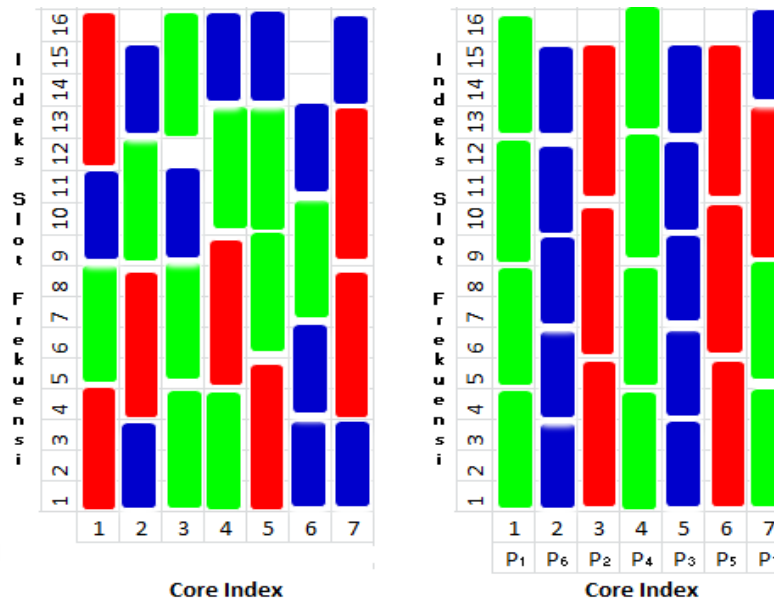
- Step 1:** Semua cost ( $C_i$ ) pada setiap core MCF diinisialisasi dengan zero=0.
- Step 2:** Pilih salah satu core MCF sebagai prioritas pertama. Dalam kasus ini core 1 dipilih sebagai core prioritas pertama, sehingga cost setiap core yang berdekatan dengan core 1 yaitu ( $C_2, C_6$  dan  $C_7$ ) akan bertambah.
- Step 3:** Core 3, 4, dan 5 memiliki cost terendah ( $C_3=C_4=C_5=0$ ), dan core 3 dan 5 adalah paling dekat dengan core 1, yang dipilih langkah sebelumnya. Dalam kasus ini core 3 dipilih sebagai core prioritas kedua.
- Step 4:** Core 5 memiliki cost terendah ( $C_5=0$ ), Core 5 paling dekat dengan core 3, yang dipilih langkah sebelumnya. Dalam kasus ini core 5 dipilih sebagai prioritas ketiga.
- Step 5:** Core 2, 4, dan 6 memiliki cost terendah ( $C_2=C_4=C_6=2$ ), dan core 4 dan 6 adalah paling dekat dengan core 5, yang dipilih langkah sebelumnya. Dalam kasus ini core 4 dipilih sebagai prioritas keempat.
- Step 6:** Langkah selanjutnya sampai langkah terakhir dari algoritma ini, semua core diprioritaskan sesuai langkah-langkah diatas.



**Gambar 1. Asumsi alokasi core 7-MCF algoritma core prioritization**

Algoritma *core classification* bertujuan untuk mengurangi fragmentasi spektrum dengan mengalokasikan koneksi *bandwidth* yang seragam untuk masing-masing core. Gambar 2 menunjukkan pemanfaatan spektrum dalam core jaringan 7-MCF. Gambar 2.a dan 2.b menunjukkan pemanfaatan spektrum tanpa *core classification* dan pemanfaatan spektrum dengan *core classification*. Penelitian ini, mengklasifikasikan core MCF per jumlah slot frekuensi yang diperlukan. Core yang diklasifikasikan didefinisikan sebagai koneksi yang membutuhkan *bandwidth* yang sama untuk dialokasikan. Gambar 2.b, core 1 dan 4 merupakan classified core untuk koneksi yang membutuhkan empat slot frekuensi, core 2 dan 5 untuk tiga slot frekuensi serta core core 3 dan 6 untuk lima slot frekuensi. Hal ini menunjukkan tidak ada fragmentasi spektrum pada classified core, karena core hanya memiliki satu jenis koneksi yang membutuhkan *bandwidth* sama. Namun, jika tidak ada *classified core* tersedia untuk *bandwidth* koneksi yang diperlukan, maka classified core untuk *bandwidth* yang berbeda akan menggunakan core 7 sebagai core

istimewa. Susunan klasifikasi Gambar 2.b ini didasarkan prioritas core pada Gambar 1. Dalam penelitian ini, diasumsikan koneksi membutuhkan tiga jenis *bandwidth* berbeda yang ilustrasikan dengan tiga slot frekuensi (*Blue*), empat slot frekuensi (*Green*) dan lima slot frekuensi (*Red*). Meskipun hanya tiga jenis *bandwidth* yang dibutuhkan oleh koneksi dalam contoh kasus ini, satu *core* dapat digunakan secara istimewa oleh dua atau lebih jenis koneksi *bandwidth* ketika jumlah koneksi *bandwidth* lebih dari jumlah *core* MCF.

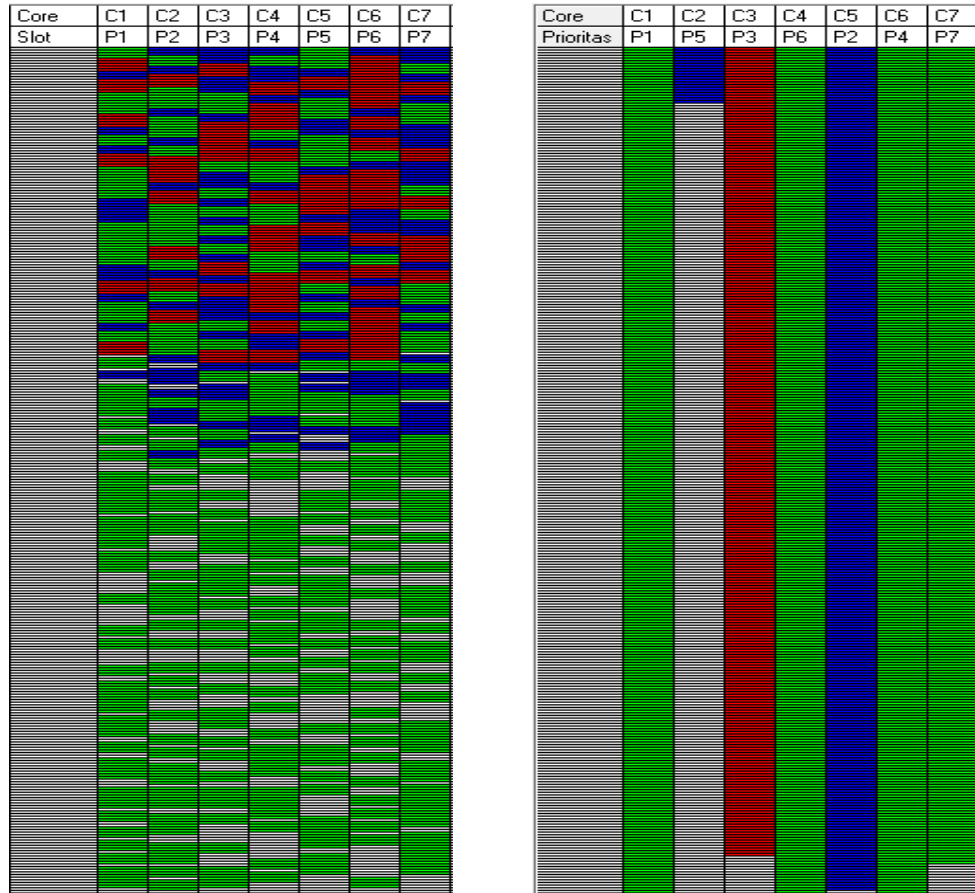


**Gambar 2. Asumsi Asumsi penggunaan slot spectrum frekuensi 7-MCF (a) No-classification (b) Classification**

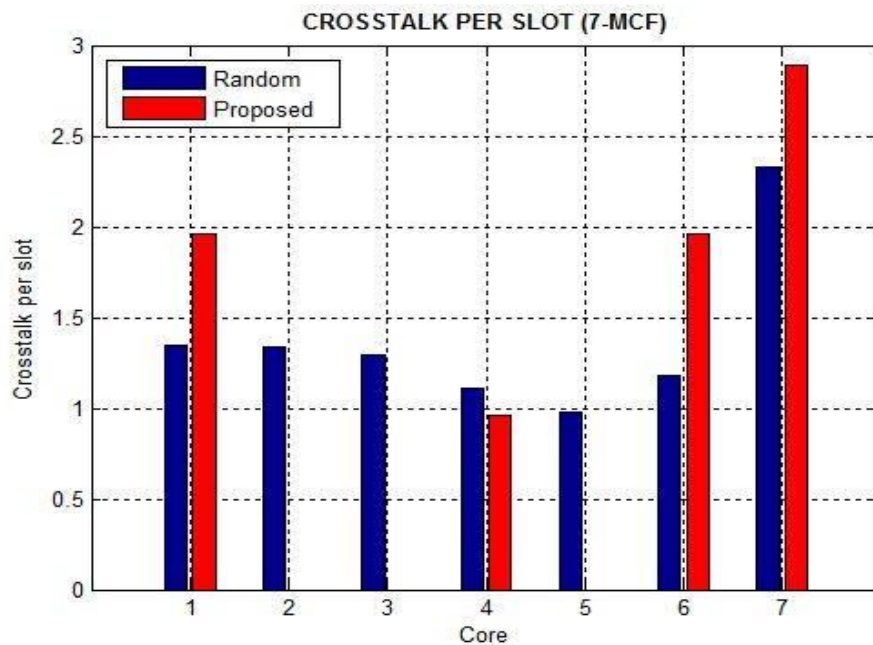
Pengumpulan data dilakukan dengan mengamati running time dari simulator Microsoft Visual Basic 6.0 yang megeksekusi algoritma *core prioritization* dan *core classification* secara paralelisasi sesuai dengan skenario dan metode yang diusulkan dalam penelitian ini. Metode yang diusulkan dievaluasi dalam dua cara yang berbeda. Pertama bernama “Proposed I” yang kedua bernama “Proposed II”. “Proposed I” adalah metode yang mengadopsi algoritma *core prioritization* dan algoritma *core classification*. “Proposed II” adalah metode yang mengadopsi algoritma *core prioritization* dan algoritma *core classification* berdasarkan prioritas koneksi. Kedua metode yang diusulkan tersebut akan dibandingkan dengan algoritma *random*. Algoritma *random* adalah algoritma sederhana yang mengalokasikan core dan slot spektrum frekuensi dengan berubah-ubah (*random*). Penulis menggunakan simulator Microsoft Visual Basic 6.0 pada komputer untuk simulasi dan mengevaluasi metode yang diusulkan. Data-data dari hasil simulasi akan digunakan untuk menganalisis kinerja dari algoritma *core prioritization* dan *core classification* untuk menurunkan *crosstalk per slot* jaringan multi-core fiber sesuai dengan metode yang telah diusulkan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dalam penelitian ini adalah analisis kinerja algoritma *core prioritization* dan *core classification* terhadap solusi pengurangan *crosstalk* jaringan multi-core fiber 7 core. Hasil simulasi dan perhitungan untuk masing-masing metode ditunjukkan Gambar 3 dan Gambar 5.



Gambar 3. Hasil simulasi alokasi slot spectrum frekuensi 7-MCF



Gambar 5. Crosstalk per slot 7-core MCF

Gambar 3 merupakan hasil simulasi penerapan algoritma pada Microsoft Visual Basic 6.0 untuk masing-masing metode yang dijalankan pada jaringan multi-core fiber 7-core. Gambar 3(a) menunjukkan hasil simulasi dari metode *random* “random” yang mengadopsi algoritma *random*.

Gambar 3(b) menunjukkan hasil simulasi dari metode “Proposed I” yang mengadopsi algoritma core prioritization dan *core classification*. Dari Gambar 3 dapat terlihat bahwa kedua metode “Proposed” yang diusulkan mempunyai kinerja yang lebih baik dalam menurunkan fragmentasi dan *crossstalk* per slot jaringan MCF. Hal ini juga berarti efisiensi kinerja algoritma core prioritization dan *core classification* lebih baik dari algoritma *random*. Selanjutnya representasi hasil perbandingan dari kedua metode yang diterapkan untuk mengurangi *crossstalk* per slot dalam penelitian ini diperlihatkan Gambar 4 dimana menunjukkan bahwa metode *random* terjadi *crossstalk* pada semua core, sedangkan metode “Proposed” tidak semua core MCF terjadi *crossstalk*. Hasil simulasi menemukan bahwa metode “Proposed” yang diusulkan dapat mengurangi *crossstalk* per slot MCF sebesar 18.75%.

Penelitian ini memperlihatkan, paralelisasi algoritma core prioritization dan *core classification* yang diterapkan pada jaringan optik untuk mengurangi inter-core *crossstalk* dalam MCF, dimana hasil simulasi menunjukkan metode yang diusulkan bekerja dengan baik dan efisien dari perspektif mengurangi *crossstalk* antar-core maupun fragmentasi. Hal ini berarti jumlah spektrum overlap yang menyebabkan *crossstalk* MCF dapat dikurangi dengan metode yang diusulkan.

Pengujian kinerja sistem dilakukan melalui observasi data runing terhadap eksekusi kedua algoritma. Data hasil observasi ini kemudian digunakan untuk menghitung jumlah *crossstalk* per slot antar core MCF yang menyatakan besarnya kinerja dari setiap metode yang diusulkan dimana memperlihatkan penurunan nilai *crossstalk* per slot yang berarti bahwa kinerja algoritma paralelisasi lebih efisien daripada algoritma *random*.

Jaringan serat optik diharapkan menjadi media transmisi yang handal untuk mewujudkan suatu proses komunikasi dengan berkecepatan tinggi serta berkapasitas *bandwidth* yang besar (Achmad dkk., 2010). Multi-core fiber merupakan serat optik yang memiliki beberapa core dalam mentransmisikan sinyal sehingga data ditransmisikan secara paralel dengan mendistribusikan data ke beberapa core secara simultan dan berkapasitas transmisi jauh lebih besar daripada serat optik single-mode dan dapat mencapai jarak yang lebih jauh (Dewiani et al., 2012). *Crosstalk* merupakan masalah paling signifikan dalam multi-core fiber. Penelitian ini, menunjukkan metode yang diusulkan dapat mengurangi inter-core *crossstalk*. Hal ini karena ada pemprioritasan core yang digunakan dan menghindari pengisian core berdekatan serta jenis koneksi yang dialokasikan untuk masing-masing core berdasarkan jumlah slot spectrum yang seragam, sehingga fragmentasi spektrum berkurang.

Penelitian ini, menunjukkan hasil simulasi dari penggunaan slot spektrum 7-MCF untuk masing-masing algoritma dimana hasil simulasi memperlihatkan algoritma “*Random*” untuk alokasi core dan slot spektrum 7-MCF menghasilkan fragmentasi-fragmentasi terhadap *bandwidth*, hal ini sesuai dengan aturan algoritma ini yang mengalokasikan core dan slot spektrum frekuensi berubah-ubah (*random*) (Fujii et al., 2013a). Metode “Proposed” yang diusulkan menunjukkan bahwa metode ini dapat mengurangi fragmentasi bahkan tidak adanya fragmentasi *bandwidth* karena pengalokasian core dan slot spektrum yang teratur sesuai kebijakan algoritma yang diusulkan yaitu menghindari penempatan slot spektrum yang sama pada core yang berdekatan (Fujii et al., 2013b). Dari perspektif *crossstalk*, slot spektrum algoritma yang diusulkan terus tidak terisi (kosong) pada core dengan prioritas rendah, hal ini untuk mengurangi *crossstalk*.

Metode “*Random*”, semua core MCF digunakan dalam pentransmisian data (Fujii et al., 2013a). Namun, dalam metode yang diusulkan, core MCF tidak semua digunakan jika beban trafik yang sedikit. Jika beban trafik akan bertambah, maka core yang lainnya akan terpakai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma yang diusulkan secara bersamaan dapat mengurangi *crossstalk* tanpa tergantung jumlah beban trafik dan jumlah core MCF.

Penelitian ini, mengevaluasi nilai *crossstalk* per slot untuk setiap core 7-MCF. *Crosstalk* per Slot adalah rata-rata nilai pasangan slot spektrum yang menghasilkan *crossstalk*, karena slot spektrum yang digunakan memiliki frekuensi yang sama serta berada pada core berdekatan (Hayasi et al., 2012). Dengan demikian, *Crosstalk* per Slot tidak boleh digunakan untuk perbandingan antara struktur MCF yang berbeda tetapi untuk perbandingan algoritma alokasi core dan alokasi spectrum pada struktur atau jumlah core MCF yang tetap (Fini et al., 2010). Hasil simulasi penelitian ini menghasilkan *crossstalk* per slot 7-MCF untuk core 1-6 maksimal tiga, sedangkan untuk core 7 sebagai core tengah maksimal enam (Fujii et al., 2013b).

Metode yang diusulkan menunjukkan kinerja yang baik dalam mengurangi *crosstalk* antara core MCF karena memiliki nilai *crosstalk per slot* yang sedikit dibanding dengan metode “Random”. Hal ini karena metode yang diusulkan mengalokasikan slot spectrum sesuai koneksi *bandwidth* dan mengalokasikan core sesuai prioritas. Sedangkan metode “Random” cenderung mengalokasikan koneksi pada core dan slot spectrum secara berubah-ubah (*random*) sehingga menghasilkan fragmentasi-fragmentasi pada koneksi (Fujii et al., 2013a). Oleh karena inilah, *Crosstalk per slot* yang dihasilkan lebih tinggi terlepas dari jumlah core MCF. Semakin tinggi nilai *Crosstalk per slot* maka semakin buruk koneksi yang terjadi karena probabilitas bloking yang terjadi lebih besar (Reza et al., 2013). Hal ini berarti paralelisasi algoritma metode “Proposed” yang penulis usulkan dalam manajemen core dan slot spectrum bekerja efektif dalam menurunkan *crosstalk* MCF.

#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan berdasarkan hasil dan pembahasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode “Proposed” yang diusulkan dapat mengurangi *crosstalk per slot* pada jaringan multi-core fiber sebesar 18.75%. Hal ini berarti, jumlah spektrum *overlaps* yang menyebabkan *crosstalk* antar core pada MCF dapat dikurangi
- 2) Metode yang diusulkan dengan menggunakan algoritma *prioritization core* dan *core classification* yang diterapkan pada jaringan MCF bekerja dengan baik dan mampu untuk mengurangi *fragmentasi* dan *crosstalk per slot* antar-core dalam MCF.
- 3) Dalam rangka pengembangan selanjutnya perlu dilakukan simulasi dengan menggunakan algoritma lain yang sesuai untuk mengurangi *crosstalk* pada MCF serta menambahkan jumlah atau struktur core yang lain.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Achmad A., Mokobombang N. N. R. A., Muhlis R. R. P. & Ferdiansyah J. J. N. (2010), *EDFA Simulation on the fiber optic communication system*. Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics (MICEEI); 2010 October 27-29; Makassar City, South Sulawesi, Indonesia.
- Conrad J.M. & Howitt I. (2006), *Introducing students to communications concepts using optical and low-power wireless devices*, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 14(1), pp. 55–66.
- Dewiani, Hirata K., Kalegele K., Higami Y. & Kobayashi S. (2012), *Dynamic routing and wavelength assignment with backward reservation in wavelength-routed multi fiber WDM networks*, Journal of Network, 7(9), pp. 1441–1448.
- Fini J.M., Zhu B., Taunay F. T. & Yan M. F. (2010), *Statistics of crosstalk in bent multi-core fibers*, Optics Express, 18(14), pp. 15122–15129.
- Fujii S., Hirota S., Tode H., & Murakami K. (2013a), *On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks*, Journal of Optical Communications and Networking, 6(12), pp. 1059–1071.
- Fujii S., Hirota Y., & Tode H. (2013b), *Dynamic resource allocation with virtual grid for Space division multiplexed elastic optical network*, Proceedings of 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication; 2013 September; London, UK: P.5.15.
- Hayashi T., Taru T., Shimakawa O., Sasaki T. & Sasaoka E. (2012), *Characterization of crosstalk in ultra-low-crosstalk multi-core fiber*, Journal of Lightwave Technology, 30(4), pp. 583–589.
- Igarashi K. et al. (2013), *110.9-Tbit/s SDM transmission over 6,370 km using a full C-band seven-core EDFA*, Optic Express, 21(15), pp. 18053–18060.
- Reza S. E., Ahsan N., Ferdous S., Dhar R. K. & Rahimi M. J. (2013), *Analyses on the effects of crosstalk in a dense wavelength division multiplexing (DWDM) system considering a WDM based optical cross connect (OXC)*, Internatioan Journal of Science Engineering Research, 4(1) pp. 1–5.
- Tu J., Saitoh K., Koshiba M., Takenaga K. & Matsuo S. (2012), *Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber*, Optics Express, 20(14), pp. 15157-15170.