

SIMULASI DISTRIBUTED BINARY POWER ALLOCATION PADA SISTEM RADIO KOGNITIF

Erwan Darmawan¹, Iqbal Fernando²

Program Studi Teknik Elektro¹, Program Studi Informatika², Universitas Faletehan¹²

e-mail: ¹darmawan.erwan@gmail.com dan ²iqbal.28nando@gmail.com

Abstract

Cognitive radio is a technology for wireless communication networks that employ the upcoming Dynamic Spectrum Access (DSA) . DSA technology allows users who do not have a license called the secondary spectrum users to use the licensed spectrum that primary users while not in use. Application of DSA by secondary users to improve the spectrum utilization efficiency without disrupting or causing interference to the primary user. Later developed into a multi - user cognitive radio or cognitive radio networks use frequency spectrum together with a primary user (PU). Methods switch 'off' the user who gives the biggest interference to PU is the best method with the greatest increase in performance, both the capacity and the number of active SU while the combination of methods switch 'off' the user who raised the largest overall interference with the method switches 'off' user given biggest interference to the PU is an alternative method that shows the consistency of performance improvement in the number of potential users over 10 and able to dominate the entire method over another is begun saturation and decreased capacity.

Keyword : *Cognitive Radio Network, Distributed Binary Power Allocation*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang telekomunikasi nirkabel dan aplikasi multimedia sangat pesat. Semakin berkembang maka semakin banyak kelebihan yang ditawarkan baik itu kecepatan akses maupun jangkauan atau coverage dari pemancar, kualitas dan kehandalan sistem, dan masih banyak lagi. Namun pesatnya perkembangan tersebut juga mengakibatkan meningkatnya kebutuhan terhadap spektrum frekuensi. Pada kenyataannya penggunaan frekuensi merupakan sumber daya yang terbatas pada komunikasi nirkabel, dimana mempunyai alokasi masing-masing yang diatur oleh badan regulasi.

Penerapan kebijakan *fixed spectrum assignment policy* (alokasi penggunaan spektrum tetap) menjadi hambatan untuk pemanfaatan spektrum yang efisien. Kebijakan tersebut mengalokasikan spektrum secara statis pada teknologi telekomunikasi nirkabel dengan lisensi jangka panjang. Hal ini mengakibatkan beberapa teknologi terpaksa menggunakan unlicensed spectral band dimana menyebabkan pemanfaatan spektrum yang penuh dan terjadi saling interferensi satu sama lain. Dampak lain dari permasalahan ini yaitu pengembangan teknologi komunikasi nirkabel menjadi terhambat. Dengan keterbatasan alokasi spektrum frekuensi, pada kenyataannya pemilik lisensi spektrum tersebut tidak sepenuhnya memanfaatkannya sepanjang waktu sehingga pemanfaatan spektrum tidak efisien. Konsep radio kognitif diusulkan untuk mengatasi permasalahan diatas. Radio kognitif merupakan teknologi jaringan komunikasi nirkabel mendatang yang menerapkan teknologi *Dynamic Spectrum Access* (DSA). Teknologi DSA memungkinkan pengguna yang tidak mempunyai lisensi spektrum yang disebut dengan secondary user untuk menggunakan lisensi spektrum primary user yang sementara tidak digunakan. Penerapan DSA oleh secondary user dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan spektrum tanpa mengganggu atau menyebabkan interferensi pada primary user.

Berbagai penelitian mengajukan koordinasi distributed cognitive radio [3],[9],[12] untuk meningkatkan sum rate pada jaringan radio kognitif sambil menurunkan interferensi terhadap Primary User (PU), dengan cara pembagian spektrum sistem primer-sekunder dengan mengalokasikan secara optimal daya transmisi secondary user (SU) untuk meningkatkan throughput total SU dibawah perusakan interferensi dan noise, dan membatasi daya maksimum

dan minimum, dan tetap menjaga QoS sistem primer. Skenario yang telah dikembangkan memiliki satu primary user (PU) yang berkomunikasi dengan primary receiver (PR) dan jumlah potensi SU yang tidak terbatas yang dibolehkan untuk PU. Maka dari itu, diperlukan metode *power control* yang sesuai agar jaringan radio kognitif tidak menginterferensi PU, atau meminimalkan interferensi dalam range yang dapat ditangani oleh PU. Dan salah satu metode pengalokasian daya yang memiliki kompleksitas yang kecil dibandingkan metode yang lain adalah Uplink Binary Power Allocation [Zayen, B., Haddad, M., Hayar, A., & Øien, G. (2008)] [M. Haddad, A.M. Hayar, G.E. Øien, S.G. Kiani. (2008)]. Kemudian metode ini dioptimasi pada penelitian [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)] dengan beberapa metode mitigasi interferensi untuk peningkatan performansi berupa kapasitas dan jumlah user yang aktif. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk memberikan opsi tambahan pada metode mitigasi interferensi dalam meningkatkan kapasitas sistem jaringan radio kognitif dengan Uplink Distributed Binary Power Allocation.

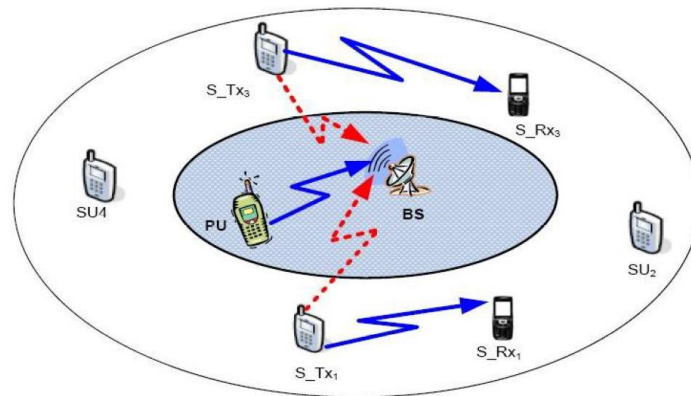
METODE PENELITIAN

Sistem radio kognitif memberikan kesempatan untuk meningkatkan efisiensi spektrum dengan cara mendeteksi aktivitas pengguna primer (PU) dan mengadaptasi transmisi sesuai hasil deteksi^[13]. Dari beberapa penelitian, pengguna sekunder (SU) mengamati kanal nirkabel dan menentukan spektrum tak terpakai baik dalam fungsi waktu maupun frekuensi, kemudian mengadaptasikan sinyalnya untuk mengisi kekosongan spektrum. SU hanya melakukan transmisi selama tidak ada pengguna lain menggunakannya. Kontribusi beberapa penelitian seperti [M. Haddad, A.M. Hayar, G.E. Øien, S.G. Kiani. (2008)] [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)] [Zayen, B., Haddad, M., Hayar, A., & Øien, G. (2008)], telah memperluas protokol kognitif untuk dapat melakukan transmisi secara simultan bersama PU pada pita frekuensi yang sama, dengan syarat selama level interferensi terhadap PU berada dalam *range* yang dapat diterima.

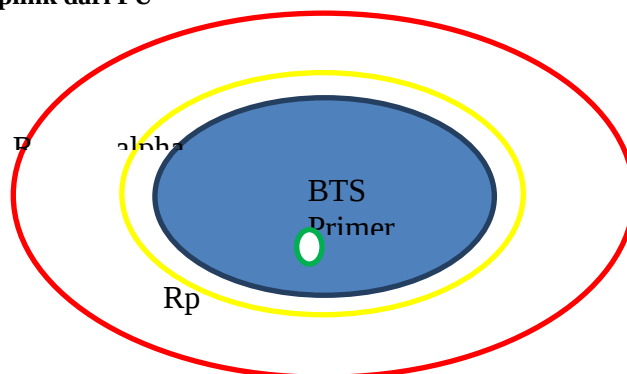
Model Sistem [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)]

Sistem yang akan kita pakai adalah jaringan radio kognitif nirkabel dengan kumpulan beberapa pengguna pada area geografis tertentu. Pengguna (*user*) dapat berupa pengirim ataupun penerima. Dengan virtualisasi protokol *scheduling*, satu PU dan M pasang SU secara simultan dipilih dari para pengguna yang ada untuk berkomunikasi pada waktu yang diberikan, sementara yang lain dalam keadaan *silent*. Gain kanal diasumsikan sebagai variabel acak. Pada pembahasan ini akan dipakai notasi sebagai berikut:

1. Indeks beberapa SU j berada antara 1 hingga M
2. $h_{vu.vu}$ adalah *gain* kanal antara *base station* (BS) dan PU
3. $h_{vu.n}$ adalah *gain* kanal dari PU dengan indeks pu ke SU yang diinginkan dengan indeks n
4. $h_{j.n}$ adalah *gain* kanal dari SU indeks j ke SU yang diinginkan dengan indeks n
5. Daya dari sistem primer ditransmisikan dengan daya p_{vu}
6. Daya dari SU indeks j ditransmisikan dengan daya p_j .



Gambar 1. Jaringan Radio Kognitif (CRN) dengan 1 PU dan 4 pemancar sekunder yang melakukan komunikasi dengan penerima yang diinginkan dengan cara *ad-hoc* pada transmisi uplink dari PU



Gambar 2. Pemodelan Sistem

Sistem radio kognitif yang akan disimulasikan seperti gambar 3.2 diatas dengan BTS primer yang meng-cover pengguna primer dengan luas area yang dapat di-cover adalah R, pada simulasi ini radius terluar sel primer sebesar 1000 m. Pada area *coverage* sistim primer terdapat *interference boundary* yang mana SU tidak bisa berkomunikasi dengan cara *ad-hoc*, area ini merupakan area perlindungan untuk PU terhadap interferensi, area ini disebut juga radius proteksi (R_p). Pada radius proteksi diberikan alpha sebagai kompensasi dimana SU akan diberikan pertimbangan untuk ON dan OFF sesuai nilai interferensi yang diberikan, pada simulasi ini alpha yang akan digunakan sebesar 300 m. Seperti terlihat pada gambar 3.1, SU harus dapat mendeteksi apakah jarak dari BS primer sudah cukup jauh, dengan kata lain sudah berada dalam area dimana radio kognitif boleh beroperasi. Kapasitas PU diekspresikan dalam persamaan berikut:

(3.1)

$$C_{pu} = \log_2 \left(1 + \frac{p_{pu} |h_{pu,pu}|^2}{\sum_{i=1}^M p_i |h_{i,pu}|^2 + \sigma^2} \right)$$

Dimana σ^2 adalah varians dari derau ambient. Dengan kata lain, dengan membuat SU dapat

mengakses spektrum dari sistim primer, SU ke-j mengalami interferensi dari PU dan seluruh *co-channel* bertetangga dari *link* SU yang bertransmisi pada pita yang sama. Kapasitas SU ke-j diberikan oleh persamaan:

; untuk $j=1, \dots, M$

$$C_j = \log_2 (1 + SINR_j)$$

Dimana:

(3.2)

$$SINR_j = \frac{p_j |h_{j,j}|^2}{\sum_{k=1, k \neq j}^M p_k |h_{k,j}|^2 + p_m |h_{m,j}|^2 + \sigma^2}$$

SU harus mengenali lingkungan komunikasinya dan mengadaptasi parameter skema komunikasinya agar dapat meningkatkan kapasitas kognitif, seperti persamaan berikut:

(3.3)

$$C_{su} = \frac{1}{\tilde{M}} \sum_{j=1}^{\tilde{M}} C_j$$

merepresentasikan jumlah SU yang aktif. Lebih lanjut diasumsikan bahwa *coherence time* $\tilde{M}$

sangat besar sehingga kanal tetap konstan pada tiap panjang waktu *scheduling*. Kita juga asumsikan bahwa SU mengenali *channel state information* (CSI) pada *link* masing-masing, tetapi tidak mengetahui kondisi kanal SU yang lain. Tanpa adanya kemampuan *interference cancellation*, *power control* digunakan oleh SU untuk menyiapkan daya dan membatasi interferensi dan efek *fading*. Asumsi dasar yang dapat diambil dari model sistem ini bahwa SU dapat bervariasi daya transmisinya dalam usaha meningkatkan kapasitas kognitif dan tetap menjaga jaminan QoS terhadap PU.

Algoritma Binary Power Control

Dengan mengambil keuntungan dari fitur kognitif SU, performa keseluruhan sistem secara dinamis dapat ditingkatkan dengan mengubah parameter transmisi SU. Pada penelitian [Zayen, B., Haddad, M., Hayar, A., & Øien, G. (2008)], mereka memfokuskan pada kapasitas sistem kognitif dan jumlah maksimum pengguna kognitif yang aktif yang dapat dicapai dalam situasi ini. Masalah tersebut diekspresikan sebagai berikut:

(3.4)

$$\{p_1^*, \dots, p_M^*\} = \arg \max_{p_1, \dots, p_M} C_{su}$$

Dengan kondisi:

(3.5)

$$\begin{cases} 0 \leq p_j \leq P_{max} & \text{untuk } j = 1, \dots, N \\ P_{out} = \text{Prob}\{C_m \leq R_m | R_m, q\} \end{cases}$$

Dimana q merupakan batas teratas (*upper boundary*) dari *outage probability*.

P_{out}

Berdasarkan pada penelitian sebelumnya [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)], dimana algoritma *on/off* digunakan, yang berarti bahwa nilai dapat berupa 0 atau 1, dimana SU akan di *switch off*

p_j P_{max}

hingga kondisi sebelumnya terpenuhi. Hal ini membawa ke situasi dimana dengan sejumlah M SU, hanya $\tilde{M}$ SU yang aktif.

$\tilde{M}$

Setelah pengembangan teoritis yang ditunjukkan pada [Zayen, B., Haddad, M., Hayar, A., & Øien, G. (2008)], dapat dikatakan bahwa sebuah SU dinotasikan dengan m akan aktif jika:

- Pada SINR yang tinggi :

$$SIR_m > e$$

- Pada SINR yang rendah :

$$SIR_m > 1$$

Karena pembatasan utama kita adalah *outage probability* pada PU, maka harus diingat bahwa walaupun SU yang dalam riset memenuhi salah satu dari kedua kondisi SINR, kondisi harus diperhatikan. Sesuai hasil yang diperoleh pada riset sebelumnya, jumlah teoritis

$$P_{out} < q$$

SU yang aktif berada antara limit berikut:

$$\tilde{M}$$

dimana

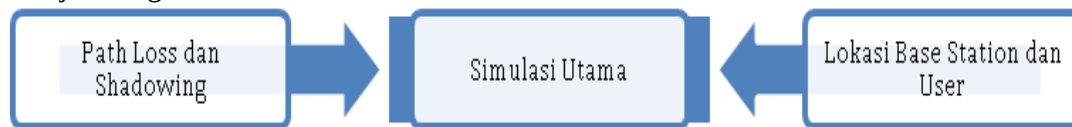
(3.6)

$$0 \leq \tilde{M} \leq \frac{-\log(1-q)}{2^{R_{pu}} - 1} \cdot \frac{p_{pu} G_{pu}^2}{P_{max} G_{su}^2} - \frac{1}{SNR} \quad SNR = \frac{G_{su}^2 P_{max}}{\sigma^2}$$

Pemodelan Simulasi

1. Struktur Simulasi

Simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab, dan *framework* simulasi komunikasi nirkabel yang dikembangkan oleh Anders Gjendemsjø [Dybdahl, S. (2007)]. Struktur simulasi ditunjukkan gambar berikut:



Gambar 3. Struktur Simulasi

Simulasi yang dirancang untuk menginvestigasi metode *distributed binary power allocation* dalam berbagai skenario dan mengoptimalkan metode tersebut dengan penambahan metode untuk mengurangi interferensi.

2. Pseudo-code Algoritma Distributed [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)]

Setelah dikenalkan dasar teoritisnya, pengkodean Matlab dikembangkan dari skema berikut ini:

Algoritma Distributed Binary Power Co

```

1:  $p_j^{(1)} = P_{max} \forall j$  and  $\tilde{M}^{(1)} = M$ 
2: for  $i = 1: IT_{max}$  do
3:   while  $\tilde{M}^{(i)} > 0$  do
4:     for  $j = 1: M$  do
5:        $\triangleright$  at high SINR
6:       if  $SINR_j^{it} > \epsilon$  then
7:          $p_j^{(it+1)} \leftarrow P_{max}$ 
8:       else  $p_j^{(it+1)} \leftarrow 0$ 
9:       end if
10:       $\triangleright$  at low SINR
11:      if  $SINR_j^{it} > 1$  then
12:         $p_j^{(it+1)} \leftarrow P_{max}$ 
13:      else  $p_j^{(it+1)} \leftarrow 0$ 
14:      end if
15:    end for
16:     $\triangleright$  outage constraint
17:    if  $P_{out}^{(it+1)} \geq q$  then
18:       $\tilde{M}^{(it+1)} \leftarrow \tilde{M}^{(it)} - 1$ 
19:    end if
20:  end while
21: end for
  
```

Gambar 4. Pseudo-code yang diajukan pada penelitian [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)]

3. Parameter Sistem

Pada pemodelan simulasi tugas akhir ini digunakan beberapa asumsi dan parameter yaitu :

a. Frekuensi <i>carrier</i> (MHz)	: 1800 MHz
b. Radius Sel (R_{sel})	: 1000 m
c. Tinggi MS (h_{MS})	: 1 m
d. Tinggi BTS (h_{BTS})	: 50 m
e. <i>Gain</i> antena BTS (G_{BTS})	: 16 dB
f. <i>Gain</i> antena MS (G_{MS})	: 6 dB
g. Standar Deviasi <i>Shadowing</i> (dB)	: 10
h. Probabilitas <i>Blocking</i> (q)	: 1%
i. Radius Sel Proteksi (R_P)	: 500m, 600 m
j. Daya Pancar Maksimum (P_{max})	: 1000 mW
k. Rasio Daya antara PU dan SU (P_{BS})	: 1
l. <i>Transmission Rate</i> (R)	: 0.5 bit/sec/Hz
m. Model Kanal Propagasi	: COST-231 Hata

4. Mitigasi Interferensi

Dari penelitian [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)], direalisasikan bahwa terdapat beberapa fitur yang dapat ditingkatkan sehingga performansi keseluruhan menjadi lebih baik. Untuk merealisasikannya dapat dilakukan dengan dua cara berpikir yakni: hubungan dengan interferensi dan hubungan dengan kapasitas. Sesuai dengan persamaan 3.3, terlihat bahwa kapasitas total sistim sekunder merupakan jumlah total kapasitas setiap SU, sehingga dapat di logikakan bahwa dengan men-*switch "off"* SU yang dapat memberikan nilai kapasitas terkecil dibandingkan total kapasitas dapat menjadi solusi yang bagus untuk pengembangan.

Untuk mengurangi interferensi hingga ke tingkat yang dapat ditolerir oleh PU, ada beberapa pendekatan yang diajukan pada penelitian [Nieto, R., & Ortega, D. (2008)] yang dapat meningkatkan performansi sistim, yakni:

a. Switch "off" SU yang mengalami interferensi *overall* yang lebih besar (MI-1)

Sebagai pendekatan pertama, dipertimbangkan untuk menonaktifkan *user* yang mendapatkan interferensi *overall* yang besar dari *user* lain termasuk PU. *User* yang mengalami interferensi *overall* yang besar dapat membahayakan performansi sistim dan komunikasi pada keadaan demikian tidak dapat terjadi.

b. Switch "off" SU yang membangkitkan interferensi *overall* yang lebih besar (MI-2)

Sebagai pendekatan kedua, dipertimbangkan untuk menonaktifkan *user* yang membangkitkan jumlah interferensi yang besar. Hal ini cukup logis untuk menonaktifkan *user* seperti ini. Sesuai persamaan 3.3, jumlah kapasitas sistim sekunder dapat ditingkatkan jika kapasitas individu *user* meningkat. Fakta ini dideduksi dari persamaan 3.2 dan persamaan 3.3 yang mengekspresikan bahwa

dengan menonaktifkan SU yang membangkitkan interferensi *overall* terbesar maka SINR masing-masing SU akan meningkat sehingga kapasitas SU pun meningkat.

c. Switch "off" SU SU yang memberikan interferensi yang lebih besar terhadap PU (MI-3)

Sebagai pendekatan ketiga, dipertimbangkan untuk menonaktifkan *user* yang memberikan interferensi yang lebih besar terhadap PU. Diketahui bahwa situasi yang diinginkan adalah dengan , dan cara terbaik untuk mencapainya adalah

$$C_{vu} \geq R_{vu}$$

dengan meningkatkan nilai . persamaan dapat dideduksi dari

$$SINR_{vu} \quad SINR_{vu}$$

persamaan 3.1 yakni:

(3.12)

$$SINR_{pu} = \frac{p_{pu}|h_{pu,pu}|^2}{\sum_{i=1}^M p_i |h_{i,pu}|^2 + \sigma^2}$$

Dimana $j=1, \dots, M$ yang merujuk pada SU pada sistim. Dari persamaan diatas dapat dinyatakan bahwa satu-satunya cara untuk meningkatkan SINR pada PU adalah dengan mengurangi interferensi padanya, dengan kata lain menonaktifkan SU yang memberikan interferensi yang besar pada PU karena cara ini dapat membuat sistim mencapai .

$$C_{vu} \geq R_{vu}$$

Penelitian Yang Diajukan

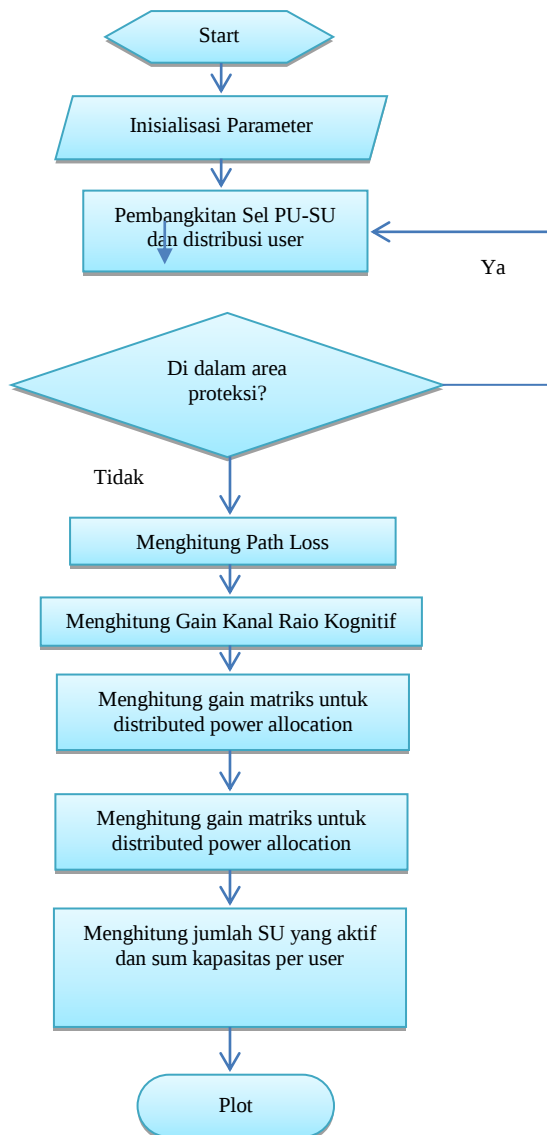
Dari metode mitigasi interferensi diatas, terlihat bahwa ketiga cara diatas dapat meningkatkan kapasitas sehingga penulis ingin melihat bagaimana jika ketiga cara diatas dikombinasikan satu sama lain atau secara keseluruhan. Oleh karena itu, penulis mengajukan kombinasi mitigasi interferensi dengan notasi sebagai berikut:

Tabel 1. Notasi Metode Mitigasi Interferensi Yang Akan Diteliti

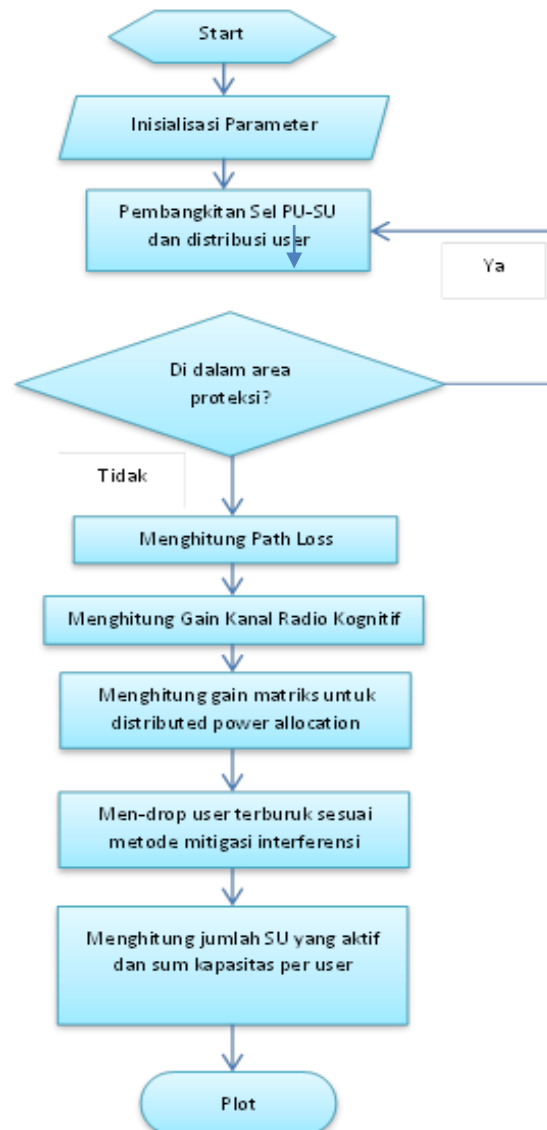
Mitigasi Interferensi	Switch "off" SU yang mengalami interferensi <i>overall</i> yang lebih		MI-1
	Switch "off" SU yang membangkitkan interferensi <i>overall</i> yang lebih besar		MI-2
	Switch "off" SU SU yang memberikan interferensi yang lebih besar terhadap PU		MI-3
Kombinasi Mitigasi Interferensi	Kombinasi Antara MI-1 dengan MI-2		Kombo-1
	Kombinasi Antara MI-2 dengan MI-3		Kombo-2
	Kombinasi Antara MI-1 dengan MI-3		Kombo-3
	Kombinasi Antara MI-1, MI-2, dan MI-3		Kombo-4
Original	Tanpa Mitigasi Interferensi		Original

Dari penelitian diatas ingin dilihat apakah performansi sistim dapat meningkat dengan peningkatan kapasitas dan user yang aktif dibandingkan dengan metode original tanpa mitigasi interferensi.

**Flow Chart Penelitian
 Original**



Mitigasi Interferensi



**Gambar 5. Flowchart Sistim Distributed Binary Power Allocation Original
 Dan Gambar 6. Flowchart Sistim Distributed Binary Power Allocation dengan Mitigasi**

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Hasil Simulasi

Perbandingan Peningkatan Kapasitas Tiap Metode Mitigasi Interferensi Dengan Kondisi Original

Dengan Rp = 500 m

Tabel 2. Perbandingan Peningkatan Kapasitas Rata-Rata User Per SU yang aktif untuk Rp = 500m

Jumlah Potensi SU	Metode (%)						
	MI-1	MI-2	MI-3	Kombo-1	Kombo-2	Kombo-3	Kombo-4
1	0	0	0	0	0	0	0
2	2,05	19,50	20,51	20,14	19,29	19,61	20,14
3	3,11	22,02	30,00	21,84	27,20	23,22	23,69
4	10,30	28,25	38,99	31,58	35,03	32,36	34,31
5	6,88	31,45	44,22	31,13	40,63	34,87	34,39
6	13,63	35,33	48,18	38,44	42,96	38,09	39,35
7	8,73	27,91	40,30	30,62	39,96	29,67	32,11
8	4,55	30,19	47,17	30,25	45,48	33,87	33,78
9	4,45	26,34	38,53	28,14	39,60	27,67	27,65
10	0,89	26,60	35,62	25,60	35,36	28,75	27,76
11	11,39	27,75	38,27	27,77	38,97	28,95	29,93
12	8,71	26,34	40,76	26,30	41,94	28,80	30,10
13	5,65	19,81	31,88	22,38	34,74	23,97	22,77
14	15,09	21,54	36,11	20,29	38,90	23,74	23,93
15	8,52	25,29	36,55	25,90	39,12	26,55	28,43
16	-0,83	15,86	32,29	18,44	36,98	18,92	18,45
17	10,08	22,17	36,45	23,48	38,98	27,17	27,45
18	5,93	20,04	28,47	17,22	34,41	21,85	20,53
19	-0,83	17,06	24,97	15,80	28,20	17,45	16,87
20	11,28	21,17	34,52	21,43	35,90	22,85	24,22

Dari tabel 4.5 diatas terlihat bahwa dengan teknik MI-1 mengalami peningkatan kapasitas hingga ~15%, walaupun terdapat juga penurunan yakni pada jumlah potensi user 16 dan 19 yang mengalami penurunan kapasitas hingga ~0.83%. Dengan teknik MI-2 mengalami peningkatan kapasitas dengan rentang 17%~35%, dengan teknik MI-3 mengalami peningkatan kapasitas dengan rentang 20%~48%, dengan teknik Kombo-1 mengalami peningkatan kapasitas dengan rentang 15%~38%, dengan teknik Kombo-2 mengalami peningkatan kapasitas dengan rentang 19%~45%, dengan teknik Kombo-3 mengalami peningkatan kapasitas dengan rentang 17%~38%, dan dengan teknik Kombo-4 mengalami peningkatan kapasitas dengan rentang 16%~39%. Peningkatan kapasitas seluruh metode terjadi pada jumlah potensi SU 2.

Perbandingan Performansi Metode Mitigasi Interferensi

Performansi metode mitigasi interferensi tercermin dari peningkatan kapasitas rata-rata per user dan peningkatan jumlah user yang aktif. Pada kondisi original, ketika

peningkatan jumlah user yang aktif dilakukan maka kapasitas rata-rata per user akan menurun. Maka pada penelitian ini diharapkan kedua kondisi yakni kapasitas rata-rata per user dan jumlah user yang aktif terjaga atau meningkat. Untuk mempermudah analisa maka dipilih nilai terendah dan tertinggi masing-masing metode dan dimasukkan dalam tabel untuk analisa kuantitatif.

Tabel 3. Rekapitulasi Peningkatan Performansi untuk Rp = 500m

Metode	Peningkatan Kapasitas		Peningkatan Jumlah SU	
	Min (%)	Max (%)	Min (%)	Max (%)
MI-1	-0,83	15,09	-4,69	3,04
MI-2	17,06	35,33	12,56	46,92
MI-3	20,51	48,18	13,24	120,56
Kombo-1	15,8	38,44	12,67	45,94
Kombo-2	19,29	45,48	12,22	81,13
Kombo-3	17,45	38,09	12,67	55,98
Kombo-4	16,87	39,35	12,67	55,31

Tabel 4. Rekapitulasi Peningkatan Performansi untuk Rp = 600m

Metode	Peningkatan Kapasitas		Peningkatan Jumlah SU	
	Min (%)	Max (%)	Min (%)	Max (%)
MI-1	-1,55	13,40	-7,06	5,74
MI-2	13,08	38,81	13,70	42,07
MI-3	23,34	53,34	14,45	109,27
Kombo-1	12,72	39,18	13,82	41,23
Kombo-2	21,47	50,58	13,33	72,63
Kombo-3	13,24	40,03	13,82	49,79
Kombo-4	14,49	40,83	13,82	49,42

Dari seluruh tabel dan gambar diatas terlihat bahwa penambahan radius proteksi Rp menyebabkan penurunan performansi sistim sekunder yang diakibatkan berkurangnya area aktif dari sistim sekunder sehingga dapat dianalisa bahwa Rp merupakan salah satu faktor utama batas teoritis dari jumlah SU yang aktif. Dari tabel 4.9 dan tabel 4.10 diatas terlihat bahwa dari seluruh metode mitigasi interferensi yang ditawarkan mampu memberikan peningkatan performansi, baik kapasitas maupun jumlah SU yang aktif. Peningkatan performansi sistem yang diberikan masing-masing metode bervariasi, akan tetapi memiliki pola kesamaan yakni metode MI-2 dengan Kombo-1, MI-3 dengan Kombo-2, dan Kombo-3 dengan Kombo-4, sedangkan metode MI-1 sendiri cenderung turun naik performansinya dan nilainya hampir sama dibandingkan dengan kondisi original sehingga dapat dianalisa bahwa metode MI-1 tidak memenuhi ekspektasi dalam kestabilan sistim.

Metode mitigasi interferensi dengan men-*switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi *overall* terbesar (MI-2) dibandingkan metode kombinasi antara metode

switch 'off' user yang mengalami interferensi *overall* terbesar (MI-1) dengan metode *switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi *overall* terbesar (MI-2) atau disebut Kombo-1, memiliki nilai performansi yang cenderung sama sehingga dapat dianalisa bahwa penggunaan metode *switch 'off'* user yang mengalami interferensi *overall* terbesar (MI-1) pada Kombo-1 tidak memberikan pengaruh berarti dan dapat dikatakan bahwa metode ini tidak memenuhi ekspektasi karena metode Kombo-1 tidak lebih baik dari metode MI-2.

Metode kombinasi antara metode *switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi terbesar terhadap PU (MI-3) dan metode *switch 'off'* user yang mengalami interferensi *overall* terbesar (MI-1) atau disebut juga Kombo-3 dibandingkan dengan kombinasi antara metode *switch 'off'* user yang mengalami interferensi *overall* terbesar (MI-1), metode *switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi *overall* terbesar (MI-2), dan metode *switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi terbesar terhadap PU (MI-3) atau disebut juga Kombo-4 memiliki nilai performansi yang cenderung sama satu sama lain tapi masih lebih besar dibandingkan metode MI-1 dan MI-2 sehingga dapat dianalisa bahwa metode ini masih memenuhi ekspektasi peningkatan performansi, akan tetapi metode Kombo-3 layak jadi alternatif bagi metode MI-1 dan MI-2 karena lebih sederhana dibandingkan Kombo-4 dengan performansi yang hampir sama.

Metode *switch 'off'* user yang memberikan interferensi terbesar terhadap PU (MI-3) merupakan metode terbaik dengan peningkatan performansi terbesar, baik kapasitas maupun jumlah SU yang aktif. Kombinasi antara metode *switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi *overall* terbesar dengan metode *switch 'off'* user yang memberikan interferensi terbesar terhadap PU (Kombo-2) merupakan metode alternatif yang patut pula dipertimbangkan karena walaupun masih kalah dalam peningkatan performansi dibandingkan MI-3, Kombo-2 memperlihatkan konsistensi peningkatan performansi dibandingkan MI-3 pada jumlah potensi user diatas 10 seperti terlihat pada gambar 4.1 dan gambar 4.3 dan mampu mendominasi diatas seluruh metode yang lain yang mulai saturasi dan menurun kapasitasnya.

Dari analisa diatas dapat disimpulkan bahwa dari keempat metode kombinasi yang ditawarkan, metode kombinasi antara metode *switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi *overall* terbesar dengan metode *switch 'off'* user yang memberikan interferensi terbesar terhadap PU (Kombo-2) dan kombinasi antara metode *switch 'off'* user yang membangkitkan interferensi terbesar terhadap PU dan metode *switch 'off'* user yang mengalami interferensi *overall* terbesar (Kombo-3) layak jadi alternatif tambahan untuk mitigasi interferensi ataupun bisa menjadi pengganti untuk metode MI-1 dan MI-2.

KESIMPULAN

Setelah melakukan beberapa simulasi pada penelitian ini, kemudian dilakukan pengambilan kesimpulan yang akan dibandingkan dengan rumusan masalah dan hipotesa pada Bab I. beberapa kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian tesis ini antara lain:

1. Penggunaan teknik mitigasi interferensi dan kombinasi mitigasi interferensi pada sistim uplink distributed binary power allocation memberikan peningkatan kapasitas per user dan jumlah SU yang aktif dibandingkan dengan keadaan original tanpa mitigasi interferensi.
2. Dalam kondisi area proteksi $R_p=500m$, peningkatan kapasitas rata-rata user tertinggi diberikan oleh metode MI-3 dengan 9.257 dan diikuti oleh metode Kombo-2 dengan 9.150 yang diperoleh pada kondisi jumlah potensi user 9, sedangkan peningkatan jumlah pengguna sekunder tertinggi diberikan oleh metode MI-3, kemudian diikuti oleh metode Kombo-2, kemudian metode Kombo-3 dan Kombo-4 yang cenderung sama, kemudian metode MI-2 dan Kombo-1 yang cenderung sama, dan MI-1 yang terlihat seperti tidak mengalami peningkatan jumlah user.
3. Dalam kondisi area proteksi $R_p=600m$, peningkatan kapasitas rata-rata user tertinggi diberikan oleh metode MI-3 dengan 8.465 pada kondisi jumlah potensi user 9, dan diikuti oleh metode Kombo-2 dengan 8.405 pada kondisi jumlah potensi user 16, sedangkan peningkatan jumlah pengguna sekunder tertinggi diberikan oleh metode MI-3, kemudian diikuti oleh metode Kombo-2, kemudian metode Kombo-3 dan Kombo-4 yang cenderung sama, kemudian metode MI-2 dan Kombo-1 yang cenderung sama, dan MI-1 yang terlihat seperti tidak mengalami peningkatan jumlah user.
4. Kombinasi antara metode switch 'off' user yang membangkitkan interferensi overall terbesar dengan metode switch 'off' user yang memberikan interferensi terbesar terhadap PU merupakan metode alternatif yang patut pula dipertimbangkan karena walaupun masih kalah dalam peningkatan performansi dibandingkan Metode switch 'off' user yang memberikan interferensi terbesar terhadap PU, tetapi mampu memperlihatkan konsistensi peningkatan performansi pada jumlah potensi user diatas 10 dan mampu mendominasi diatas seluruh metode yang lain yang mulai saturasi dan menurun kapasitasnya.

SARAN

1. Melakukan penelitian dengan beberapa primary user untuk lebih memperluas analisa masalah interferensi yang muncul.
2. Melakukan penelitian dengan kondisi geografis dan frekuensi yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Akyildiz, I., Won-Yeol, L., Vuran, M., & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks Journal*, pp 2127-2159. Elsevier.
- Alaydrus, Mudrik. (2010). Cognitive Radio: Sistim Radio Cerdas. InComTech, *Jurnal Telekomunikasi dan Komputer*, 1(2).
- Bayat, Siavash., Louie, Raymond H. Y., Li, Yonghui., & Vucetic, Branka. (2011). Cognitive Radio Relay Networks with Multiple Primary and Secondary Users: Distributed Stable Matching Algorithms for Spectrum Access, *IEEE ICC 2011 proceedings*.
- Chen, Kwang-Cheng., Chen, Peng-Yu., Prasad, Neeli., Liang, Ying-Chang., & Sun, Sumei. (2009). Trusted cognitive radio networking, *WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING*, Wiley Interscience.
- COST Action 231. (1999). Digital mobile radio towards future generation systems, final report. Technical report, COST Telecom.
- Devroye, Natasha, Mai Vu, & Tarokh, Vahid. (2008). Cognitive radio networks: Highlights of information theoretic limits, models and design. *IEEE Signal Processing Magazine* 25(6): 12-23.

- Dybdahl, S. (2007). *Radio Resource Allocation for Increased Capacity in Cellular Networks*, Norwegian University of Science and Technology.
- Garcia, Ivan. (2010). *Interference Management in Cognitive Radio Systems*, Aalto University, Finland.
- He, Hao., & Li, Shaoqian. (2010). Distributed Relay Selection and Channel Choice in Cognitive Radio Network, *International Journal of Information and Communication Engineering*, 6:3.
- Ifeh,Kennedy. (2012). *Transmit Power Control for Cognitive Radio Networks:Challenges, Requirements, and Options*, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.
- Li, Y., Wang, P., &Niyato, D. (2009). *Optimal Power Allocation for Secondary Users in Cognitive Relay Networks*, Nanyang Technological University, Singapore.
- Luo, Changqing ., Yu, F. Richard., Ji, Hong.,& Leung, Victor C.M. (2010). Distributed Relay Selection and Power Control inCognitive Radio Networks with Cooperative Transmission, *IEEE ICC 2010 proceedings*.
- Mitola III, Joseph. (2000). *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Royal Inst. Technology. (KTH), Stockholm, Sweden.
- M. Haddad, A.M. Hayar, G.E. Øien, S.G. Kiani. (2008). Uplink distributedbinary power allocation for cognitive radio networks, *proceedingof CrownCom 2008*, Singapore.
- Nieto, R., & Ortega, D. (2008). *Power Allocation in Cognitive Radio*, Norwegian Univ. of Science and Technology, Norway.
- Wyglinski, A., Nekovee, M., &Hou, Y.(2008). *Cognitive RadioCommunications and NetworksPrinciples and Practice*, Elsevier.
- Zayen, B., Haddad, M., Hayar, A., &Øien, G. (2008). Binary power allocation for cognitive radio networks with centralized and distributed user selection strategies, *Journal of Physical Communication*, 1(3),pp. 183-193, Elsevier.