

Manajemen Spectrum Sharing Terdistribusi pada Teknologi Dynamic Spectrum Access untuk Radio Kognitif

Ibrahim Zein Abdillah, Suwadi, dan Wirawan

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: suwadi@ee.its.ac.id

Abstrak— Tuntutan komunikasi nirkabel yang handal dan kapasitas sistem yang tinggi tidak terlepas dari ketersediaan *resource* berupa spektrum frekuensi yang cukup. Pengelolaan spektrum yang efisien dan ketersediaan spektrum yang semakin terbatas menjadi latar belakang terciptanya konsep radio kognitif. Radio kognitif menerapkan metode *Dynamic Spectrum Access* (DSA), yang memungkinkan pengguna yang tidak terdaftar pada lisensi spektrum atau dikenal dengan *secondary user* menggunakan lisensi spektrum *primary user* yang tidak dipakai pada saat itu. Dengan teknologi DSA dan *spectrum sensing*, *wireless device* mampu menganalisa *environment* dan beradaptasi berdasarkan hasil analisa tersebut. Manajemen *spectrum sharing* dibutuhkan pada arsitektur radio kognitif terdistribusi agar pemanfaatan spektrum dan *fairness* antar pengguna menjadi optimum.

Penelitian pada tugas akhir ini adalah simulasi penerapan mekanisme *spectrum sharing* pada arsitektur radio kognitif terdistribusi menggunakan metode *spectrum sharing rule C*. Pada tugas akhir ini juga dilakukan analisis perbandingan hasil antara alokasi kanal *secondary user* tanpa *spectrum sharing* dan dengan menggunakan *spectrum sharing*. Hasil simulasi yang didapat yaitu mekanisme *spectrum sharing rule C* menghasilkan alokasi kanal bagi *secondary user* yang bebas konflik satu sama lain dengan jumlah kanal yang didapat dijamin melebihi dari *Poverty Line* mereka. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa dengan menggunakan *spectrum sharing* nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* sistem lebih besar dari pada alokasi kanal *secondary user* tanpa *spectrum sharing*. Efisiensi peningkatan maksimum mencapai 28,5% untuk *Spectrum utilization* dan 30,3% untuk *Fairness*.

Kata Kunci— Radio kognitif, *Dynamic Spectrum Access*, *Spectrum sharing* terdistribusi, *Spectrum Utilization*, *Fairness*

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN teknologi di bidang telekomunikasi nirkabel dan aplikasi multimedia sangat pesat. 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. 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 [1].

Radio kognitif menerapkan teknologi *Dynamic Spectrum Access* (DSA) dimana teknologi ini 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*. Tidak hanya DSA, radio kognitif juga menerapkan *spectrum sensing* yaitu kemampuan untuk mengindera dan mengumpulkan informasi dari lingkungan dimana dia beroperasi. Selain itu radio kognitif dapat mengubah parameter dari *secondary user* sesuai dengan hasil dari penginderaan dengan cepat [2].

Sistem terdistribusi merupakan arsitektur jaringan radio kognitif dimana setiap *user* (pengguna) mempunyai keputusan sendiri dalam strategi akses spektrumnya. Manajemen *spectrum sharing* diperlukan pada arsitektur terdistribusi ini agar terjadi mekanisme *sharing* yang baik dan efisien [3]. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai mekanisme *spectrum sharing* yang bertujuan untuk memaksimalkan pemanfaatan spektrum dan memperhatikan *fairness* antar pengguna. Pada bagian II akan dijelaskan mengenai permasalahan dan pemodelan sistem. Bagian III berisi tentang parameter sistem. Sedangkan bagian IV berisi simulasi serta bagian V berisi tentang analisis hasil simulasi. Kesimpulan dibahas pada bagian VI.

II. PEMODELAN SISTEM

A. Permasalahan

Pada *distributed spectrum sharing* (terdistribusi) setiap pengguna memiliki keputusannya sendiri dalam strategi dan manajemen akses spektrum berdasarkan informasi lokal. Kebebasan yang diberikan kepada tiap pengguna mengakibatkan penggunaan yang tidak seimbang antar *user*. Dengan kata lain terdapat satu *user* atau lebih yang mempunyai efisiensi dan kualitas lebih dibandingkan pengguna lainnya. Agar semua pengguna mendapatkan kapasitas dan kualitas yang adil satu sama lain maka perlu

diterapkan *cooperative & collaborative sharing* pada sistem terdistribusi. *Colaborative & collaborative sharing* merupakan strategi perilaku akses *spectrum sharing* dimana setiap *user* berkolaborasi untuk mewujudkan satu tujuan dengan performa yang sama. Dengan kata lain *cooperative & collaborative sharing* memperhatikan *fairness* antar *user*. Pada mekanisme *sharing* ini setiap *user* berbagi akses spektrum atau kanal yang digunakan dengan setiap tetangga pada arsitektur terdistribusi tersebut.

B. Model Sistem

Dimisalkan pada suatu daerah terdapat sejumlah P *primary user* dan N *secondary user*. Diasumsikan spektrum yang digunakan dibagi menjadi M kanal *nonoverlapping*. *Secondary user* dimodelkan seperti *access point* yang dilengkapi radio kognitif dan saling berkolaborasi. *Secondary user* dapat mengidentifikasi *primary user* terdekat dan dapat memanfaatkan spektrum lokal yang tidak digunakan. Setiap *node secondary user* mengamati satu set kanal yang tersedia (didefinisikan oleh matriks ketersediaan kanal) yang dapat digunakan tanpa mengganggu pemilik spektrum / *primary user*. Dilengkapi dengan radio kognitif, *secondary user* dapat berkomunikasi melalui kanal *multiple non-consecutive*. Setiap *secondary user* melakukan broadcast mengenai penggunaan kanal yang mereka gunakan. Hal ini dilakukan untuk mekanisme manajemen *spectrum sharing*.

Pada arsitektur radio kognitif kolaboratif terdistribusi, *node (secondary user)* mengamati kondisi lingkungan dan perilaku *node* tetangga, kemudian beradaptasi secara langsung untuk penggunaan spektrum mereka. Menggunakan aturan spektrum, masing-masing *node* memeriksa apakah perlu untuk memperbarui pilihan kanal. Jika pembaruan diperlukan, *node* bergantung pada aturan untuk menentukan kanal yang tepat untuk digunakan. Aturan *spectrum sharing* menentukan berapa banyak dan kanal mana yang bisa digunakan oleh *node*, sehingga *spectrum utilization* dan *fairness* dapat dicapai. *Spectrum utilization* merepresentasikan pemanfaatan total jumlah kanal semua *node* yang bebas dari konflik, sedangkan *fairness* merupakan tingkat keadilan sistem dari jumlah *node* yang didapatkan.

III. PARAMETER SISTEM

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

1. Spektrum yang digunakan adalah 2300MHz-2400MHz dibagi menjadi 10 kanal *nonoverlapping* diindeks mulai dari kanal 1-10 dengan bandwidth tiap kanal sebesar 10MHz.
2. Manajemen *spectrum sharing* dilakukan dengan menggunakan *rule C*.
3. Jumlah *user* bervariasi antara lain sebagai berikut :
 - a) 1 *primary user* dan 3 *secondary user*, dilakukan pada area 500m x 500m.
 - b) 3 *primary user* dan 5 *secondary user*, dilakukan pada area 750m x 750m.
 - c) 3 *primary user* dan 10 *secondary user*, dilakukan pada

area 1000m x 1000m.

4. *Transmit Power* (Daya Pancar) *primary user* 100mWatt dan *secondary user* sebesar 25mWatt .
5. Gain antenna *transmitter* dan *receiver* sebesar 5.
6. *Receiver Sensitivity* baik *primary user* dan *secondary user* sebesar -75dBm.
7. Pembangkitan trafik *primary user* menggunakan proses random menggunakan distribusi eksponensial dengan rata-rata holding time 5 menit dan laju kedatangan *primary user* $\lambda_p = 6$ PU/Jam atau rata-rata inter-arrival time 10 menit.
8. Laju kedatangan *secondary user* $\lambda_s = 2$ SU/hari dengan rata-rata holding time 12 jam.
9. Waktu pengamatan dibatasi selama 1 jam atau 3600 detik.

IV. SIMULASI

Pengerjaan simulasi diawali dengan pembangkitan *user* dan pemodelan kanal dan trafik. Setelah itu dilanjutkan dengan perhitungan ketersediaan kanal, *interference constraint* dan *poverty line secondary user*. Simulasi dilakukan dengan dua skenario yang berbeda yaitu alokasi kanal *secondary user* tanpa *spectrum sharing* dan dengan menggunakan *spectrum sharing rule C*, kemudian hasil dibandingkan satu sama lain.

A. Pembangkitan Primary User dan Secondary User

Primary dan *secondary user* dibangkitkan dengan letak *random* sesuai jumlah dan pada area yang sudah ditentukan pada parameter diatas. Jarak maksimal yang dapat ditempuh oleh *user* ditentukan melalui perhitungan propagasi dengan model *log-distance pathloss* [4]. Lingkungan diasumsikan dengan kondisi urban dan koefisien *pathloss exponent* yaitu 3,5 Dengan ketinggian *node user* diasumsikan 2,5 meter dari permukaan tanah, maka didapatkan jangkauan *node* melalui persamaan berikut ini :

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{4\pi f d}{c} \right)^{-\alpha} \frac{1}{d^4} \quad (1)$$

Dari perhitungan melualui persamaan tersebut didapatkan $d_p = 186,6m$ dan $d_s = 145m$.

Gambar 1 adalah skema pembangkitan *user* untuk 1 *primary user* dan 3 *secondary user* yang dilakukan pada area 500m x 500m.

Setelah *user* dibangkitkan secara *random* maka didapatkan koordinat x dan y setiap *user*. Setelah itu akan dihitung jarak dari setiap *secondary user* terhadap *primary user* dan terhadap *secondary user* lainnya. Dari perhitungan jarak *primary user* dan *secondary user* tersebut akan didapatkan *secondary user* mana saja yang dapat memanfaatkan spektrum *primary user* ketika tidak aktif. Jika jarak dari *primary user* terhadap *secondary user* tersebut kurang dari *coverage primary user* dan jangkauan *sensing primary user* ($\Delta_{pu_su} < d_p + d_s$) maka ketersediaan kanal *secondary user* tersebut dipengaruhi oleh aktif dan tidaknya *primary user* tersebut.

Perhitungan jarak selanjutnya adalah jarak antar *secondary user*. Dari perhitungan jarak antar *secondary user* ini akan diketahui siapa saja tetangga dari tiap-tiap *node secondary user*. Hal ini sangat diperlukan untuk mekanisme *spectrum sharing* yang akan dilakukan dalam simulasi ini. Mekanisme *spectrum sharing* atau proses berbagi kanal dapat dilakukan hanya pada tetangga dari *node* itu sendiri.

B. Perhitungan Ketersediaan Kanal, Interference Constraint, dan Poverty Line Secondary User

Ketersediaan kanal dipengaruhi oleh kemunculan dari *primary user*. Semakin banyak *primary user* yang aktif maka semakin kecil ketersediaan kanal bagi *secondary user* yang dipengaruhi oleh *primary* tersebut. Ketersediaan kanal *secondary user* direpresentasikan sebagai matriks dengan persamaan sebagai berikut :

$$(L) = \{l_{m,n} | l_{m,n} \in \{0,1\}\}_{M \times N}, \text{ dimana}$$

$$l_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{kanal } m \text{ tersedia untuk node } n \\ 0, & \text{kanal } m \text{ diduduki oleh primary user} \end{cases} \quad (2)$$

Dimana :
 M=Total jumlah kanal
 N=Total jumlah node (*secondary user*)
 m=Indeks kanal
 n=Indeks *node* (*secondary user*)

Interference Constraint atau pembatasan interferensi merepresentasikan apakah *secondary user* n dan *secondary* k itu konflik atau bisa saling *reuse* kanal yang sama. Pada simulasi ini *node* n dikatakan konflik dengan *node* k ketika jarak antara dua *node* tersebut yaitu 2 kali jarak jangkauan maksimum. *Interference Constraint* direperesentasikan melalui persamaan berikut ini :

$$(C) = \{c_{n,k} | c_{n,k} \in \{0,1\}\}_{N \times N}, \text{ dimana}$$

$$c_{n,k} = \begin{cases} 1, & \text{node } n \text{ dan } k \text{ saling konflik} \\ 0, & \text{node } n \text{ dan } k \text{ reuse kanal yang sama} \end{cases} \quad (3)$$

Dari perhitungan ketersediaan kanal dan *Interference Constraint* yang sudah dilakukan maka dapat dihitung total jumlah kanal yang tersedia untuk *node* n dengan persamaan :

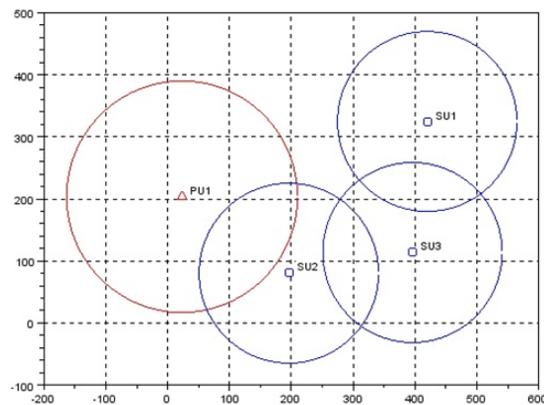
$$L(n) = \sum_{m=1}^M l_{m,n} \quad (4)$$

Dapat dihitung juga jumlah total *node* yang konflik dengan *node* n tersebut dengan persamaan berikut :

$$d(n) = \sum_{k=1}^N c_{n,k} \quad (5)$$

Setelah mendapatkan jumlah total tersebut, perhitungan *Poverty Line* tiap *node* dapat dilakukan dengan memasukkan nilai total tadi kedalam persamaan berikut ini :

$$PL(n) = \left\lfloor \frac{L(n)}{d(n)+1} \right\rfloor \quad (6)$$



Gambar. 1. Contoh skema pembangkitan user untuk 1 *primary user* dan 3 *secondary user* yang dilakukan pada area 500m x 500m. Pembangkitan user ini dilakukan secara random pada batasan wilayah yang ditentukan. Jangkauan user disesuaikan dengan hasil perhitungan.

Perhitungan *Poverty Line* dilakukan untuk mengetahui berapa jumlah minimum kanal yang didapatkan oleh *node* pada sistem yang terdistribusi.

C. Alokasi Kanal Secondary User

Alokasi Kanal Secondary User Tanpa Spectrum Sharing

Jika setiap *secondary user* tidak melakukan *spectrum sharing* maka alokasi kanal hanya berdasarkan kemampuan *sensing node* masing-masing. Terdapat perubahan alokasi kanal hanya ketika *primary user* datang dan melakukan pendudukan pada kanal yang telah digunakan *secondary user* sebelumnya.

Pada alokasi kanal tanpa *spectrum sharing* tidak ada jaminan bahwa kanal yang didapat tidak saling konflik dengan kanal dari tiap *node* tetangga. Jumlah kanal yang didapat hanya sesuai kemampuan *sensing* dari *node* itu sendiri, dengan kata lain tidak ada jaminan juga bahwa jumlah kanal yang didapat melebihi dari *Poverty Line* mereka.

Alokasi Kanal Secondary User Menggunakan Spectrum Sharing Rule C

Aturan *spectrum sharing* menentukan berapa banyak dan kanal mana yang bisa digunakan oleh *node*, sehingga *fairness* dan pemanfaatan maksimal dapat dicapai. Pada tugas akhir ini manajemen *spectrum sharing* menggunakan aturan / *rule* C. Aturan tersebut menyebutkan bahwa “Sebuah *node* n memilih kanal dari kanal-kanal *idle*. Hanya jika terjadi kanal *idle* tidak cukup untuk mencapai $PL(n)$, *node* n merebut kanal dari *node* “*richer*” (*node* yang lebih kaya). Jumlah kanal yang dapat direbut dari *node* r yang lebih kaya adalah $\max\{0, \min\{C(r) - PL(n), PL(n) - C(n)\}\}$ dimana $C(n)$ dan $C(r)$ adalah *current spectrum usage* (penggunaan spektrum pada saat itu) dari *node* n dan r”[5].

Sebuah *node* tetangga dikatakan “*richer*” / lebih kaya dari n jika *node* tersebut menggunakan lebih banyak kanal dari pada n, jika sebaliknya maka *node* tersebut disebut “*poorer*” / lebih miskin. Aturan C memungkinkan *node* yang telah mencapai *poverty line* mereka untuk menangkap kanal *idle* tambahan. Hal ini masih memungkinkan *node* dibawah *poverty line* mereka untuk mendapat kanal dari *node* tetangga yang lebih kaya. Namun setiap pengambilan ini tidak bisa mengurangi spektrum *node* yang lebih kaya menjadi dibawah *poverty line*

Tabel 1.
Klasifikasi kategori kanal pada *spectrum sharing rule C*

Kategori	Nama	Definisi
R	<i>Reserved</i>	Kanal yang diduduki oleh tetangga yang lebih miskin dari node n serta sejumlah kanal PL(n) yang mempunyai indeks terkecil dari setiap <i>node</i> yang lebih kaya.
O	<i>Conflicting</i>	Kanal yang diduduki oleh tetangga <i>node</i> n tetapi tidak berada pada R (<i>reserved</i>).
I	<i>Idle</i>	Kanal yang tidak diduduki oleh setiap tetangga <i>node</i> n.

node yang mengambil . Hal tersebut dimaksudkan supaya tidak terjadi siklus perebutan kanal satu sama lain secara bergantian.

Aturan C mengharuskan setiap *node* memiliki pengetahuan tentang jumlah tetangga $d(n)$, penggunaan kanal *node* tetangga dan Poverty Line masing-masing *node* tetangga. Hal ini dapat dilakukan dengan setiap *node* melakukan *broadcast* penggunaan kanal mereka.

Karena *node* dapat memperbarui penggunaan spektrum mereka, konflik terjadi ketika dua *node* tetangga secara bersamaan beralih ke kanal *idle* yang sama. Oleh karena itu setelah *node* memutuskan untuk berpindah ke suatu kanal, mereka mendengarkan / melakukan deteksi dalam waktu yang singkat sebelum melakukan transmisi. Jika terdapat aktivitas pada kanal selama waktu tunggu tersebut, *node* memberi identifikasi pada kanal sebagai kanal sibuk dan membatalkan perpindahan yang akan dilakukan.

Berikut akan dijelaskan tahapan-tahapan mekanisme *spectrum sharing rule C* diawali dengan fase I yaitu klasifikasi kanal kemudian dilanjutkan dengan fase II yaitu pemilihan kanal

Fase I : Klasifikasi kanal.

Pada fase ini, *node* n mengelompokkan kanal yang tersedia dalam 3 kategori yaitu: *reserved* (R), *conflicting* (O), dan *Idle* (I). Tabel 1 mendeskripsikan definisi dari ketiga kategori kanal tersebut. Kategori kanal *reserved* (R) meliputi kanal yang tidak diperkenankan bagi *node* n. Hal ini dimaksudkan agar mencegah *node* n mengambil kanal dari *node* yang lebih miskin atau terlalu banyak merebut kanal dari *node* yang lebih kaya. Sedangkan kategori kanal *conflicting* (O) dan *idle* (I) mengidentifikasi kanal yang dapat diambil oleh *node* n. Namun prioritas kanal *idle* untuk diduduki lebih besar mengingat pendudukan pada kanal *idle* ini tidak mengganggu tetangga lainnya.

Fase II : Pemilihan kanal.

Pada fase ini, *node* n memilih kanal untuk digunakan dari kelompok kanal I dan O. Dalam hal ini selalu memilih pada kanal I terlebih dahulu. *Node* n akan mengambil kanal dari kategori O hanya jika jumlah kanal *idle* kurang dari PL(n). Ketika memilih set kanal I atau O, *node* n diwajibkan untuk lebih memprioritaskan pemilihan kanal dari okupasi kanal *node* n itu sendiri. Pada *rule C*, tiap *node* menyesuaikan semua kanalnya ke dalam I, jika masih belum mencapai PL(n) maka *node* akan memilih secara sekuensial penggunaan mereka dari $O \cap C(n)$ dan $O \setminus C(n)$. Selama pemilihan kanal, tiap *node*

selalu mulai dari kanal dengan indeks kanal terkecil terlebih dahulu.

Mekanisme *spectrum sharing* diulangi secara terus menerus untuk setiap *node* sampai sistem mencapai *equilibrium*. *Equilibrium* merupakan kondisi ketika okupasi kanal tidak ada yang saling konflik dengan *node* tetangga dan jumlah kanal yang didapat tidak boleh lebih kecil dari *Poverty Line*.

D. Perhitungan Spectrum Utilization dan Fairness

Setelah alokasi kanal *spectrum sharing* didapatkan, selanjutnya akan dihitung *Spectrum Utilization* dan *Fairness*. *Spectrum Utilization* dan *Fairness* dihitung sesuai *Conflict-free Channel Assignment* atau alokasi kanal yang bebas dari konflik yang direpresentasikan sebagai matriks melalui persamaan sebagai berikut :

$$(A) = \{a_{m,n} | a_{m,n} \in \{0,1\}\}_{M \times N}, \text{ dimana}$$

$$a_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{kanal } m \text{ dialokasikan untuk } node \ n \\ 0, & \text{yang lain} \end{cases} \quad (7)$$

Namun *Conflict-free Channel Assignment* (A) harus memenuhi semua batasan yang didefinisikan oleh *Interference Constraint* (C), dimana

$$a_{m,n} \cdot a_{m,k} = 0, \text{ jika } c_{n,k} = 1, \forall n, k < N, m < M \quad (8)$$

Pembatasan tersebut menyebutkan jika *node* n dan k saling konflik atau nilai dari $c_{n,k} = 1$ maka kanal m hanya dialokasikan untuk salah satu dari *node* tersebut.

Spectrum Utilization merepresentasikan pemanfaatan total jumlah kanal semua *node* yang bebas dari konflik. *Spectrum Utilization* dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$U = \sum_{n=1}^N RA(n) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{m,n} \cdot l_{m,n} \quad (9)$$

Dimana,

$RA(n) = \sum_{m=1}^M a_{m,n} \cdot l_{m,n}$, merepresentasikan jumlah kanal yang didapat oleh *node* n.

Fairness merupakan tingkat keadilan sistem dari jumlah *node* yang didapatkan yang direpresentasikan dengan persamaan berikut ini :

$$F = \sum_{n=1}^N \log RA(n) = \sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^M a_{m,n} \cdot l_{m,n} \quad (10)$$

Semakin besar nilai dari *Spectrum Utilization* dan *Fairness* pada suatu sistem maka penggunaan spektrum semakin efisien dan tingkat keadilan tiap *node* semakin tinggi.

V. ANALISIS HASIL SIMULASI

A. Perbandingan Hasil Antara Tanpa Spectrum Sharing dengan Menggunakan Spectrum Sharing Rule C

Pada bagian ini akan dibahas analisis perbandingan besarnya nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* yang dilakukan dengan variasi jumlah *user* yang berbeda-beda seperti yang sudah dijelaskan pada bagian model sistem diatas.

Tabel 2.

Rata-rata nilai *Spectrum Utilization & Fairness* dari hasil simulasi

	Tanpa <i>spectrum sharing</i>		Dengan <i>spectrum sharing rule C</i>	
	U	F	U _{rc}	F _{rc}
1 primary user & 3 secondary user	12,682	1,624	15,326	2,033
3 primary user & 5 secondary user	20,644	2,636	23,98	3,168
3 primary user & 10 secondary user	37,754	4,870	45,026	6,037

Simulasi dilakukan sebanyak 500 kali dengan bentuk topologi yang berbeda-beda. Gambar 2 merupakan hasil dari simulasi pada topologi 3 *primary user* dan 5 *secondary user*, sementara Gambar 3 merupakan CDF dari nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* yang dihasilkan.

Dengan menggunakan mekanisme *spectrum sharing*, setiap *node secondary user* yang bertetangga saling berbagi spektrum dengan menghasilkan kanal yang bebas konflik satu sama lain. Jumlah kanal yang didapat tiap *node* juga dijamin lebih dari sama dengan *Poverty Line* mereka. Hal tersebutlah yang menyebabkan pemanfaatan yang optimal pada sistem sehingga total jumlah kanal semua *node* yang bebas konflik atau *Spectrum Utilization* bernilai lebih besar.

Dengan *Spectrum Utilization* yang tinggi tidak menjamin juga bahwa nilai *Fairness* akan tinggi pula. Hal ini dapat dibuktikan dari persamaan *Fairness* yaitu :

$$F = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log A(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^M a_{m,n} \cdot I_{m,n}$$

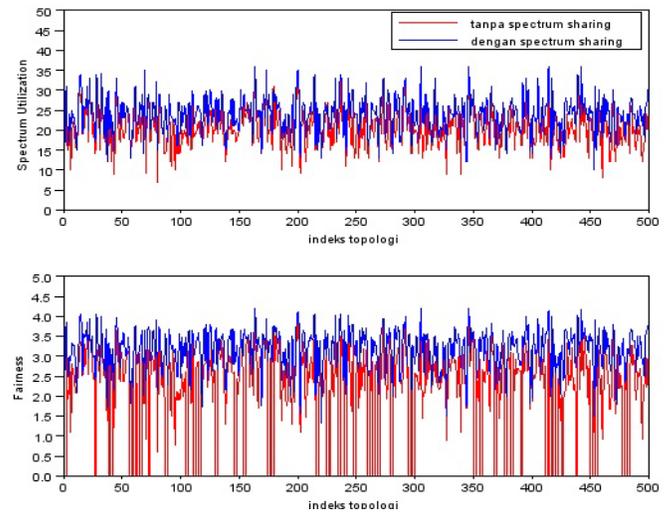
Fairness merupakan penjumlahan logaritmik dari setiap jumlah kanal tiap *node* yang bebas konflik. *Fairness* akan berharga rendah jika salah satu *node* mendapatkan alokasi kanal yang kecil. *Fairness* akan memiliki nilai yang optimum ketika seluruh *node* mempunyai jumlah kanal yang rata atau hampir sama. Jika *node* tidak melakukan *spectrum sharing* maka alokasi kanal hanya berdasarkan kemampuan *sensing node* masing-masing. Sedangkan dengan menggunakan *spectrum sharing rule C* *node* yang miskin atau yang memiliki jumlah kanal yang kecil merebut kanal dari *node* yang lebih kaya sehingga jumlah kanal yang didapat sama atau melebihi dari *Poverty Line*. Mekanisme *sharing* inilah yang membuat *Fairness* dengan menggunakan *spectrum sharing* lebih tinggi.

Rata-rata nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* dari hasil disajikan pada Tabel 2. Dari data rata-rata tersebut tampak bahwa terjadi peningkatan baik *Spectrum Utilization* maupun *Fairness* ketika kondisi sistem menggunakan *spectrum sharing rule C*. Efisiensi peningkatan maksimum mencapai 28,5% untuk *Spectrum utilization* dan 30,3% untuk *Fairness*.

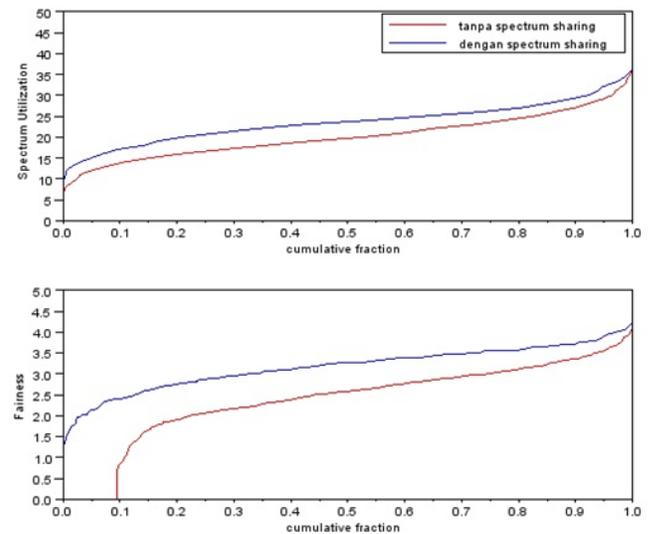
B. Pengaruh Banyaknya Primary User

Banyaknya *primary user* berpengaruh terhadap nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* sistem. Untuk membuktikan hal tersebut, jumlah *primary user* divariasikan antara 1 sampai 10 dan jumlah *secondary user* tetap yaitu 5. Simulasi dilakukan pada area 750 x 750 meter dan dilakukan sebanyak 100 kali sampel topologi *random*. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.

Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin



Gambar. 2. *Spectrum Utilization & Fairness* pada 3 *primary user* dan 5 *secondary user*



Gambar. 3. CDF *Spectrum Utilization & Fairness* pada 3 *primary user* dan 5 *secondary user*

banyak jumlah *primary user* maka nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* semakin kecil. Hal ini disebabkan karena ketersediaan kanal *secondary user* semakin berkurang karena diduduki oleh *primary user*.

C. Pengaruh Bentuk Topologi Terhadap Alokasi Spektrum

Pada simulasi ini, *user* dibangkitkan secara *random* pada suatu area tertentu. Hal ini mengakibatkan terjadinya topologi yang berbeda-beda. Secara garis besar dapat dibagi menjadi dua kategori menurut letak dan status dari *secondary user* yaitu :

1. Topologi dengan *secondary user* saling bertetangga satu sama lain dan melakukan *spectrum sharing*.
2. Topologi dengan *secondary user* terpisah jauh dari *secondary user* lainnya. Dalam hal ini *secondary user* tersebut tidak mempunyai tetangga.

Gambar 5 merupakan salah satu topologi hasil pembangkitan *random* dimana mencakup dua kondisi diatas.

Tabel 3.
Alokasi kanal *secondary user* tanpa *spectrum sharing* dan dengan menggunakan *spectrum sharing rule C*

	Tanpa <i>spectrum sharing</i>		Dengan <i>spectrum sharing</i>	
	Jumlah kanal yang didapat	Alokasi spektrum	Jumlah kanal yang didapat	Alokasi spektrum
SU 1	7	0,7	5	0,5
SU 2	2	0,2	5	0,5
SU 3	1	0,1	1	0,1
SU 4	6	0,6	5	0,5
SU 5	3	0,3	5	0,5

Pada gambar tersebut, tampak bahwa *secondary user* 3 terpisah dengan *secondary user* lainnya. Sedangkan *secondary user* 1 mempunyai tetangga *node secondary user* 5, begitu juga dengan *secondary user* 2 dan *secondary user* 4 yang saling bertetangga. Seperti yang sudah dijelaskan pada bagian alokasi kanal *secondary user* bahwa *node* yang bertetangga dapat melakukan *spectrum sharing* untuk memaksimalkan efisiensi penggunaan spektrum dan *fairness* antar pengguna. Sedangkan jika *secondary user* tidak melakukan *spectrum sharing* maka alokasi kanal hanya berdasarkan kemampuan *sensing node* masing-masing.

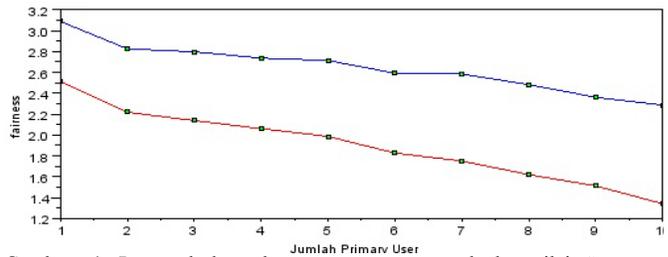
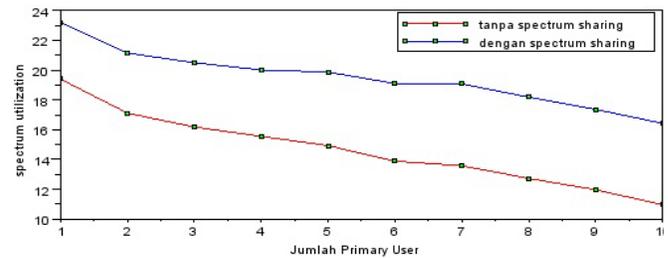
Alokasi spektrum setiap *secondary user* dari hasil simulasi ditunjukkan Tabel 3. Dapat dilihat pada tabel tersebut bahwa alokasi spektrum tidak rata satu sama lain pada alokasi kanal tanpa *spectrum sharing*. Berbeda dengan alokasi kanal tanpa *spectrum sharing*, terlihat pada tabel hasil simulasi tersebut bahwa setelah melakukan mekanisme *spectrum sharing* alokasi kanal bagi *secondary user* menjadi rata. Sebagai contoh *secondary user* 1 yang awalnya mempunyai alokasi spektrum 0,7 turun menjadi 0,5 karena melakukan *sharing* terhadap *secondary user* 5. Sedangkan *secondary user* 5 yang awalnya mempunyai alokasi spektrum 0,3 naik menjadi 0,5.

Pada simulasi bagian ini dapat disimpulkan bahwa pada topologi dimana *secondary user* melakukan *spectrum sharing* dengan *node* tetangganya, alokasi kanal *secondary user* menjadi rata satu sama lain serta proporsional dengan *Poverty Line* masing-masing.

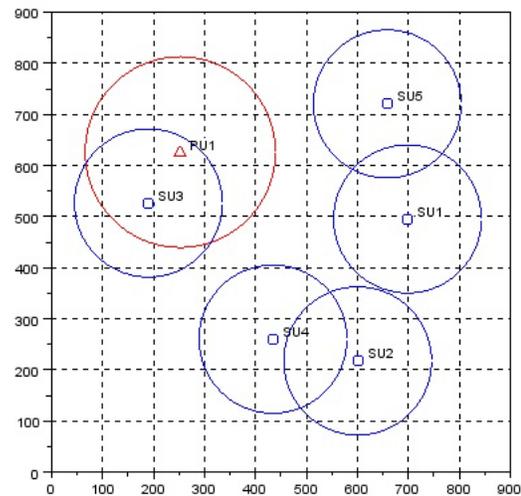
VI. KESIMPULAN

Setelah melakukan simulasi dan analisis data, maka dapat ditarik kesimpulan yaitu teknologi radio kognitif merupakan solusi yang dapat mengatasi keterbatasan sumber daya frekuensi dengan menerapkan teknik *dynamic spectrum access* dan *spectrum sensing*. Manajemen *spectrum sharing* dibutuhkan pada arsitektur radio kognitif terdistribusi agar pemanfaatan spektrum dan *fairness* antar pengguna menjadi optimum. Mekanisme *spectrum sharing rule C* menghasilkan alokasi kanal bagi *secondary user* yang bebas konflik satu sama lain dengan jumlah kanal yang didapat dijamin melebihi dari *Poverty Line* mereka.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan *spectrum sharing* nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* sistem lebih besar dari pada alokasi kanal *secondary user* tanpa *spectrum sharing*. Efisiensi peningkatan maksimum mencapai 28,5% untuk *Spectrum utilization* dan 30,3% untuk *Fairness*. Hasil juga menunjukkan bahwa semakin banyak



Gambar. 4. Pengaruh banyaknya *primary user* terhadap nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness*.



Gambar. 5. Pembangkitan 1 *primary user* dan 5 *secondary user*

jumlah *primary user* pada sistem tersebut maka semakin kecil nilai *Spectrum Utilization* dan *Fairness* yang didapatkan. Bentuk topologi dimana *secondary user* dapat melakukan *spectrum sharing* akan menghasilkan jumlah kanal yang rata dan proporsional dengan *Poverty Line secondary user* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Beibei Wang dan K. J. R. Liu, "Advances in Cognitive Radio Networks : A Survey," *IEEE Journal Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 5. No. 1 (2011, Feb.) 5-23.
- [2] Alexander M. Wyglinski, Maziar Nekove, dan Thomas Hou, *Cognitive Radio Communications and Networks*, USA: Academic Press (2010).
- [3] K. J. Ray Liu and Beibei Wang, *Cognitive Radio Networking and Security*, United Kingdom: Cambridge University Press (2010).
- [4] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications*, New Jersey: Prentice Hall (1996).
- [5] Lili Cao and Haitao Zheng, "Distributed Rule-Regulated Spectrum Sharing," *IEEE Journal On Selected Areas In Communications.*, Vol. 26, No. 1 (2008, Jan) 130-145.