

# OPTIMASI RESOURCE ALLOCATION MENGGUNAKAN ALGORITMA *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO) PADA SISTEM *LONG TERM EVOLUTION* (LTE) ARAH *UPLINK*

## Optimization of Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm Based Resource Allocation in Long Term Evolution (LTE) Uplink

Anhar Muthaqien<sup>1</sup>, Dr. Arfianto Fahmi, S.T., M.T<sup>2</sup>, Nur Andini, S.T., M.T<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik, Universitas Telkom

<sup>1</sup>anharmuthaqien@students.telkomuniversity.ac.id, <sup>2</sup>arfiantof@telkomuniversity.co.id,

<sup>3</sup>nurandini@telkomuniversity.ac.id

### Abstrak

Dalam kebutuhan manusia seperti komunikasi *wireless broadband* akan mengalami suatu perkembangan, maka kebutuhan manusia seperti teknologi juga ikut berkembang. Namun dengan fakta kendala yang ada seperti sistem komunikasi *wireless* pada masalah permintaan dalam peningkatan kapasitas, *efficiency resource*, peningkatan QoS (*Quality of Service*), dan optimasi *energy efficiency*. Dengan berbagai masalah tersebut, yaitu mampu memodelkan sistem pengalokasian *resource block* guna memberikan usulan mengenai teknik alokasi sumber daya pada *multi-user SC-FDMA* arah *uplink*. Dengan menggunakan metode alokasi sumber daya permasalahan *user* memiliki *fairness index* untuk mendapatkan performansi skema komunikasi SC-FDMA dapat ditingkatkan dengan parameter berupa suatu pemanfaatan *throughput* jaringan yang baik. Pada Tugas Akhir ini algoritma yang digunakan ialah algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk pengalokasian daya kepada *user* dengan membandingkan teknik alokasi daya *Waterfilling* dengan skema *Equal Power Allocation* untuk meningkatkan performansi. Dari hasil simulasi yang didapat, skema yang menggunakan teknik *waterfilling* memiliki *fairness index* sistem yang lebih baik dibandingkan dengan skema *equal power allocation*, tetapi memiliki *average user throughput* dan efisiensi spektral yang lebih rendah. Di parameter *fairness index* sistem, memiliki nilai perbaikan rata-rata sebesar 0,155 bps. Parameter keluaran *average user throughput* dan efisiensi spektral mendapatkan nilai yang maksimum pada skema EPA tanpa menggunakan teknik alokasi daya *waterfilling*, dengan nilai rata-rata *average user throughput* sebesar 8,78 Mbps dan efisiensi spektral 3,415 bps pada semua skenario yang diujikan.

Kata kunci : LTE, SC-FDMA, *Waterfilling*, PSO, *Equal Power Allocation*, PRB.

### Abstract

In the human needs such as communication, wireless broadband will experience development, then the needs of human beings such as technology are also growing. But with the fact that there are some obstacles in regards of wireless communication systems on demand issues in capacity building, resource efficiency, improvement of QoS (Quality of Service), and energy efficiency optimization. With the various problems, it is able to model resource allocation block system to provide suggestions on resource allocation techniques on multi-user SC-FDMA uplink direction. By using resource allocation method problem user have fairness index to get performance SC-FDMA communication scheme can be improved with parameter in the form of a good network throughput utilization. In this final paper, the used algorithm is Particle Swarm Optimization algorithm to allocate resource to user with comparing Waterfilling resource allocation technique with the scheme of Equal Power Allocation to increase performance. Based on the results, the scheme which uses waterfilling technique has better fairness index system than equal power allocation, but it has average user throughput and lower spectral efficiency. In the fairness parameter of the system, it has an average improvement value of 0,155 bps. The average user output throughput and spectral efficiency parameters get maximum value on the EPA scheme without using the waterfilling power allocation technique, with average user throughput average of 8.78 Mbps and spectral efficiency of 3,415 bps in all test scenarios.

Keywords: LTE, SC-FDMA, *Waterfilling*, PSO, *Equal Power Allocation*, PRB.

### 1. Pendahuluan

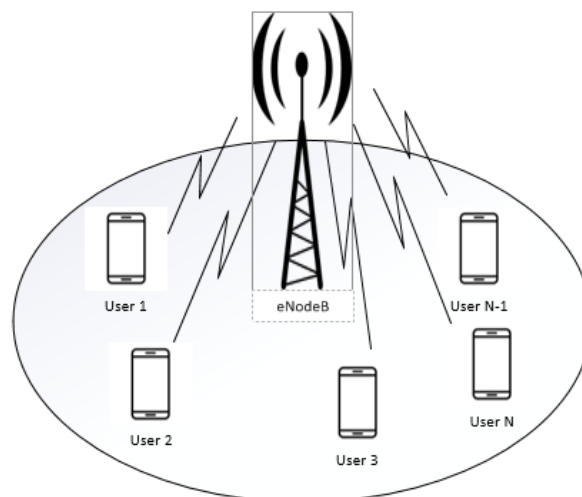
## 1.1 Latar Belakang

Dari beragam cara yang menjanjikan untuk masalah kondisi kanal tersebut adalah dengan melakukan *resource allocation* dengan menggunakan algoritma *particle swarm optimization* (PSO). Langkah (4G) LTE dalam perkembangan dari GSM, standar 2G, hingga UMTS, teknologi 3G berbasis GSM. *Single carrier frequency-division multiple access* (SC-FDMA) di LTE *uplink* mensyaratkan bahwa semua *resource block* (RBs) dialokasikan ke pengguna yang sama harus bersebelahan dengan domain frekuensi di dalamnya setiap slot waktu, yang membuat masalah alokasi sumber daya *uplink* lebih sulit dipecahkan[3]. Pada [14], dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) hasil simulasi yang di dapat bahwa semakin banyak partikel yang digunakan maka semakin baik *throughput* yang didapat dan pengalokasian PRB terhadap UE akan semakin baik. Pada penelitian [23] [24] mencoba untuk menganalisis kinerja *waterfilling* yang diterapkan pada MIMO-OFDM. Hasil yang diperoleh ialah usulan algoritma *waterfilling* memiliki efisiensi yang lebih baik. Selain itu, konfigurasi antenna MIMO dapat meningkatkan kapasitas sistem. Pada penelitian ini menggunakan, algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) digunakan untuk memecahkan masalah optimasi model *uplink*, kemudian digunakan skema *waterfilling* untuk proses pengalokasian daya untuk menyamaratakan daya transmisi yang akan digunakan untuk tiap *User Equipment* (UE) serta didukung dengan skema *equal power allocation*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan kapasitas *link* dalam proses transmisi yang dilakukan pada komunikasi SC-FDMA. Pada Bab II akan dibahas mengenai metode-metode yang akan digunakan pada penelitian. Pada Bab III membahas mengenai analisis dari hasil yang telah diperoleh dari simulasi. Pada Bab IV akan membahas mengenai kesimpulan yang diperoleh dari penelitian.

## 2. Dasar Teori dan Metodologi

Pada penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi masalah penelitian menggunakan studi literatur yang diambil dari penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan masalah penelitian ini. Pada penelitian sebelumnya yang menggunakan algoritma PSO dalam proses pengalokasian PRB, belum menerapkan yang membandingkan skema *equal power allocation* dan teknik pengalokasian daya *waterfilling*, sehingga pada penelitian ini akan melakukan simulasi pengalokasian PRB menggunakan algoritma PSO disertai dengan skema *equal power allocation* dan teknik alokasi sumber daya *waterfilling* pada *multi-user* SC-FDMA arah *uplink*. Simulasi diawali dengan penyebaran *user* dalam sebuah *cell* dengan radius 1 Km yang diasumsikan berada di daerah perkotaan.

### 2.1 Desain Model Sistem



Gambar 1. Pemodelan Sistem

Dapat diilustrasikan pada gambar 1. Sistem dimodelkan menggunakan sel tunggal sehingga tidak mengalami interferensi antar tetangga. Sistem terdiri dari eNodeB yang melayani *user* dan memiliki sejumlah *N* *user* yang terletak di daerah perkotaan. eNodeB terdiri dari frekuensi *carrier* sebesar 1800 MHz dan *bandwidth* 5 MHz, maka model kanal yang cocok digunakan ialah COST 231-Hatta. Kemudian alokasi PRB menggunakan algoritma PSO yang mendapat masukan kondisi kanal atau *Channel State Information* (CSI) dari seluruh *user*. CSI tersebut adalah kondisi atau keadaan kanal dari setiap *user* yang dikalikan dengan daya eNodeB yang berupa *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang diformulasikan pada persamaan (1) [19].

$$H(n, v) = L_p \cdot L_{pe} \cdot S_h \cdot r_{rayleigh} \cdot k \cdot T \cdot B \cdot NF \quad (1)$$

Dimana  $H(n,v)$  adalah kondisi kanal,  $G_{rx}$  adalah *gain* eNB,  $G_{tx}$  adalah *gain* UE.  $L_p$ ,  $L_{pe}$ , dan  $S_h$  secara berurut-turut adalah *pathloss*, *penetration*, dan *shadowing*.

## 2.2 Alokasi PRB Menggunakan Algoritma PSO

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan salah satu teknik pencarian metaheuristik yang berdasarkan pada perilaku interaksi sosial dan komunikasi dalam kehidupan burung dalam bertahan hidup. Partikel bergerak mengelilingi sebuah ruangan pencarian dengan suatu kecepatan, yang diperbaharui secara konstan oleh pengamatan partikel itu sendiri. Oleh sebab itu, algoritma tersebut dikategorikan sebagai bagian dari kehidupan rekayasa/buatan *Artificial Intelligence* (AI) yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi [11].

Proses pemecahan masalah pada algoritma PSO dilakukan dengan perpindahan posisi partikel. Pada setiap iterasi atau pengulangan algoritmanya, akan dilakukan pembaruan nilai *velocity* dan posisi menuju posisi terbaik. Pada saat yang bersamaan terjadi komunikasi diantara seluruh kumpulan partikel yaitu pertukaran informasi posisi terbaik dari setiap partikel. Pada dasarnya bukan tanpa sebab sebuah partikel dapat bergerak menuju posisi terbaik tanpa mengetahui posisi terbaik tersebut dari partikel lain, melainkan sebuah partikel dapat bergerak menuju posisi terbaik [12].

Nilai *fitness* setiap partikel ditaksir menurut fungsi sasaran (*objective function*) yang ditetapkan. Jika nilai *fitness* setiap partikel pada lokasi saat ini lebih baik dari  $P_{best}$  dan  $G_{best}$ , maka  $P_{best}$  dan  $G_{best}$  diatur untuk posisi saat ini. Menghitung kecepatan pada iterasi berikutnya dengan persamaan [12]:

$$V_j(i) = \Phi V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best}, j - X_j(i-1)] + c_2 r_2 [G_{best}, j - X_j(i-1)] \quad (2)$$

Dengan ,

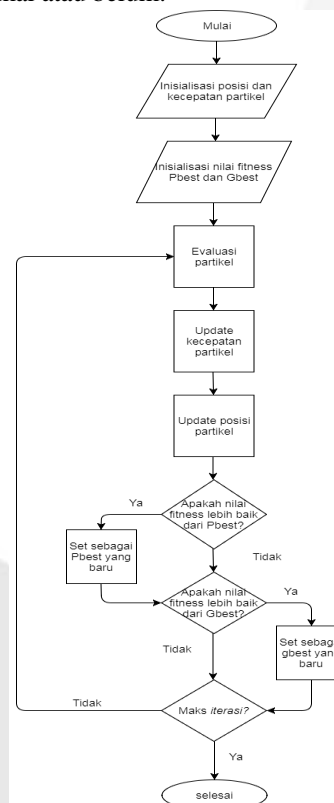
$$\phi = \phi_{maks} - \left( \frac{\phi_{maks} - \phi_{min}}{iterasi\ max} \right) * iterasi \quad (3)$$

Dimana  $V$  adalah kecepatan partikel,  $X$  adalah posisi partikel,  $i$  adalah iterasi,  $r_1$  dan  $r_2$  adalah bilangan acak,  $c$  adalah *learning rates*, dan  $\phi$  adalah bobot inersia.

Menentukan posisi partikel pada iterasi berikutnya menggunakan persamaan:

$$X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i) \quad (4)$$

Setelah itu mengevaluasi nilai fungsi tujuan pada iterasi selanjutnya. Lalu memperbaharui  $P_{best}$  dan  $G_{best}$ . Kemudian mengecek apakah solusi sudah optimal atau belum.



Gambar 2 Diagram Alir Algoritma PSO

### 2.3 Alokasi Daya *Waterfilling*

*Waterfilling* adalah suatu skema yang bertujuan untuk mengalokasikan daya ke *user*. *Waterfilling* menggunakan prinsip pengisian air pada suatu wadah yang terdapat susunan balok dan memiliki tinggi yang berbeda [10]. Pada skema *waterfilling*, *user* yang memiliki nilai SNR yang tinggi akan dialokasikan daya yang rendah, sedangkan *user* yang memiliki SNR yang rendah akan dialokasikan daya yang tinggi sesuai prinsip pengisian air [10]. Keluaran dari proses ini adalah nerupa matriks alokasi daya sebagai masukan untuk perhitungan kinerja sistem [13]. Skema *waterfilling* dirumuskan dengan persamaan dibawah ini:

$$P(n, v) = \frac{\frac{1}{H(n,v)}}{\sum_{n=1}^N \sum_{v=1}^V \frac{1}{H(n,v)}} P_t \quad (5)$$

Dimana  $P(n, v)$  adalah daya yang dialokasikan ke RB ke- $v$  pada *user* ke- $N$  pada timeslot- $s$ , sedangkan  $P_t$  adalah total daya dari *transmitter*, dan  $H(n,v)$  adalah kondisi kanal.

### 2.4 Proses Simulasi

Proses simulasi dimulai dari penebaran *user* di dalam area cakupan eNodeB yang memiliki sifat penebaran acak. Selanjutnya pembangkitan *Channel State Information* (CSI) yang direpresentasikan dengan nilai SNR dari *user* pada setiap RB. Perhitungan CSI dari tiap *user* menggunakan sistem komunikasi yang terdiri dari *receiver*, *transmitter*, kanal *fading*, serta rugi-rugi di ruang bebas. Selanjutnya nilai CSI di petakan ke nilai CSI index. Selanjutnya dilakukan pengalokasian RB pada tiap *user* menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization*. Untuk skema *waterfilling* setelah proses pengalokasian RB, dilakukan penghitungan kualitas kanal setiap *user*. Setelah itu dilakukan pengalokasian daya dengan menggunakan skema *waterfilling* sesuai dengan kondisi kanal setiap *user*.

Tabel 1 Parameter Simulasi

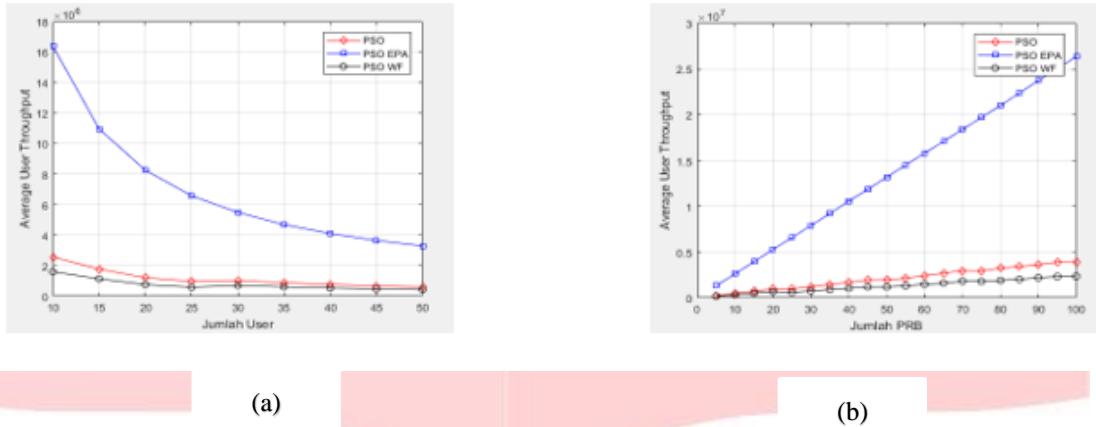
No	Parameter	Asumsi
1	Layout Seluler	Single cell heksagonal
2	Frekuensi Carrier	1800 MHz
3	Bandwidth Resource Block	180 KHz
4	Bandwidth sistem	5 MHz
5	Jumlah TTI per pegamatan	100 TTI
6	Jumlah <i>user</i>	10-50 <i>user</i> (kenaikan sebesar 5)
7	Jumlah PRB	25
8	Model Propagasi	COST-231 – Hata
9	Jari-jari sel	1000 m
10	Penetration Loss	20 dB
11	Gain Antena eNodeB	18 dBi
12	Gain Antena User	0
13	Noise Figure UE	7 dB
14	Daya Panar eNodeB	46 dBm (40 Watt)
15	Jarak Minimal UE dan eNB	20 m
16	Pengguna PRB untuk UE	1 PRB untuk setiap UE
17	Lognormal Shadowing	Log Normal Fading dengan standart deviasi = 8 dB
18	Scheduler	Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

### 3. Hail Simulasi dan Analisis

Simulasi dilakuka dengan 4 skema yaitu skenario pengalokasian PRB menggunakan algoritma PSO tanpa skema EPA dan alokasi daya *waterfilling*, lalu algoritma PSO menggunakan teknik alokasi daya EPA tanpa alokasi daya *waterfilling*, dan algoritma PSO disertai teknik alokasi daya EPA dan alokasi daya *waterfilling*. Skenario tersebut untuk mengamati kualitas layanan informasi dengan perubahan *user* yang bervariasi mulai dari 10-50 dengan kenaikan 5 dan jumlah PRB 25.

### 3.1 Average User Throughput

Average User Throughput adalah nilai rata-rata dari pencapaian *throughput* dari semua *user*, dan nilai *throughput* tersebut menggunakan kualitas kanal atau SNR. Nilai Average User Throughput akan membandingkan skema PSO EPA dengan PSO WF dan PSO EPA WF.



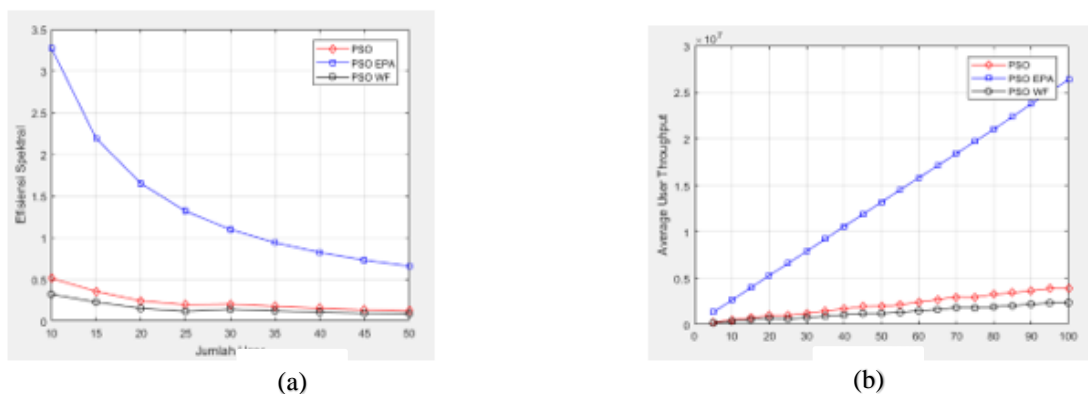
Gambar 3 (a) Average User Throughput terhadap variasi jumlah user, (b) Average User Throughput terhadap variasi jumlah PRB

Pada gambar 3 (a) melakukan skenario variasi jumlah *user* dari 10-50 dengan kenaikan 5, jumlah PRB 25 dan cakupan cell 10-100 m. Nilai *user throughput* mengalami penurunan dengan selisih rata-rata sebesar 6,28 Mbps apabila membandingkan skema PSO-EPA dengan skema PSO-WF, sedangkan pada skema PSO-EPA dibandingkan dengan skema PSO mengalami penurunan dengan selisih rata-rata sebesar 5,92 Mbps. Pada skema yang menggunakan *waterfilling* memiliki nilai *average user throughput* yang lebih rendah, dikarenakan prinsip kerja *waterfilling* yang mengalokasikan daya lebih tinggi kepada *user* yang memiliki SNR yang rendah.

Pada gambar 3 (b) melakukan skenario variasi jumlah PRB dari 5-100 dengan kenaikan 5, jumlah *user* 25 dan cakupan cell 10-100 m. Nilai *user throughput* mengalami penurunan dengan selisih rata-rata sebesar 12,5 Mbps apabila membandingkan skema PSO-EPA dengan skema PSO-WF, sedangkan pada skema PSO-EPA dibandingkan dengan skema PSO mengalami penurunan dengan selisih rata-rata sebesar 11,6 Mbps. Dari hasil simulasi parameter yang berupa grafik *user throughput* rata-rata mengalami penurunan seiring bertambahnya jumlah *user*. Pada skema yang menggunakan *waterfilling* memiliki nilai *average user throughput* yang lebih rendah, dikarenakan prinsip kerja *waterfilling* yang mengalokasikan daya lebih tinggi kepada *user* yang memiliki SNR yang rendah.

### 3.2 Efisiensi Spektral

Efisiensi Spektral merupakan parameter yang menunjukkan sistem jumlah bit yang ditransmisikan pada 1 Hz. Nilai tersebut bergantung pada nilai SNR tiap *user*. Nilai Efisiensi Spektral akan membandingkan skema PSO EPA dengan PSO WF dan PSO EPA WF.



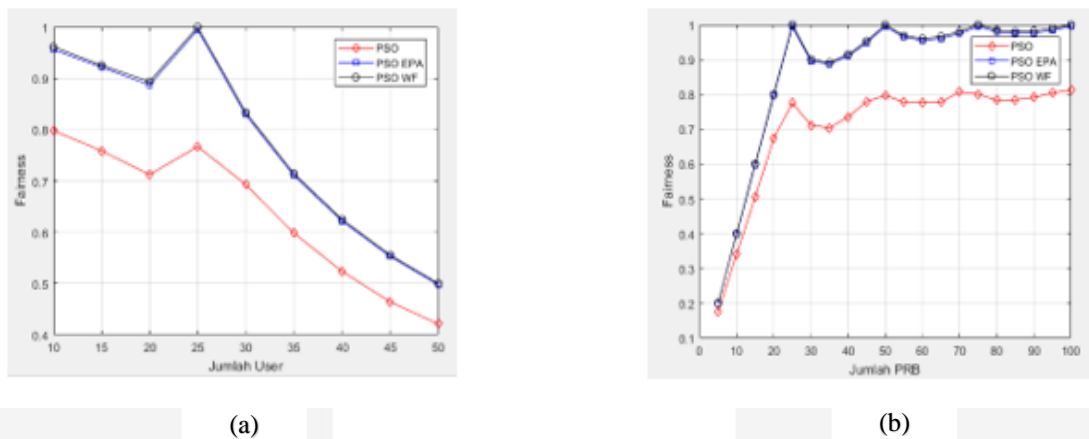
Gambar 4 (a) Efisiensi Spektral terhadap variasi jumlah user, (b) Efisiensi Spktral terhadap variasi jumlah PRB

Pada gambar 4 (a) melakukan skenario variasi jumlah *user* dari 10-50 dengan kenaikan 5, jumlah PRB 25 dan cakupan cell 10-100 m. Nilai Efisiensi Spektral ketika menggunakan skema PSO-EPA dibandingkan dengan skema PSO-WF mengalami penurunan selisih rata-rata sebesar 1,25 bps, sedangkan pada skema PSO-EPA dibandingkan dengan skema PSO mengalami penurunan selisih rata-rata sebesar 1,17 bps. Pada skema yang menggunakan *waterfilling* memiliki nilai efisiensi spektral yang lebih rendah, dikarenakan prinsip kerja *waterfilling* yang mengalokasikan daya lebih tinggi kepada *user* yang memiliki SNR yang rendah.

Pada gambar 4 (b) melakukan skenario variasi jumlah PRB dari 5-100 dengan kenaikan 5, jumlah *user* 25 dan cakupan cell 10-100 m. Nilai Efisiensi Spektral dengan selisih rata-rata terbesar yaitu bernilai 0,940 bps/Hz apabila membandingkan skema PSO-EPA dengan skema PSO-WF, dan 1,006 bps/Hz apabila membandingkan skema PSO-EPA dengan skema PSO. Pada skema yang menggunakan *waterfilling* memiliki nilai efisiensi spektral yang lebih rendah, dikarenakan prinsip kerja *waterfilling* yang mengalokasikan daya lebih tinggi kepada *user* yang memiliki SNR yang rendah.

### 3.3 Fairness

. *Fairness Index* sistem merupakan kesamaan kualitas kanal yang diperoleh oleh *user* pada saat alokasi yang bergantung pada kualitas SNR. Nilai *Fairness Index* akan membandingkan skema PSO EPA dengan PSO WF dan PSO EPA WF.



Gambar 5 (a) *Fairness* terhadap variasi jumlah *user*, (b) *Fairness* terhadap variasi jumlah PRB

Pada gambar 5 (a) melakukan skenario variasi jumlah *user* dari 10-50 dengan kenaikan 5, jumlah PRB 25 dan cakupan cell 10-100 m. Nilai *Fairness* dengan skema PSO-WF dan skema PSO memiliki hasil yang lebih baik dengan rata-rata sebesar 0,141 bps dibandingkan dengan skema PSO-WF dan skema PSO-EPA dengan rata-rata sebesar 0,004 bps. Pada skema yang menggunakan *waterfilling* memiliki nilai *fairness* yang lebih tinggi, dikarenakan prinsip kerja *waterfilling* yang mengalokasikan daya lebih tinggi kepada *user* yang memiliki SNR yang rendah.

Pada gambar 5 (b) melakukan skenario variasi jumlah PRB dari 5-100 dengan kenaikan 5, jumlah *user* 25 dan cakupan cell 10-100 m. Nilai *fairness* dengan skema PSO-WF dan skema PSO memiliki hasil yang lebih baik dengan rata-rata sebesar 0,169 bps dibandingkan dengan skema PSO-WF dan skema PSO-EPA dengan rata-rata sebesar 0,004 bps. Pada skema yang menggunakan *waterfilling* memiliki nilai *fairness* yang lebih tinggi, dikarenakan prinsip kerja *waterfilling* yang mengalokasikan daya lebih tinggi kepada *user* yang memiliki SNR yang rendah.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah didapat, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada skenario variasi jumlah *user*, skema *waterfilling* paling optimum diterapkan pada skema PSO-WF, tetapi skema *waterfilling* memiliki nilai lebih buruk pada parameter *user average throughput* dan efisiensi spektral. Pada parameter tersebut, memiliki nilai yang lebih baik pada skema PSO-EPA tanpa menggunakan *waterfilling*, dengan nilai selisih rata-rata *user throughput* sebesar 7,05 Mbps dan selisih rata-rata nilai efisiensi spektral sebesar 1,41 bps.
2. Pada skenario variasi jumlah PRB, skema *waterfilling* paling optimum diterapkan pada skema PSO-WF, tetapi skema *waterfilling* memiliki nilai lebih buruk pada parameter *user average throughput* dan efisiensi spektral. Pada parameter tersebut, memiliki nilai yang lebih baik pada skema PSO-EPA tanpa menggunakan *waterfilling*, dengan nilai selisih rata-rata *user throughput* sebesar 13,81 Mbps dan selisih rata-rata nilai efisiensi spektral sebesar 1,11 bps.
3. Skema alokasi daya *equal power allocation* memiliki nilai *average user throughput* dan efisiensi spektral yang lebih tinggi dibandingkan dengan skema *waterfilling*. Pada *average user throughput* di skema EPA memiliki nilai paling optimum sebesar 16,4 Mbps dan efisiensi spektral memiliki nilai paling optimum sebesar 3,29 bps pada skenario variasi jumlah *user*. Pada skenario variasi jumlah PRB di skema EPA memiliki nilai paling optimum sebesar 2,63 Mbps untuk *average user throughput* dan 1,3178 bps untuk efisiensi spektral.

#### Daftar Pustaka

- [1] I. C. Wong, O. Oteri, and W. McCoy, "Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 5, pp. 2161–2165, May 2009.
- [2] Purnomo, Yudo. 2014. "Pengalokasian Physical Resource Block Arah Downlink pada Sistem Long Term Evolution Menggunakan Algoritma Particle Swarm Optimization,". Bandung: Universitas Telkom.
- [3] Antonio Afta, *Pengalokasian Sumber Daya Radio Menggunakan Algoritma Particle Swarm Optimization dan Waterfilling Pada MIMO-OFDMA 2x2 Arah Downlink*. Bandung.
- [4] V. S. Prabowo, *Radio Resources Allocation Based-on Energy Saving for LTE-Advanced System*, Bandung, 2016.
- [5] Zhang Dapeng. (2012). "Radio Resource Management Based On Genetic Algorithms For OFDMA Network". Doctor of Philosophy Degree Submitted, School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary, University of London.
- [6] Umi Lailatul Muyassaroh, "ALGORITMA PARTICLE SWARM OPTIMIZATION DENGAN LOCAL SEARCH (PSO-LS) SEBAGAI METODE PENYELESAIAN UNCAPACITATED FACILITY LOCATION PROBLEM (UFLP)," Skripsi thesis, Universitas Airlangga, Surabaya. 2012.
- [7] Putra and Sayid Aidhil, "Perbandingan Model Algoritma Particle Swarm Optimization Dan Algoritma Genetika Pada Penjadwalan Perkuliahan," Sumatra Utara: Universitas Sumatra Utara.
- [8] Burcu Hanta. (2009/2010). "SC-FDMA and LTE Uplink Physical Layer Design". Ausgewählte Kapitel der Nachrichtentechnik.
- [9] Alagan Anpalagan and Kaamran Raahemifar Sanam Sadr, "Radio Resource Allocation Algorithms for the Downlink of Multiuser OFDM Communication Systems," *IEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 11, 2009: