

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam referensi [6] oleh A.F. Isnawati, berjudul “Analisis Unjuk Kerja Sistem Kendali Daya Terpusat pada Jaringan Homogen *Femtocell*”, beliau membahas penggunaan *Centralized Power Control (CPC)* dalam bentuk tertentu. Penelitian ini mengkaji kelayakan vektor kekuatan pengguna untuk memberikan solusi ketika pengguna memiliki nilai non-negatif. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa, dalam kondisi sistem yang layak, semua nilai daya pengguna akan positif dan pengguna dapat mencapai target *Signal-to-Noise Ratio (SINR)* yang telah ditentukan sebelumnya. Targetnya adalah 13 dB untuk sistem 5 pengguna dan 9,5 dB untuk sistem 10 pengguna. Namun, ketika kondisi yang memungkinkan tidak terpenuhi, beberapa pengguna akan menemui nilai negatif dari kemampuan pengguna untuk mengontrol daya dan tidak dapat mencapai target SINR.

Dalam referensi [7] oleh X. kang, berjudul “*Distributed Power Control of Spectrum Sharing Femtocell Network Using Stackelberg Game*” membahas penerapan metode distribusi daya terdistribusi untuk jaringan *femtocell* pada spektrum yang berbeda, di mana sel pusat dikelilingi oleh beberapa *femtocell*. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa *macrocell* dapat melindungi dirinya sendiri dengan memodifikasi nilai interferensi dari *femtocells*. Penelitian ini menggunakan metode Stackelberg Game yang diformulasikan untuk meningkatkan kepuasan pengguna pada sel total dan *femtocell*. Hasil menunjukkan bahwa algoritma yang digunakan dalam penelitian ini sangat efisien dalam distribusi daya yang didistribusikan di jaringan *femtocell*. Metode ini memperhitungkan pengaruh interferensi pada sistem dan memperhitungkan kepuasan pengguna dalam sel total dan sel *femtocell*. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan jaringan seluler *femtocell*.

Referensi [8] oleh X. Li, berjudul “*Downlink Energy Control in the Common Femtocell Macrocell Overlay*” menjelaskan penggunaan kontrol daya *downlink* untuk mengurangi interferensi pada *overlay macrocell femtocell*.

Penelitian ini secara khusus melihat mitigasi interferensi pada *downlink* dari base station rumah ke pengguna macrocell terdekat sehingga QoS dapat terjamin baik dari sel, pengguna *macrocell* maupun pengguna *femtocell*. Karena interferensi berasal dari sel heterogen di *co-channel*, penelitian ini mengusulkan penggunaan *co-Power Control*, manajemen saluran dan prosedur kontrol penerimaan sehingga prioritas total pengguna sel selalu terjamin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skema yang diusulkan sangat efektif dalam mengurangi interferensi dan menjaga kualitas layanan pada sel besar dan sel *femtocell*. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan jaringan seluler *femtocell*.

Penelitian oleh A.F. Isnawati, yang berjudul “*Autonomous Control of Distributed Power in a Multichannel Cognitive Femtocell Network: Feasibility and Convergence*” [5] membahas kemungkinan dan kondisi konvergen metode sistem kontrol daya terdistribusi pada jaringan *femtocell*. Berdasarkan hasil penelitian, metode HDCPC dengan daya 0,5 lebih hemat energi dibandingkan dengan metode *Distributed Constrained Power Control* (DCPC) dan lebih efisien dalam penggunaannya dibandingkan dengan *Generalized Distributed Power Control* (GDCPC). Metode HDCPC yang diusulkan dapat diimplementasikan secara efektif bila tidak ada opsi pengiriman saluran. Selain itu, setelah pengguna beralih ke saluran lain, metode HDCPC juga dapat memastikan target *rasio signal-to-noise* (SINR) tercapai dan konsumsi daya dapat dikurangi. Dalam hal ini, penelitian ini memberikan kontribusi penting untuk pengembangan metode yang lebih efisien dan efektif untuk mengendalikan distribusi energi dalam jaringan *femtocell*.

Penelitian [9] oleh A.F. Isnawati, berjudul “*Feasibility Analysis of Distributed Power Control System in Cognitive Radio Network*” membahas kondisi pengguna terdistribusi pada jaringan *Cognitive Radio Network* (CRN), yang membutuhkan teknologi kontrol daya yang disebut *Distributed Power Control* (DPC). Untuk mengimplementasikan DPC di CRN diperlukan sistem yang memungkinkan dan oleh karena itu dilakukan pengujian untuk menentukan apakah sistem layak atau tidak. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa baik dalam kondisi 5-pengguna dan dalam kondisi 10-pengguna, nilai

mutlak mendapatkan nilai eigen untuk semua *channel* kurang dari 1, dan bahwa kondisi semua pengguna memenuhi *non-negative power vector*. Oleh karena itu, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem DPC dapat diimplementasikan pada CRN.

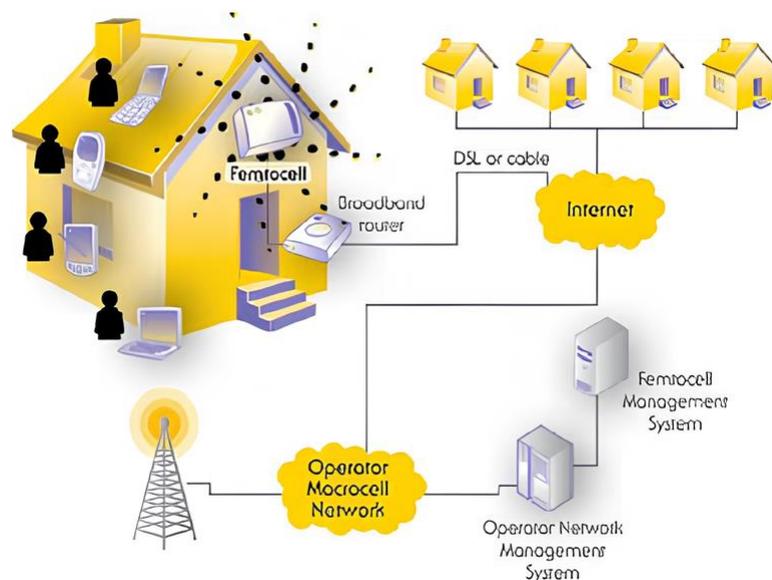
Dalam sebuah penelitian [10] oleh S. Padmapriya, berjudul “*Co-tier and Co-channel Interference Avoidance Algorithm for Femtocell Networks*”, diskusikan penghindaran interferensi *Co-tier* dan *co-channel* menggunakan *Interference-Free Power and Resource block Allocation Algorithm* (IFPRBA). Hasil menunjukkan bahwa interferensi yang terjadi pada algoritma IFPRBA lebih kecil dari batas daya interferensi yang dapat ditolerir, untuk memastikan keberhasilan jaringan. Selain itu, efisiensi alokasi daya dan sumber daya (PRB) serta *throughput* jaringan mencapai maksimum jika dibandingkan dengan alokasi sumber daya kerangka kerja algoritma *femtocell*. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan algoritma IFPRBA pada akses *femtocell* dapat meningkatkan efisiensi jaringan dan layanan yang diberikan.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 *Femtocell*

*Femtocell* adalah titik akses berdaya rendah yang menggunakan teknologi komunikasi seluler untuk menyediakan layanan data dan suara nirkabel kepada pengguna jaringan komunikasi seluler di lingkungan rumah atau kantor. *Femtocell* menggunakan jaringan broadband berdasarkan teknologi TCP/IP yang disediakan oleh ISP, seperti ADSL, HFC, atau jaringan optik, untuk mengirimkan data dan suara dari *femtocell* ke jaringan penyedia layanan seluler. Diagram umum jaringan berbasis *femtocell* dapat dilihat pada Gambar 2.1. Dengan menggunakan *femtocell*, pengguna dapat menikmati layanan komunikasi seluler dengan kualitas lebih baik di lingkungan tertutup seperti rumah atau gedung perkantoran. Biasanya, *femtocell* dapat secara bersamaan memberikan layanan suara kepada setidaknya empat pengguna dalam satu rumah tangga, dan juga mengizinkan pengguna lain

untuk menelepon dan mengakses layanan lain seperti SMS. Selain itu, *femtocell* juga dapat menyediakan layanan data ke banyak pengguna, bergantung pada teknologi antarmuka udara yang digunakan. Misalnya, dengan teknologi UMTS, sebuah *femtocell* dapat memberikan kecepatan data hingga 384 kbps. Dengan demikian, *femtocell* bisa menjadi solusi yang tepat untuk meningkatkan kualitas layanan komunikasi di lingkungan tertutup seperti rumah atau gedung perkantoran [11].



**Gambar 2. 1 Topologi Jaringan *Femtocell* [10]**

Distribusi jaringan *femtocell* yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 menggunakan protokol jaringan TCP/IP dan menerima sinyal utama dari eNB untuk mengakses sel HeNB atau *femtocell* di dalam gedung. *Femtocell* merupakan teknologi yang dirancang untuk meningkatkan kapasitas jaringan nirkabel dan memperluas jangkauan jaringan selular, seperti yang dijelaskan pada [12]. Selain itu, jaringan *femtocell* dapat mengatasi permasalahan yang dihadapi pengguna jaringan selular yang berkomunikasi di tempat yang sulit dijangkau oleh sinyal BTS, seperti gedung bertingkat atau ruangan yang dibatasi dinding beton [11]. Hal ini menjadikan teknologi *femtocell* sebagai solusi efektif dalam memperluas jangkauan

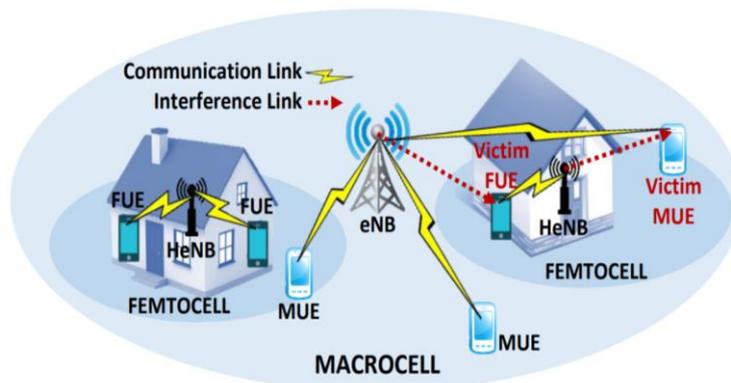
jaringan seluler dan meningkatkan pengalaman komunikasi dengan pengguna.

### **2.2.2 Interference Femtocell**

Interferensi mengacu pada gangguan sistem tertentu. Saat menggunakan jaringan *femtocell*, masalah yang berkaitan dengan interferensi sel-ke-sel sering muncul. Ada dua jenis interferensi dalam jaringan *femtocell*: interferensi *Cross-tier* dan interferensi *Co-tier*. Interferensi terjadi karena pengguna HeNB dan eNB secara bersamaan menggunakan saluran komunikasi yang sama. Interferensi dapat terjadi baik pada *Uplink* maupun *downlink*. Meskipun demikian, upaya untuk mengatasi masalah ini terus dilakukan dengan meningkatkan kinerja jaringan.

#### **2.2.2.1 Cross-tier Interference**

*Cross-tier Interference* merupakan jenis gangguan yang dapat terjadi pada suatu jaringan. Interferensi yang terjadi antara sel makro dan sel mikro karena perbedaan daya dan *coverage*. Meskipun *macro cell* dan *micro cell* memiliki tingkat layanan dan kemampuan yang berbeda, interferensi dapat terjadi karena menggunakan frekuensi dan bandwidth yang sama, seperti terlihat pada Gambar 2.3. Hal ini menyebabkan sinyal dari sel mikro mengganggu sinyal dari sel makro, yang memengaruhi kinerja jaringan secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengurangi gangguan tersebut agar kinerja jaringan dapat ditingkatkan [13].



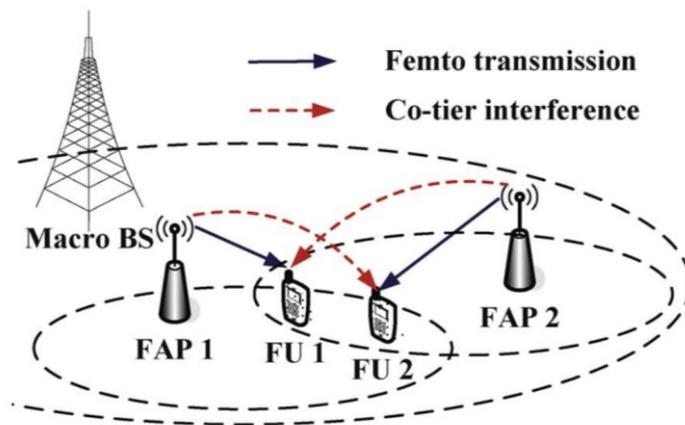
**Gambar 2. 2 Topologi Inteferensi *Cross-tier* Jaringan *Femtocell*. [13]**

Ada beberapa teknik yang dapat digunakan untuk mengatasi interferensi *Cross-tier*, salah satunya adalah metode *Fractional Frequency Reuse* (FFR). Metode ini dianggap sebagai salah satu teknik terbaik untuk mengelola interferensi dalam jaringan *femtocell long-term evolution* (LTE). Tujuan dari teknik ini adalah untuk menghindari interferensi dengan cara membagi seluruh pita frekuensi menjadi beberapa sub-band. Di sini, setiap sub-band dialokasikan secara berbeda ke arah pusat dan tepi sel. Dengan cara ini, sel tetangga dapat menggunakan sub-band yang berbeda untuk mengurangi interferensi, meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum, dan performa jaringan secara keseluruhan. Upaya sedang dilakukan untuk mengembangkan teknologi ini untuk meningkatkan kualitas layanan di jaringan *femtocell* [13].

#### **2.2.2.2 *Co-tier Interference***

Interferensi tipe *Co-tier* terjadi antara elemen-elemen jaringan yang memiliki level yang sama dalam suatu jaringan. Gangguan ini dapat dianggap sebagai sinyal yang tidak diinginkan yang diterima oleh satu *femtocell* dan berasal dari *femtocell* lain. Hal ini dapat menurunkan kualitas proses komunikasi yang sedang berlangsung. Interferensi *Co-tier* biasanya terjadi antara *femtocell* yang

berdekatan, seperti antara rumah dan apartemen atau di dalam gedung yang sama [14]. Upaya untuk mengatasi interferensi tersebut telah dilakukan melalui berbagai teknik seperti pengaturan *femtocell* yang tepat dan pengaturan daya pancar untuk menghindari interferensi yang terjadi pada jaringan *femtocell*.



**Gambar 2. 3 Topologi Interferensi *Co-tier* Jaringan *Femtocell*. [14]**

Gambar 2.3 menunjukkan contoh skenario interferensi *Co-tier* dalam jaringan *femtocell*. Pada gambar, dua pengguna (FU1 dan FU2) berada di area cakupan *femtocell* yang berdekatan. Interferensi *Co-tier* ini dapat menurunkan *Quality of Service* (QoS) yang disediakan oleh jaringan. Oleh karena itu, banyak skema telah diusulkan dalam literatur untuk meminimalkan efek interferensi *Co-tier* [15]. Dalam upaya mengurangi interferensi *Co-tier*, beberapa pendekatan dapat dilakukan, seperti pengaturan frekuensi dan daya pancar, serta pengaturan jarak antar *femtocell*. Dengan mengoptimalkan penggunaan spektrum dan merancang sistem yang efektif, Anda dapat meningkatkan kualitas layanan di jaringan *femtocell*.

### 2.2.3 Power Control

Semua peralatan komunikasi seperti ponsel dan laptop membutuhkan daya untuk beroperasi dan berkomunikasi dengan

perangkat lain. Dalam proses komunikasi, perangkat mengirimkan sinyal yang berisi informasi atau data melalui daya yang dipancarkan.

Kontrol daya mengacu pada pengaturan daya output pemancar seperti stasiun pangkalan atau BTS ke arah *downlink* dan stasiun seluler atau *mobile station* ke arah *Uplink* untuk meningkatkan kapasitas sistem, cakupan, dan kualitas layanan pengguna serta mengurangi konsumsi daya. Digunakan untuk mencapai tujuan tersebut, mekanisme kontrol daya bertujuan untuk memaksimalkan daya yang diterima dari sinyal yang diinginkan sekaligus membatasi interferensi yang ditimbulkan oleh sinyal lain [6].

Kontrol daya digunakan untuk meningkatkan kinerja jaringan. Ada dua jenis kontrol daya utama dalam jaringan *femtocell*: *Centralized Power Control (CPC)* dan *Distributed Power Control (DPC)* [16]. Biasanya, algoritma kontrol daya digunakan untuk tujuan berikut:

- a) Mengurangi interferensi untuk meningkatkan kapasitas jaringan.
- b) Menghemat penggunaan daya sehingga perangkat Anda bertahan lebih lama.
- c) Pengiriman daya yang efisien untuk mendukung *Quality of Service (QoS)*.

Algoritma kontrol daya sangat berguna dalam mengoptimalkan penggunaan bandwidth dalam kondisi interferensi antara MeNB dan HeNB. Ada dua metode pengaturan daya yang dapat diterapkan: *Open Loop Power Setting (OLPS)*, di mana HeNB menyesuaikan daya transmisi berdasarkan hasil pengukuran atau parameter sistem, dan *Close Loop Power Setting (CLPS)*, di mana HeNB menyesuaikan daya transmisi setelah transmisi. Ada cabang Simulasi menggunakan MeNB [16].

Fokus pengamatan dalam penelitian ini adalah pada kontrol daya pada arah komunikasi *Uplink* (*Uplink Power Control*). Oleh karena itu, pengaturan daya pancar pengguna dibuat untuk meminimalkan interferensi. Interferensi tinggi karena area jangkauan *Uplink* dapat dibatasi jika daya transmisi pengguna, yang merupakan penyebab interferensi, tidak dikontrol [6].

#### **2.2.4 Uplink Power Control**

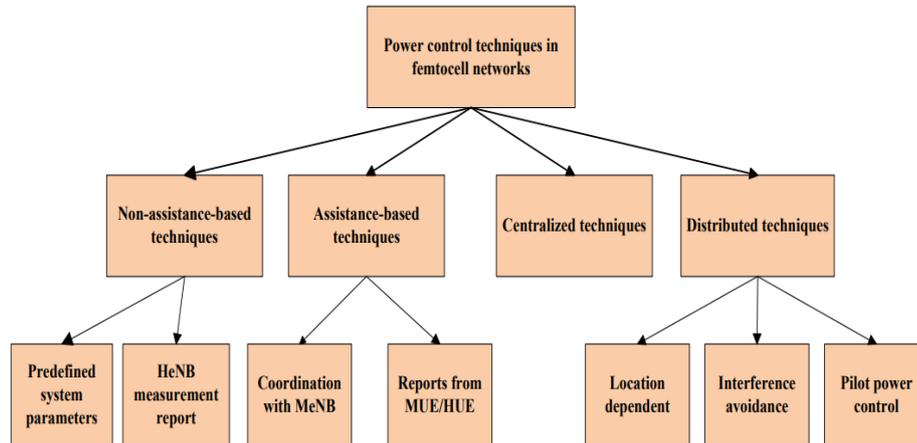
Menurut salah satu sumber [17] oleh H. Zhang, yang berjudul “*Optimization of Uplink Power Control Parameters in Wireless Cellular Network*” *Uplink* pada jaringan LTE memiliki sifat yang disebut sebagai “orthogonal”, yang berarti tidak ada tumpang tindih pengguna atau gangguan dalam sel yang sama. Namun, tumpang tindih atau gangguan hanya dapat terjadi antar sel. Dengan kata lain, *Uplink* pada jaringan LTE dirancang sedemikian rupa sehingga meminimalkan interferensi antar pengguna dalam satu sel, tetapi tetap mengakomodasi transmisi antar sel yang lebih baik. Sumber [18] oleh R. Nikbakht, yang berjudul “*Uplink Fractional Power Control and Downlink Power Allocation for Cell-Free Network*” menjelaskan bahwa besarnya interferensi dalam jaringan juga bergantung pada posisi perangkat, terutama pada *path gain* dari stasiun ke sel. Jika terminal lebih dekat dengan sel lain, maka akan menghasilkan nilai tumpang tindih atau gangguan yang lebih besar daripada terminal yang lebih jauh dari sel lain. Dengan kata lain, semakin besar jarak antara stasiun dan sel lain, semakin kecil kemungkinan terjadinya interferensi, menghasilkan transmisi yang lebih baik dan lebih sedikit interferensi. Dan disumber [17] juga menjelaskan bahwa jaringan LTE memiliki karakteristik orthogonal yang memungkinkan *multiplexing* stasiun dengan daya penerima yang berbeda pada sel yang sama. Dalam konteks ini, *multiplexing* mengacu pada teknik transmisi data yang memungkinkan beberapa sinyal data ditransmisikan secara bersamaan melalui satu tautan

komunikasi. Dengan sifat ortogonal LTE, interferensi antar pengguna dalam satu sel sangat minim, memungkinkan data dari stasiun yang berbeda dengan daya penerima yang berbeda dikirim secara bersamaan melalui satu sel tanpa banyak interferensi.

Sumber [19] yang berjudul “*LTE Uplink Cellular Capacity Analysis in A Highaltitude Platforms (HAPS) Communication*”. Menjelaskan bahwa dalam jangka pendek, *multipath fading* dapat digunakan untuk meningkatkan *throughput* data dengan penjadwalan dan mengadaptasi saluran tanpa mengurangi daya. Dalam hal ini, "*multipath fading*" mengacu pada perubahan kekuatan sinyal radio yang disebabkan oleh pantulan sinyal radio di sekitar pengguna. Sedangkan dalam jangka panjang kekuatan sinyal yang diterima oleh perangkat akan tergantung pada penguatan sel layanan, sehingga pihak yang mengalami sedikit gangguan akan memiliki daya terima target yang lebih tinggi. Semua properti ini kemudian digunakan untuk mengontrol daya *Uplink* pada jaringan LTE untuk memastikan kualitas transmisi yang optimal dan interferensi minimal antar pengguna dalam satu sel. Dengan demikian, LTE dapat mengoptimalkan penggunaan *multi-path fading* dalam jangka pendek dan penerimaan daya dalam jangka panjang untuk meningkatkan kecepatan dan kualitas transmisi data.

### **2.2.5 Klasifikasi *Power Control***

kontrol daya di *Femtocells* dapat dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu: *non-assistance-based vs assistance-based* dan *centralized vs Distributed*. Namun, dalam penelitian ini, fokusnya akan lebih jauh pada pengendalian daya terdistribusi. Dalam konteks ini, “*Distributed Power Control*” mengacu pada teknologi *Power Control* yang diimplementasikan secara terdistribusi pada setiap node dalam jaringan, sehingga setiap node dapat menyesuaikan daya transmisinya sesuai dengan kebutuhan [16]. Gambar 2.4 berikut menunjukkan pembagian klasifikasi *Power Control*.



**Gambar 2. 4 Klasifikasi Power Control [16]**

### 2.2.6 Distributed Power Control (DPC)

*Distributed Power Control (DPC)* adalah teknologi kontrol daya yang berevolusi dari sistem kontrol daya terpusat, juga dikenal sebagai *Centralized Power Control (CPC)*. Dengan kata lain, DPC melibatkan pendistribusian kontrol daya ke beberapa node atau perangkat, sementara CPC bergantung pada pengontrol pusat untuk mengelola kontrol daya untuk seluruh system [6]. Untuk meningkatkan sistem kontrol daya terdistribusi, dibuat modifikasi kontrol daya sederhana yang memungkinkan setiap ujung saluran untuk secara bersamaan menyesuaikan daya pancarnya pada waktu tertentu. Dengan kata lain, skema kontrol daya terdistribusi disederhanakan dan diatur sedemikian rupa sehingga setiap stasiun dapat secara efektif mengontrol daya yang disalurkan melalui saluran pada waktu yang sama. Ini membantu meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem kontrol energi secara keseluruhan [20].

Teknologi *Distributed Power Control (DPC)* adalah metode manajemen daya yang digunakan untuk mengatasi masalah kepadatan data dalam sistem *Centralized Power Control (CPC)* dan meningkatkan kualitas sistem dengan mengurangi risiko kegagalan pusat. Saat mengimplementasikan DPC, setiap pengguna digunakan sebagai pengontrol daya untuk dirinya sendiri dan pengguna lain pada perangkat telekomunikasi yang digunakan. Setiap pengguna

menyegarkan daya untuk mencapai konvergensi, dan penyegaran daya didasarkan pada SINR pengguna dan daya yang digunakan sebelumnya. Dengan teknologi ini, masalah kepadatan data dapat diatasi dengan lebih efektif dan dapat meningkatkan kualitas sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, penerapan teknologi kontrol daya terdistribusi sangat berguna dan cocok digunakan dalam sistem komunikasi yang kompleks dan dapat dirumuskan sebagai berikut [4].

$$p_i^{(t+1)} = \frac{\gamma_i^{tar}}{\gamma_i^{(t)}} p_i^{(t)} \quad (2.1)$$

Dengan keterangan  $\gamma_i^{tar}$  adalah SINR target kemudian  $\gamma_i^{(t)}$  merupakan SINR yang dicapai oleh *user i* saat *t*, dan  $p_i^{(t+1)}$  adalah daya *user* sesudah iterasi dan  $p_i^{(t)}$  merupakan daya *user* sebelum iterasi. Metode ini dikenal sebagai *Power Balancing Algorithm* (PBA) [5].

### 2.2.7 Fisibilitas *Distributed Power Control*

Di layer fisik jaringan, metode kontrol daya untuk mengurangi kemungkinan gangguan pada jaringan. Namun, untuk memastikan keandalan sistem kontrol daya, semua pengguna harus mencapai nilai *signal-to-Interference plus noise ratio* (SINR) yang ditetapkan sebagai standar yang sesuai [9]. SINR adalah parameter yang sangat efektif dalam mengevaluasi kualitas sinyal. Saat menentukan nilai target SINR, rumus yang cukup sederhana dapat digunakan. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk menggunakan SINR dalam mengevaluasi kinerja jaringan nirkabel [14].

$$\gamma_i = \frac{p_i g_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_{ij} + \sigma_0} \quad (2.2)$$

Dengan keterangan  $p_i$  yaitu daya pengguna atau *user i* sedangkan  $p_{ij}$  merupakan daya yang digunakan oleh *user* lain di satu channel yang sama dan  $g_{ii}$  yaitu nilai link gain *user i* dan  $g_{ij}$  adalah nilai link gain pengguna atau *user* yang berbeda dan yang terakhir  $\sigma_0$  yaitu *noise* [21].

Kelayakan DPC berarti untuk semua kontrol daya awal mampu mencapai kondisi konvergen pada nilai daya tertentu ( $P^*$ ) dan pada saat yang sama semua pengguna mencapai target SINR pada nilai daya positif hingga daya maksimum nilai,  $0 \leq P^* \leq P_{max}$ . Dengan uji kelayakan ini dapat dilihat jika nilai *user power negatif* berarti tidak mungkin mencapai target SINR yang diinginkan pada jaringan, atau dengan kata lain tidak ada solusi yang layak (*infeasible condition*). Kelayakan juga dapat dilihat berdasarkan penggunaan daya maksimum pengguna,  $P_{max}$ , sehingga jika daya pada pengguna melebihi nilai  $P_{max}$ , kondisi ini disebut sebagai kondisi semi fisibel. Disebut semi fisibel karena meskipun termasuk dalam kategori layak terkait vektor daya tak negatif, daya yang digunakan sangat besar dan melebihi  $P_{max}$  untuk mencapai target SINR. Dalam beberapa kasus bahkan ada yang masih belum mencapai target SINR padahal daya sudah melebihi  $P_{max}$  [9]. Dari pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa ada kondisi yang harus dipenuhi untuk menentukan apakah sebuah DPC layak atau tidak sebagai berikut:

$$P_{min} \leq p_k^* \leq P_{max} \quad (2.3)$$

keterangan  $p_{min}=0$  W atau dengan nilai daya tertentu saat daya awal tidak 0 pada saat proses *power update* [5]. Setelah diberikannya nilai  $\gamma_i^{tar}$  atau nilai SINR target, untuk memenuhi persyaratan *vector daya non-negative* atau yang sering disebut *non-negative power vector* agar dianggap fisibel. Untuk memenuhi persyaratan tersebut bisa menggunakan persamaan berikut ini:

$$P^* = (I - H)^{-1}\eta \quad (2.4)$$

Keterangan:  $P^*$  adalah daya total yang digunakan oleh pengguna atau *user* lalu  $H$  adalah  $(h_{ij})$  merupakan matriks link gain yang ternormalisasi dapat menggunakan persamaan berikut untuk mengetahui nilainya.

$$h_{ij} = \gamma^{tar} \frac{G_{ij}}{G_{ii}} \quad (2.5)$$

Sedangkan  $\eta$  adalah vektor *noise* yang ternormalisasi dapat ditentukan menggunakan rumus 2.6 berikut [4]:

$$\eta_i = \gamma^{tar} \frac{\sigma}{G_{ii}} \quad (2.6)$$

keterangan  $g_{ii}$  dan  $g_{ij}$  adalah nilai yang memenuhi *link gain* user  $i$  dan user  $j$ . Untuk nilai *gain user* bisa menggunakan rumus 2.7 berikut:

$$G_{ii} = \frac{1}{d^\alpha} \quad (2.7)$$

Link gain merupakan nilai yang dipengaruhi oleh jarak antar pengguna ( $d$ ) dan konstanta *path loss* ( $\alpha$ ) yang sama dengan 4. Dengan demikian, semakin besar jarak antar pengguna maka nilai link gain akan semakin berkurang karena path loss bertambah [21]. Untuk memenuhi kriteria sistem kontrol daya terdistribusi yang sesuai, beberapa persyaratan harus dipenuhi:

1. Nilai  $P^*$  bernilai *non-negative power vector*
2. Nilai mutlak matrik *link gain* harus  $H < 1$  [9].

Selain menggunakan metode yang telah dijelaskan sebelumnya, terdapat metode lain untuk menentukan kelayakan sistem *Distributed Power Control* (DPC), yaitu terkait dengan daya maksimum yang digunakan oleh pengguna. Jika kedua syarat sebelumnya terpenuhi tetapi pengguna menggunakan daya melebihi batas yang telah ditentukan atau *pmaks*, maka syarat tersebut dianggap semi fisibel atau belum fisibel secara utuh. Dalam kasus ini, beberapa tindakan dapat dilakukan agar tetap memenuhi syarat, seperti menghapus *Secondary User* (SU) atau memperluas jarak antar pengguna untuk mengurangi gangguan [9].

### 2.2.8 Konvergensi *Distributed Power Control*

Pada *Power Control* terdapat dua mode yang biasa digunakan yaitu mode *control* tegangan dan mode *control* daya reaktif. Pengujian metode *Distributed Power Control* (DPC) berbeda dari metode lain seperti *Centralized Power Control* (CPC), yang

hanya didasarkan pada pengujian kelayakan sistem. Dalam DPC, setiap pengguna menjadi pengontrol daya untuk dirinya sendiri dan juga pengontrol daya untuk pengguna lainnya. Setiap pengguna akan terus memperbarui daya yang digunakan hingga mencapai status konvergen. Pembangkit daya baru selalu terkait dengan daya sebelumnya yang digunakan oleh pengguna, dan status *signal-to-Interference ratio* atau SINR dan daya yang digunakan oleh pengguna digunakan untuk melakukan pembaruan daya pada sistem DPC [21].

### 2.2.9 Modulasi

Ketika data ditransmisikan melalui suatu saluran, maka akan menemui masalah seperti kesalahan dalam proses transmisi. Sistem komunikasi dapat mengirimkan data dalam bentuk analog atau digital. Jika sinyal ditransmisikan dalam bentuk analog, konverter diperlukan untuk mengubahnya menjadi sinyal digital, atau dikenal sebagai konverter *Analog-to-Digital* (ADC). Selain itu, modulator dalam sistem transmisi *baseband* juga dapat bertindak sebagai pengubah bentuk atau representasi dari gelombang simbol data digital yang sedang ditransmisikan [22].

Modulasi adalah proses menumpangkan sinyal informasi ke sinyal pembawa. Teknik modulasi dilakukan dengan mengubah amplitudo, frekuensi atau fase dari sinyal gelombang pembawa untuk mengirimkan sinyal informasi [23]. Ada beberapa jenis modulasi dalam sistem komunikasi, yaitu modulasi analog seperti modulasi analog (AM), modulasi frekuensi (FM), modulasi fase (PM), dan modulasi digital seperti *frequency shift keying* (FSK), *phase shift keying* (PSK), dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) [24].

**Tabel 2. 1 Nilai SIR Terhadap Modulasi [25]**

Model Modulasi	SIR (dB)
1024 QAM	35,5
256 QAM	29,4
64 QAM	23,3
16 QAM	16,9
QPSK	9,9 dB
BPSK	6,8 dB

Modulasi QPSK adalah jenis modulasi M-PSK yang menggunakan fase sinyal pembawa untuk mewakili kode bit dari sinyal informasi. Ada empat simbol dalam QPSK yang mewakili dua bit, yaitu "00", "01", "10" dan "11". Di QPSK, ada perubahan 90 derajat pada fase sinyal untuk setiap dua bit. Teknologi modulasi QPSK memungkinkan sinyal membawa informasi dua kali lebih banyak daripada PSK biasa atau BPSK menggunakan bandwidth yang sama. Dengan kata lain, QPSK memungkinkan transmisi data yang lebih efisien dan dapat meningkatkan *throughput* sinyal.

Untuk menilai kualitas sinyal, ada beberapa metode yang bisa dilakukan. Salah satu caranya adalah dengan mengukur nilai *error* atau yang sering disebut *bit error rate* (BER). Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui secara spesifik kualitas sinyal yang dipancarkan. Selain itu, penting juga untuk diperhatikan pengukuran kemampuan mencapai SIR (*signal-to-Interference ratio*). Nilai SIR yang diharapkan dapat dimodifikasi sesuai dengan jenis modulasi yang digunakan dalam sinyal. Dengan demikian, kedua parameter ini harus diperhatikan secara bersamaan untuk memastikan kualitas sinyal yang optimal [25].

### 2.2.10 Distributed Constrained Power Control (DCPC)

*Distributed Constrained Power Control* adalah metode kontrol daya yang memperhitungkan daya maksimum. Metode ini dapat menghitung nilai regenerasi energi menggunakan persamaan DCPC sebagai berikut [5]:

$$p_i^{(t+1)} = \begin{cases} \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)}, & \text{jika } \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)} \leq P_{max} \\ P_{max}, & \text{jika } \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)} > P_{max} \end{cases} \quad (2.8)$$

Terdapat dua kemungkinan yang pertama jika  $p_i^{(t+1)}$  setelah iterasi dayanya tidak melebihi atau setara dengan daya maksimum maka daya setelah iterasi sudah baik sehingga tidak perlu dilakukan proses *treatment* namun kondisi kedua yaitu jika  $p_i^{(t+1)}$  setelah iterasi, dayanya melebihi daya maksimal maka dayanya perlu dilakukan proses *treatment* dengan membuat dayanya menjadi daya maksimal.

Artinya, jika  $P_i^*$  sama dengan  $P_{max}$ , maka pengguna akan mengirimkan sinyal dengan menggunakan daya maksimumnya. Dalam hal kesamaan, mereka dapat disebutkan sebagai berikut:

$$p_i^{(t+1)} = \min \left( \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)}, P_{max} \right) \quad (2.9)$$

Dalam model DCPC, terdapat Kelemahan yaitu daya transmisi pengguna mencapai daya transmisi maksimum meskipun pengguna tidak dapat mencapai SINR minimum yang diperlukan. Oleh karena itu, pengguna tidak dapat berkomunikasi dengan andal bahkan saat menggunakan daya transmisi maksimum. Ini membuang-buang energi dan memengaruhi pengguna lain sebagai gangguan yang intens. Namun, untuk mengatasi masalah ini, metode baru yang disebut *Generalized Distributed Constrained Power Control* (GDCPC) telah dikembangkan [26].

### 2.2.11 *Half Distributed Constrained Power Control (HDCPC)*

Metode *Half Distributed Constrained Power Control* (HDCPC) merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi permasalahan yang muncul pada dua metode sebelumnya (DCPC dan GDCPC). Saat pengguna tidak dapat mencapai nilai SINR target pada metode DCPC dan GDCPC, metode HDCPC menggunakan separuh daya maksimum atau  $\frac{1}{2}P_{max}$ . Dengan demikian, pengguna dapat menghemat energi dengan tidak menggunakan daya maksimum secara terus menerus dan dapat menghentikan proses transmisi ketika terjadi masalah dalam mencapai target nilai SINR. Persamaan yang digunakan untuk metode HDCPC dapat ditulis sebagai:

$$p_i^{(t+1)} = \begin{cases} \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)}, & \text{jika } \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)} \leq P_{max} \\ \frac{1}{2}P_{max}, & \text{jika } \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)} > P_{max} \end{cases} \quad (2.11)$$

Dalam metode HDCPC, nilai  $P_i^*$  ditetapkan sama dengan setengah dari daya maksimum atau  $\frac{1}{2}P_{max}$ . Hal ini dilakukan agar pengguna dapat terus berkomunikasi dengan pengguna lain tanpa harus menggunakan daya terlalu banyak atau ekstrim. Dengan setengah dari daya maksimum ini, pengguna dapat menghemat daya dan mengurangi interferensi dengan pengguna lain di jaringan [5].

### 2.2.12 *Generalized Distributed Constrained Power Control (GDCPC)*

GDCPC atau *Generalized Distributed Constrained Power Control* telah dikembangkan cara GDCPC yaitu Ketika pengguna tidak bisa mencapai SINR target, metode GDCPC ini mengurangi daya hingga ke level sembarang dalam rentang daya transmisi daripada harus selalu menggunakan daya maksimum. Ide ini dapat menghemat konsumsi energi dan mengurangi interferensi dengan pengguna lain di jaringan. Karena pengguna lain di jaringan

mengalami lebih sedikit gangguan, mereka dapat menggunakan daya pancar yang lebih tinggi. Akibatnya, jaringan dapat mendukung lebih banyak pengguna daripada menggunakan DCPC [26]. Metode ini dapat dipergunakan memenuhi persamaan berikut [5]:

$$p_i^{(t+1)} = \begin{cases} \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)}, & \text{jika } \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)} \leq P_{max} \\ 0, & \text{jika } \frac{y_i^{tar}}{y_i^t} p_i^{(t)} > P_{max} \end{cases} \quad (2.10)$$

Jika  $P_i^* = 0$ , pengguna tidak mengirim. Dalam hal ini, koneksi dapat dikatakan dihapus sementara. Ini memungkinkan pengguna yang dihapus untuk tetap berada di saluran dan mengembalikannya saat interferensi berkurang. Semakin kecil nilai  $P_i^*$  yang ditentukan, semakin sedikit interferensi yang dihasilkan antar pengguna. Jika nilai daya yang ditentukan sama dengan  $P_{max}$ , maka GDCPC akan sama dengan DCPC.

Metode GDCPC juga memiliki kelemahan mempertahankan kondisi  $GDCPC = P_{max}$  yang tidak menguntungkan bagi pengguna. Keadaan ini dapat membuang energi dan mengganggu pengguna lain, menyebabkan pengguna tidak dapat mencapai target SINR. Untuk mengatasi masalah metode DCPC dan GDCPC ini, digunakan metode lain yang disebut *Half Distributed Constrained Power Control* (HDCPC) [5].