

APLIKASI COOPERATIVE RELAYING PADA TEKNOLOGI LTE-ADVANCED DAN PROSPEKNYA DI INDONESIA

R. Purnama

Fakultas Teknik Universitas Wiralodra, Indramayu

1. rpurnama.ft@unwir.ac.id
2. r.purnama_natakusuma@yahoo.co.id

ABSTRAK

Cooperative relaying dan teknologi-teknologi relay telah dipelajari secara aktif dan dipertimbangkan untuk sistem-sistem komunikasi *broadband mobile* generasi mendatang. Teknologi relay tersebut diusulkan sebagai salah satu solusi untuk mengatasi masalah-masalah interferensi, *coverage*, kapasitas dan *throughput* didalam jaringan-jaringan selular dewasa ini. 3GPP LTE-Advanced, yang merupakan suatu standar generasi selular 4G LTE terbaru telah dirilis dan menyediakan solusi *relaying* tersebut pada salah satu fiturinya. Didalam tesis ini, kami menjelaskan mengenai tipe-tipe relay yang dispesifikasikan oleh standar 3GPP sebagai relay tipe 1 dan relay tipe 2, kemudian pembagian protokol layer dimana relay-relay tersebut beroperasi dan dirujuk sebagai layer 1 RN, layer 2 RN dan layer 3 RN dan terakhir mengenai skenario-skenario deploymennya, yaitu untuk menyediakan *coverage* di area-area yang baru (rural, urban, suburban dan indoor), meningkatkan *throughput* di area *cell edge*, memitigasi *dead spot* dan *hot spot*, menyediakan jaringan-jaringan sementara (*temporary networks*) dan *group mobility*. Kami menganalisa prospek dari teknologi terbaru tersebut dan mencatat bahwa relay-relay tersebut dapat digunakan untuk mengatasi masalah-masalah yang sering terjadi pada jaringan-jaringan selular seperti yang dijelaskan diatas. Kami menyimpulkan bahwa relay adalah merupakan suatu solusi yang *cost-effective* sebagai pengganti atas pemasangan infrastruktur BTS (atau eNB) yang baru.

Kata Kunci : *Relay; LTE Advanced; cooperative relaying.*

I. PENDAHULUAN

Didalam sistem telekomunikasi yang konvensional, message atau informasi ditransmisikan secara langsung dari suatu node sumber menuju node tujuan melalui kanal langsung (*direct channel*). Namun demikian, didalam lingkungan-lingkungan komunikasi wireless yang *multiuser*¹ ini, ada banyak node-node tetangga yang sebetulnya dapat dimanfaatkan untuk membantu memforward atau meneruskan informasi dari node sumber tersebut pada node tujuan. *Cooperative communication* atau *cooperative relaying* adalah merupakan suatu paradigma baru didalam teknik-teknik telekomunikasi wireless, dimana node-node yang berada didalam suatu jaringan yang *multiuser* tersebut dapat saling berbagi (*share*), berkoordinasi (*coordinate*) dan bekerja sama (*cooperate*) dalam merelay suatu

informasi. Node *relay* yang menerima message dari node sumber tersebut kemudian meneruskannya pada node tujuan. Sementara itu, model kanal komunikasi (*communication channel*) yang digunakan oleh node relay dalam membantu proses transmisi informasi sumber tersebut dinamakan sebagai kanal relay atau *relay channel*.

A. RELAY CHANNEL (RC)

*Relay channel*² adalah suatu kanal komunikasi yang terdiri dari satu node sumber, satu node tujuan dan satu atau beberapa node perantara atau node relay. Tujuan utama dari node relay pada kanal komunikasi tersebut adalah untuk membantu berlangsungnya proses komunikasi antara node sumber dan node tujuan. Relay juga melakukan kerjasama dengan *transmitter* atau node sumber untuk menyelesaikan ketidakpastian pada *receiver*. Pada umumnya, relay tersebut dapat melakukan keduanya, yaitu mentransmisikan informasinya sendiri dan membantu memforward atau meneruskan sumber informasi milik node yang lainnya. Konsep *relay channel* pertama kali diusulkan

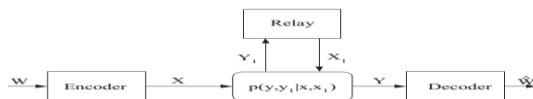
¹Jaringan-jaringan *multiuser* terjadi ketika banyak user berbagi kanal komunikasi (*communication channel*) yang sama. Ini tentunya terjadi pada jaringan-jaringan wireless. Ada beberapa macam bentuk yang berbeda dari jaringan *multiuser* tersebut, diantaranya adalah *multiple access channel* (MAC), *broadcast channel* (BC) dan jaringan-jaringan Ad-hoc. Kombinasi dari *multiple access channel* (MAC) dan *broadcast channel* (BC) sendiri dapat membentuk suatu kanal komunikasi yang dinamakan sebagai kanal relay atau *relay channel* (RC), sebuah konsep yang melatarbelakangi munculnya paradigma transmisi yang baru yang dinamakan sebagai *cooperative communication* atau *cooperative relaying*.

²Konsep *relay channel* ini adalah konsep yang melatarbelakangi munculnya skema *cooperative communication* yang kelak dipelopori dan dipopulerkan antara lain oleh A. Sendonaris, J.N. Laneman dll. Meskipun kecenderungan terakhir dari konsep *cooperative communication* adalah lebih mengarah pada konsep *diversity* dan *wireless MIMO* atau *virtual antenna array* (VAA) tetapi *relay channel* tetap dianggap sebagai fondasi dasarnya.

oleh Van der Meulen dalam disertasi doctoralnya di MIT pada tahun 1969. Kemudian konsep tersebut dikembangkan lagi oleh Thomas M. Cover et al. dalam [5] pada tahun 1979. Dalam hasil kerjanya tersebut, Thomas M. Cover et al. membuat suatu kemajuan yang sangat signifikan dimana dia menemukan kapasitas dari suatu *relay channel* untuk kasus yang khusus atau kelas tertentu.

1. General Relay Channel

Gambar 1. dibawah ini memperlihatkan sebuah *general relay channel*, yaitu kanal relay yang paling sederhana yang hanya mempunyai satu terminal relay. Dalam kasus ini, kanal tersebut terdiri dari empat himpunan-himpunan yang terbatas, yaitu \mathbf{X} , \mathbf{X}_1 , \mathbf{Y} dan \mathbf{Y}_1 dan suatu kumpulan dari fungsi-fungsi masa peluang $p(y, y_1|x, x_1)$ pada $\mathbf{Y} \times \mathbf{Y}_1$ masing-masing untuk setiap $(x, x_1) \in \mathbf{X} \times \mathbf{X}_1$. Interpretasinya adalah bahwa “x” adalah simbol yang ditransmisikan oleh node sumber dan merupakan input yang menuju kanal, “y” adalah simbol yang diterima oleh node tujuan dan merupakan output yang keluar dari kanal, “y₁” adalah simbol yang diterima oleh relay dan merupakan observasi atau pengamatan dari relay tersebut dan “x₁” adalah simbol yang ditransmisikan oleh node relay. Problem dari *relay channel* adalah mencari kapasitas kanal diantara X dan Y tersebut [4].



Gb. 1. General relay channel

Suatu kode $(2^{nR}, n)$ untuk suatu *relay channel* terdiri dari suatu himpunan yang terdiri dari integer-integer $W = \{1, 2, \dots, 2^{nR}\}$, dengan suatu fungsi *encoding* $X : \{1, 2, \dots, 2^{nR}\} \rightarrow \mathbf{X}^n$, suatu himpunan dari fungsi-fungsi *relay* $\{f_i\}_{i=1}^{2^{nR}}$ sehingga $x_{1i} = f_i(Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1i-1})$ untuk $1 \leq i \leq n$ dan suatu fungsi *decoding* $g : \mathbf{Y}^n \rightarrow \{1, 2, \dots, 2^{nR}\}$.

2. Physically Degraded Relay Channel

Karena keberadaan *relay*, kapasitas kanal dari sistem tersebut menjadi sulit untuk ditentukan. Kapasitas dari *relay channel* masih menjadi *open issue* hingga saat ini dan hanya diketahui untuk kasus yang khusus atau kelas yang tertentu saja. Kasus khusus yang dimaksud adalah kasus dimana *relay channel* mengalami penurunan secara fisik atau disebut sebagai *physically degraded relay channel*.

Pada *physically degraded relay channel*, penerima relay Y_1 adalah lebih baik daripada

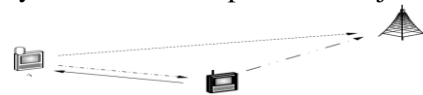
penerima tujuan Y dan kemudian relay tersebut dapat beroperasi untuk mengirimkan simbol informasi “x” [21]. Relay channel $(\mathbf{X} \times \mathbf{X}_1, p(y, y_1|x, x_1), \mathbf{Y} \times \mathbf{Y}_1)$ dikatakan *physically degraded* jika $p(y, y_1|x, x_1)$ dapat dituliskan dalam bentuk $p(y, y_1|x, x_1) = p(y_1|x, x_1)p(y|y_1, x_1)$.

Untuk *physically degraded relay channel*, kapasitas adalah diberikan oleh teorema berikut ini.

Teorema:[4]. Kapasitas C dari suatu *physically degraded relay channel* adalah diberikan oleh $C = \sup_{p(x, x_1)} \min \{I(X, X_1; Y), I(X; Y_1|X_1)\}$ (2.1)

B. COOPERATIVE COMMUNICATION

Cooperative communications adalah suatu konsep atau paradigma baru dalam skema transmisi *wireless* yang diperkenalkan dan dipopulerkan antara lain oleh Sendonaris et al. [16,17], J.N. Laneman et al. [11] dan Aria Nosratinia et al. [14]. Dengan skema transmisi yang baru tersebut memungkinkan user-user yang berada didalam suatu jaringan yang multiuser untuk saling berbagi (*share*), berkoordinasi (*coordinate*) dan bekerjasama (*cooperate*) atas sumber daya-sumber daya atau resources-nya untuk meningkatkan kualitas transmisi mereka. User-user didalam sistem tersebut bekerjasama dengan saling merelay pesannya satu sama lain pada node tujuan.



Gb. 2. Cooperative communication

Cooperative communications, yang juga dikenal sebagai *cooperative relaying* adalah suatu teknik transmisi yang memanfaatkan keuntungan dari komunikasi *multiple input multiple output* (MIMO) dalam suatu skenario *wireless* dengan terminal-terminal antena yang tunggal. Teknik ini juga mengambil keuntungan dari sifat *broadcast* transmisi *wireless* dan menciptakan suatu *virtual antenna array* (VAA) melalui node-node yang bekerjasama tersebut. Dengan bekerjasama, user yang mengalami suatu *deep fade* didalam linknya ketika menuju node tujuan, dapat menggunakan *quality channel* yang disediakan oleh partner-partner mereka untuk mencapai kualitas layanan (QoS) yang diinginkan. Paradigma transmisi yang baru ini tentu saja menjanjikan peningkatan performa yang signifikan dalam hal kehandalan link, efisiensi spektral, kapasitas sistem, jarak transmisi serta daerah cakupan.

1. Fase-Fase Transmisi Relaying

Pada umumnya skema-skema transmisi kerjasama dari sistem *cooperative relaying* ini meliputi dua fase, yaitu fase I (*coordination phase*) dan fase II (*cooperation phase*).

Fase I (*coordination phase*)¹. Pada fase I atau fase koordinasi, user-user saling bertukar data mereka sendiri dan saling mengontrol message dan atau dengan node tujuan. Node sumber membroadcast informasinya kepada keduanya, yaitu node tujuan dan node relay. Sementara sinyal-sinyal yang diterima pada node tujuan $y_{s,d}$ dan pada node relay $y_{s,r}$ dapat dimodelkan sebagai berikut

$$y_{s,d} = \sqrt{P}h_{s,d}x + n_{s,d} \quad (3.1)$$

$$y_{s,r} = \sqrt{P}h_{s,r}x + n_{s,r} \quad (3.2)$$

dimana P adalah daya yang ditransmisikan pada node sumber, x adalah simbol informasi yang ditransmisikan dan $n_{s,d}$ dan $n_{s,r}$ berturut-turut adalah *additive white Gaussian noise* sementara $h_{s,d}$ adalah koefisien kanal dari node sumber ke node tujuan (S-D) dan $h_{s,r}$ adalah koefisien kanal dari node sumber ke node relay (S-R).

Fase II (*cooperation phase*)². Pada fase II atau fase kerjasama, user-user dengan cara bekerjasama mentransmisikan pesan-pesan mereka pada node tujuan. Node relay tersebut memforward suatu versi yang sudah diproses dari sinyal node sumber pada node tujuan, dan ini dapat dimodelkan sebagai berikut

$$y_{r,d} = h_{r,d}q(y_{s,r}) + n_{r,d} \quad (3.3)$$

dimana fungsi $q(\cdot)$ adalah bergantung pada pemrosesan yang mana yang akan digunakan pada node relay tersebut, apakah menggunakan skema AF, DF atau yang lainnya.

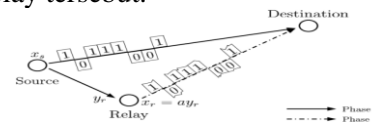
2. Skema-Skema Protokol Transmisi

Skema-skema protokol transmisi *cooperative relaying* yang akan kami diskusikan berikut ini adalah skema protokol transmisi yang diusulkan oleh J.N. Laneman et al. pada [11] dimana protokol-protokol tersebut menjadi rujukan hampir semua literatur yang membahas mengenai topik *cooperative communication*. Protokol-protokol tersebut diklasifikasikan menjadi dua, yaitu skema *fixed cooperative relaying* dan *adaptive cooperation relaying*. Dan masing-masing dari protokol tersebut dibagi lagi menjadi dua kategori yang akan kami diskusikan pada pembahasan-pembahasan berikut ini.

a. Skema Fixed Cooperative Relaying

Fixed relaying adalah suatu tipe teknik *relaying* dimana relay selalu memforward atau meneruskan message yang dia terima dari node sumber. Pada *fixed relaying*, sumber-sumber kanal dibagi antara node sumber dan node relay dengan cara yang *fixed* atau deterministik. Dan skema *fixed relaying* ini diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *fixed amplify and forward (AF) relaying* dan *fixed decode and forward (DF) relaying*.

Fixed amplify and forward (AF) relaying. Pada protokol *fixed AF relaying* ini atau biasa disebut dengan protokol AF (jangan dibingungkan oleh istilah *incremental AF relaying*), relay tersebut menskala atau mengamplifikasi sinyal analog yang diterima dari node sumber dan kemudian memforwardnya pada node tujuan. Pada protokol tersebut tidak ada proses *decoding* ataupun demodulasi message. Skema protokol ini dirujuk sebagai *transparent relaying*[6] atau *non-regenerative relaying*. Selain daripada itu, sebagai tambahan atas kompleksitasnya yang rendah, skema-skema AF juga diinginkan ketika kualitas dari link antara node sumber dan node relay (S-R) tidak mencukupi untuk menggaransi pengkodean yang *reliable* pada node relay tersebut.



Gb. 3. Operasi protokol amplify and forward (AF) relaying

Pada fase I atau fase koordinasi, node sumber membroadcast simbol informasi “ x ” pada keduanya, yaitu node relay dan node tujuan. Dan sinyal-sinyal yang diterima oleh kedua node tersebut dapat dinyatakan dalam ekspresi matematis sebagai berikut

$$y_{s,r} = \sqrt{P}h_{s,r}x + n_{s,r} \quad (3.4)$$

$$y_{s,d} = \sqrt{P}h_{s,d}x + n_{s,d} \quad (3.5)$$

dimana $h_{s,r}$ adalah koefisien kanal diantara node sumber dan node relay (S-R), $h_{s,d}$ adalah koefisien kanal diantara node sumber dan node tujuan (S-D), $n_{s,r}$ dan $n_{s,d}$ adalah AWGN. Pada fase II yang juga disebut sebagai fase kerjasama, relay melakukan amplifikasi dengan menskala sinyal yang diterima dari node sumber tersebut dengan suatu faktor berikut,

$$\beta_r = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} \quad (3.6)$$

¹Fase I disebut juga sebagai fase *broadcast*.

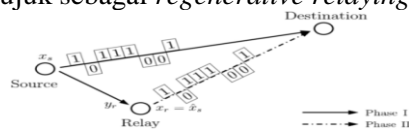
²Fase II disebut juga sebagai fase *relaying*.

Sinyal yang ditransmisikan oleh node relay pada node tujuan tersebut demikian diberikan oleh $\beta_r y_{s,r}$ dan mempunyai power P sama dengan power dari sinyal yang ditransmisikan dari node sumber. Dan sinyal yang diterima oleh node tujuan pada fase II adalah diberikan oleh persamaan berikut,

$$y_{r,d} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} h_{r,d} y_{s,r} + n_{r,d} \quad (3.7)$$

Kemudian, node tujuan menerima dua salinan dari sinyal x , yaitu pertama dari node sumber dan kedua dari node relay. Untuk menggabungkan kedua sinyal tersebut dapat digunakan teknik-teknik *diversity combining* yang berbeda. Teknik optimal yang memaksimalkan keseluruhan SNR adalah *maximal ratio combining* (MRC). Catatan bahwa penggabungan MRC memerlukan suatu detektor yang koheren yang mempunyai pengetahuan mengenai semua koefisien-koefisien kanal. Juga, SNR pada output dari MRC adalah sama dengan jumlah dari SNR yang diterima dari kedua cabang.

Fixed decode and forward (DF) Relaying. Pada protokol *fixed decode and forward* (DF) relaying atau cukup disebut dengan protokol DF (jangan dibingungkan oleh istilah *selective DF relaying*), sebelum ditransmisikan pada node tujuan, relay tersebut melakukan pemrosesan terlebih dahulu terhadap sinyal yang diterima dari node sumber tersebut. Perrosesan tersebut berupa *decoding* atau *demodulation* dan *reencoding* atau *modulation*. Oleh karenanya, skema protokol ini dirujuk sebagai *regenerative relaying*[6].



Gb. 4. Operasi protokol decode and forward (DF) Relaying

Seperti halnya pada transmisi protokol AF diatas, pada fase I, node sumber pertama-tama membroadcast message pada keduanya, yaitu node relay dan node tujuan. Kemudian pada fase II, jika relay tersebut dapat mendekode (*decode*) pesan dengan berhasil, maka dia akan meng-generate message yang sama dan memforwardnya ke node tujuan. Sinyal-sinyal yang diterima oleh keduanya, yaitu node relay dan node tujuan pada fase I tersebut adalah dapat dinyatakan dalam ekspresi matematis sebagai berikut

$$y_{s,r} = \sqrt{P} h_{s,r} x + n_{s,r} \quad (3.8)$$

$$y_{s,d} = \sqrt{P} h_{s,d} x + n_{s,d} \quad (3.9)$$

Sementara sinyal yang diterima oleh node tujuan pada fase II adalah diberikan oleh

$$y_{r,d} = \sqrt{P} h_{r,d} x + n_{r,d} \quad (3.10)$$

Meskipun *fixed DF relaying* mempunyai keuntungan atas *fixed AF relaying* dalam hal mengurangi efek-efek dari *noise additive*(AWGN) pada node relay tersebut. Protokol ini memberikan kemungkinan pengiriman sinyal-sinyal yang dideteksi secara keliru atau salah pada node tujuan. Sinyal yang didcode (*decode*) oleh node relay tersebut boleh jadi tidak tepat dan jika suatu sinyal yang salah (*incorrect signal*) tersebut diforward pada node tujuan maka proses *decoding* pada node tujuan adalah tentunya menjadi tidak berarti. Adalah jelas bahwa untuk skema semacam itu *diversity* yang dicapai hanyalah satu, karena performa dari sistem adalah dibatasi oleh link yang buruk dari node sumber ke node relay (S-R) dan dari node sumber ke node tujuan (S-D).

b. Skema Adaptive Cooperation

Dalam skema-skema fixed DF relaying, *outage performance* adalah dibatasi oleh transmisi langsung (*direct link*), yaitu kualitas link dari node sumber menuju node relay (S-R) [11] karena relay tersebut adalah diperlukan untuk men-decode message node sumber dengan berhasil. Bagaimanapun, *diversity order* adalah dapat ditingkatkan jika strategi tidak terpaku pada keharusan relay berpartisipasi pada *cooperative transmission* pada fase II. Lebih spesifiknya, pada skema *selection DF relaying*, node sumber dapat memilih untuk mentransmisikan pesan tersebut oleh dirinya sendiri pada fase II jika relay tersebut tidak dapat men-decode message tersebut dengan berhasil pada fase I.

Fixed relaying mempunyai keuntungan mudah dalam hal implementasi, tetapi kelemahannya adalah efisiensi *bandwidth* yang rendah. Ini karena pada skema transmisi dua fase tersebut, setengah dari *resources-resource* kanal adalah dialokasikan pada relay untuk transmisi, yang mengurangi keseluruhan rate. Selain itu, *fixed DF relaying* merugi akibat fakta bahwa performa tersebut dibatasi oleh kanal-kanal node sumber-relay (S-R) dan relay-tujuan (R-D) yang paling lemah yang mengurangi *diversity gain* menjadi satu. Untuk mengatasi problem ini, protokol *adaptive relaying* dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi tersebut. Dan skema *adaptive cooperation* ini

dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu *selection*(DF) *relaying* dan *incremental* (AF) *relaying*.

Selection relaying. Selection relaying adalah suatu tipe teknik *relaying* dimana relay berpartisipasi dalam fase II atau fase kerjasama (*cooperation*) hanya ketika link antara node sumber dan node relay (S-R) adalah dalam kondisi bagus, jika tidak maka relay kembali pada mode *idle* atau *non-cooperation*. Pada skema *selection DF relaying*, jika SNR pada link node sumber dan node relay (S-R) melebihi suatu *threshold*, relay tersebut dapat men-decode sinyal dari node sumber dengan tepat. Dalam hal ini, SNR dari sinyal MRC yang digabung pada node tujuan adalah jumlah dari SNR yang diterima dari node sumber dan node relay.

Disisi lain, ketika link diantara node sumber dan node relay (S-R) menderita gangguan atau memburuk karena adanya *fading* yang parah sehingga *signal to noise ratio* (SNR) tersebut jatuh dibawah *threshold*, maka relay tersebut berada pada mode *idle* atau *non cooperation*. *Selection relaying* meningkatkan performa dari *fixed DF relaying*, karena *threshold* pada relay tersebut dapat ditentukan untuk mengatasi *inherent problem* pada *fixed DF relaying* dimana relay tersebut memforward semua sinyal-sinyal yang di-decode pada node tujuan meskipun beberapa sinyal yang di-decode tersebut adalah salah.

Incremental Relaying. Untuk *incremental relaying*, adalah dianggap bahwa ada sebuah kanal *feedback* dari node tujuan pada node relay. Node tujuan tersebut akan mengirimkan suatu *acknowledgement* (ACK) pada node relay jika transmisi sumber pada fase I adalah berhasil, sehingga relay tersebut tidak perlu mentransmisikan pada fase II dan dapat mentransmisikan informasi yang baru pada tme slot berikutnya. Jika transmisi sumber tidak berhasil pada fase I, relay tersebut dapat menggunakan salah satu atau sembarang protokol-protokol *fixed relaying* untuk mentransmisikan sinyal node sumber dari fase yang pertama. Disini biasanya digunakan untuk relay yang menggunakan protokol AF dan karenanya disebut sebagai *incremental AF relaying*.

Protokol ini mempunyai efisiensi spektral yang terbaik diantara protokol-protokol yang telah dijelaskan sebelumnya karena relay tersebut

tidak selalu perlu mentransmisikan pada fase II, dan karenanya fase II menjadi opportunistikbergantung kepada kondisi dari kanal langsung antara node sumber dan node tujuan (S-D).

C. STANDARISASI COOPERATIVE RELAYING DAN TEKNOLOGI RELAY

Cooperative communication dan teknologi relay pada akhirnya diadopsi didalam standar-standar komunikasi wireless terbaru, yaitu pada spesifikasi IEEE 802.16j dan 3GPP LTE Advanced. Kedua standar tersebut mendukung fungsi-fungsi relay yang dapat digunakan untuk meningkatkan *throughput* bagi para pengguna komunikasi selular yang berada di area border dari *cell* atau *cell edge*, memperluas daerah cakupan (*coverage*) didalam gedung (*indoor*), lokasi-lokasi sementara (*temporary locations*) hingga mengkaver (*cover*) para pengguna yang berada didalam kendaraan-kendaraan yang bergerak (*moving vehicle*) atau yang disebut sebagai skenario *group mobility*. Stasiun-stasiun relay RS juga dapat meneruskan (*forward*) pesan-pesan ke stasiun-stasiun relay lainnya yang lokasinya jauh dari *base station* BS. Bergantung kepada apakah stasiun-tasiun mobil MS tersebut peduli (*aware*) atau tidak akan keberadaan relay-relay tersebut. Pada pembahasan berikutnya, kami akan lebih memfokuskan mengenai penggunaan-penggunaan relay pada LTE-Advanced (release 10) mengingat teknologi mobile WiMAX sendiri telah dibatalkan untuk digelar di Indonesia.

D. RELAYING PADA STANDAR 3GPP LTE-ADVANCED DAN PROSPEKNYA DI INDONESIA

1. Problem Telekomunikasi di Indonesia

Dewasa ini kebutuhan akan alat komunikasi tidak terbatas hanya untuk melakukan komunikasi suara atau *voice* saja, tetapi lebih dari itu sudah merupakan kebutuhan untuk komunikasi data, gambar dan video atau multimedia. Di Indonesia sendiri penggunaan alat-alat komunikasi ataupun gadget-gadget lainnya semakin hari menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan. Hal tersebut terutamanya terjadi di kota-kota besar dimana sebagian besar penduduknya merupakan kelas menengah keatas. Namun demikian tidak sedikit juga beberapa daerah di Indonesia yang ternyata masih belum tersentuh oleh jaringan

infrastruktur telekomunikasi. Misalnya saja, kawasan perbatasan yang sebagian besar berupa laut dan pulau-pulau kecil. Akibatnya, pembangunan infrastuktur seringkali mahal dan tidak efisien. Banyaknya komunitas yang terpencar satu sama lain, banyaknya perbukitan, pegunungan dan daerah-daerah yang terpencil juga menyulitkan pembangunan infrastruktur tersebut.

Untuk daerah rural seperti halnya daerah pertanian dan lapangan terbuka juga banyak ditemui di daerah-daerah diseluruh Indonesia. Untuk membangun infrastruktur-infrastruktur telekomunikasi di daerah tersebut tentu terlalu mahal biayanya jika dibandingkan dengan jumlah penggunanya yang ada disana. Sementara untuk daerah urban terutama untuk kota-kota besar dimana disana terdapat pusat bisnis dan perkantoran, infrastruktur telekomunikasi adalah merupakan keniscayaan. Akan tetapi dengan banyaknya bangunan-bangunan yang tinggi, gedung-gedung bertingkat dan pencakar langit tentu akan menjadi penghalang bagi sinyal untuk berpropagasi.

Pada umumnya didalam jaringan-jaringan telekomunikasi selular dewasa ini ada tiga masalah yang sangat fundamental yang seringkali terjadi, yaitu masalah kurangnya kapasitas, daerah cakupan (*coverage*) dan interferensi. Ketiga efek tersebut adalah tidak independen, misalnya saja adalah bahwa interferensi akan berdampak pada *coverage* dan kapasitas sistem tersebut. Dan sebagai solusi untuk mengatasi persoalan-persoalan tersebut diatas, teknologi relay adalah dapat dipertimbangkan. Teknologi relaying tersebut kini telah diadopsi, distandarkan dan dispesifikasikan pada 3GPP LTE-Advanced (LTE release 10) yang merupakan peningkatan dari generasi selular terbaru 4G LTE (LTE release 8 dan 9). Teknologi 4G LTE (release 8 dan 9) sendiri kini sudah mulai dioperasikan di beberapa kota besar di Indonesia sejak tahun 2014 yang lalu.

2. Perkembangan Telekomunikasi Selular di Indonesia

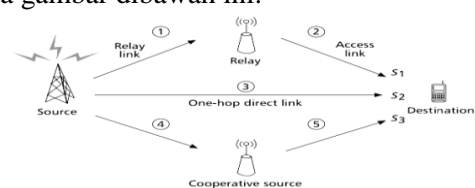
Perkembangan teknologi telekomunikasi di Indonesia juga dipengaruhi oleh perubahan teknologi telekomunikasi dunia. Teknologi selular sendiri masuk ke Indonesia untuk pertama kalinya pada tahun 1984 dengan basis teknologi *Nordic Mobile telephone* atau NMT. Mulai saat itu hingga tahun 1992 hanya ada dua

teknologi selular, dan keduanya masih dalam bentuk analog, yaitu NMT 470 yang merupakan modifikasi dari NMT 450 dan *Advanced Mobile Phone System* atau AMPS. Kemudian seiring dengan perkembangan teknologi seluler yang mengarah ke teknologi digital, pada bulan oktober 1993, Telkom memulai proyek percontohan selular digital yang disebut dengan *Global system for Mobile Communication* (GSM). Dan pada tanggal 15 Agustus 2006 adalah merupakan hari yang bersejarah bagi industri selular Indonesia. Dimana pada saat itu, Telkomsel melakukan *kick off* implementasi layanan 3G di Indonesia.

Delapan tahun kemudian, tepatnya di tahun 2014 yang lalu, teknologi selular generasi terbaru, yaitu 4G LTE (release 8 dan 9) juga sudah mulai dioperasikan di beberapa kota besar di Indonesia. Sementara LTE-Advanced (release 10) yang merupakan peningkatan dari LTE (release 8 dan 9) juga telah dirilis dan kemungkinan juga akan diadopsi di Indonesia. Sebagaimana generasi yang sebelumnya, LTE-Advanced juga menggunakan teknologi OFDM pada *air interface*-nya dan salah satu fitur utamanya adalah teknologi *relaying*. Teknologi relaying pada LTE-Advanced tersebut merupakan teknologi yang relatif baru, yang diadopsi dari teknologi relay dan *cooperative communications*. Relaying LTE-Advanced adalah sangat tepat untuk diterapkan di Indonesia untuk mengatasi problem-problem telekomunikasi yang telah disebutkan pada diskusi dan pembahasn sebelumnya.

E. TEKNOLOGI RELAYING PADA LTE-ADVANCED

Pada diskusi sebelumnya, kita telah membahas mengenai konsep *relay channel* dan *cooperative communication* atau *cooperative relaying*. Sekedar mererefresh kembali bahwa model *relaying* klasik tiga node adalah suatu jaringan yang hanya terdiri dari satu terminal sumber (*source node*), satu terminal relay (*relay node*) dan satu terminal tujuan (*destination node*) seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.

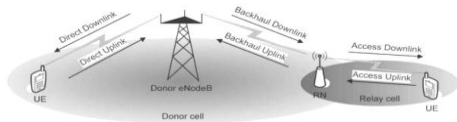


Gb. 5. Jaringan relay klasik tiga node dan cooperative relaying

Karena kebutuhan akan komunikasi data kecepatan tinggi adalah meningkat, *cooperative communications* diantara sel-sel (perangkat BTS) yang bertetangga dan perangkat mobil UE adalah sangat intensive dipelajari. Salah satu fokus utama dari studi-studi ini adalah untuk meningkatkan *throughput* data pada *cell edgeuser*. Untuk meningkatkan *throughput* dari *cell edge* user tersebut, sel-sel yang bertetangga bekerjasama (*cooperate*) untuk meningkatkan kualitas sinyal dan/atau menurunkan level interferensi diantara sel-sel tersebut. Selain daripada itu, perluasan cakupan atau *coverage extention* melalui penggunaan suatu relay adalah juga merupakan fokus riset lainnya dari *cooperative communications*. Didalam suatu sistem selular yang konvensional, suatu *wired backhaul* adalah merupakan pengeluaran *cost* yang utama dari biaya maintenance suatu jaringan selular. Oleh karenanya teknologi *relaying* pada LTE-Advanced adalah diperkenalkan untuk mengurangi biaya *wired backhaul* tersebut.

1. Arsitektur Relaying LTE-Advanced

Sebelum pembahasan mengenai arsitektur *relaying*, berikut ini adalah beberapa terminologi yang dipakai dalam standar 3GPP LTE-Advanced:



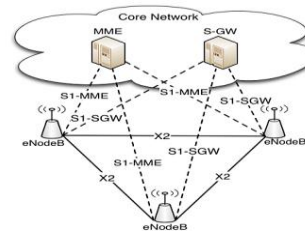
Gb. 6. Beberapa terminologi untuk relaying pada LTE-Advanced

- **Donor eNodeB** atau eNB donor, yaitu sumber dimana suatu node relay RN menerima sinyal-sinyalnya.
- **Donor cell** atau sel donor, yaitu daerah cakupan (*coverage area*) dari eNB.
- **Relay Node** atau node relay (RN), yaitu node jaringan yang dihubungkan secara wireless dengan suatu eNB sumber.
- **Relay cell** atau sel relay, yaitu daerah cakupan (*coverage area*) dari RN.
- **Backhaul link** atau link backhaul, yaitu link antara eNB dan RN.
- **Access link** atau link akses, yaitu link antara RN dan UE.
- **Direct link** atau link langsung, yaitu link antara eNB dan UE.



Gb. 7. Skema dasar relaying RN

Gambar diatas adalah merupakan skema dasar *relaying* yang dispesifikasikan pada standar LTE-Advanced. Node relay RN adalah dihubungkan secara wireless pada jaringan akses radio (*radio access network*) melalui suatu eNB donor dan melayani *user equipment* (UEs) yang berada didalam daerah cakupannya (*coverage area*). *Evolved packet core* atau EPC adalah sangat berbeda dengan jaringan inti (*core network*) GSM/GPRS yang digunakan untuk GSM dan WCDMA/HSPA. EPC hanya mendukung *packet-switched domain* tanpa mendukung *circuit-switched domain* [3]. Didalam jaringan EPC terdapat banyak elemen-elemen jaringan tetapi hanya ada satu elemen didalam jaringan akses radio yaitu *evolved NodeB* (eNB).



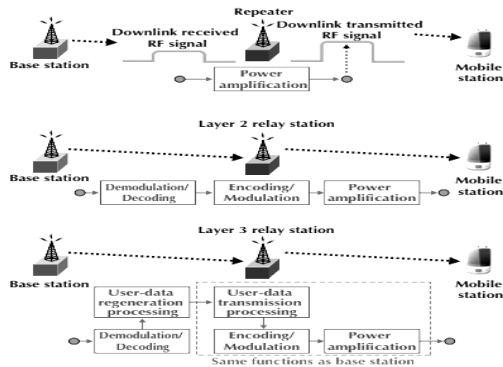
Gb. 8. Arsitektur jaringan EPC [Yangyang Chen et al.]

Gambar diatas merupakan arsitektur jaringan *evolved packet core* atau EPC. eNB-eNB yang bertetangga adalah saling dihubungkan melalui *interface X2*, yang memungkinkan untuk saling berkomunikasi secara langsung. Suatu eNB adalah dihubungkan dengan MME/SAE Gateway melalui *interface S1*. Satu eNB adalah melayani satu atau lebih RN. Fungsi-fungsi *S1* dan *X2* adalah disediakan pada RN oleh eNBnya untuk interkoneksi dengan node-node pada jaringan lain (misalnya eNB, MME dan S-GW). Oleh karenanya eNB berlaku sebagai sebuah proxy untuk RN. Untuk *S1* dan *X2*, fungsi-fungsi proxy tersebut ditangani oleh eNB. Karena fungsionalitas proxynya, eNB nampak sebagai sebuah MME (untuk *S1-MME*), sebuah eNB (untuk *X2*) dan sebuah S-GW (untuk *S1-U*) pada RN tersebut. eNB juga menangani fungsi-fungsi S-GW dan PDN GW yang diperlukan untuk operasi RN [23].

2. Tipe-Tipe Layer Relay LTE-Advanced

Salah satu topik yang didiskusikan pada 3GPP adalah dengan fungsi-fungsi apa suatu RN seharusnya diperlengkapi. Keputusan mengenai topik ini menentukan fungsi-fungsi

mengenai operasi *relaying* dari RN tersebut dengan sudut pandang *protocol stack*, yaitu pada layer protokol yang mana operasi *relaying* tersebut dilakukan. Berdasarkan layer protokol dimana data user tersebut adalah direlay, relay RN dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu layer 1 RN (*amplify and forward*), layer 2 RN (*decode and forward*) dan layer 3 RN (*self backhauling*).



Gb. 9. Tipe-tipe layer dari relay LTE Advanced [Mikio Iwamura et al.]

Layer 1 RN. Pada suatu layer 1 RN, tidak ada pemrosesan layer 2 yang dilakukan (misalnya proses *decode/reencode*) oleh relay RN. Relay tersebut hanya melakukan pemrosesan radio frekuensi (RF), dimana sinyal-sinyal radio RF yang diterima pada arah *downlink* DL dari suatu base station hanya dilakukan amplifikasi atau penguatan dan setelah itu sinyal diforward atau diteruskan pada *mobile station*. Dengan cara yang sama, sinyal-sinyal radio RF yang diterima pada arah *uplink* UL dari *mobile station* diperkuat dan kemudian diteruskan pada *base station*. Relay tipe ini disebut juga dengan *repeater* atau *booster* dan teknologi yang digunakan adalah *amplify and forward* (AF). Keuntungan dari layer 1 RN ini adalah bahwa fungsi-fungsi perangkatnya yang relatif sederhana, implementasi yang *low cost* dan pemrosesan delay yang singkat (tipikalnya kurang dari beberapa microsecond). Delay tersebut terutama disebabkan oleh proses *filtering* yang dilakukan didalam repeater tersebut. Sementara kekurangannya adalah bahwa karena tidak adanya proses *decoding/reencoding*, noise yang ditambahkan pada sisi receiver dari repeater tersebut adalah juga ikut diperkuat bersama-sama dengan sinyal yang diinginkan. Akibatnya, SINR tidak dapat ditingkatkan diantara input repeater dan output repeater.

Layer 2 RN. Layer 2 RN adalah merupakan tipe relay dengan teknologi *decode and forward* (DF) dimana sinyal-sinyal radio RF yang diterima pada arah *downlink* DL dari suatu *base station* eNB dilakukan proses *demodulation/decoding* kemudian proses *modulation/reencoding*, *power amplification* dan setelah itu baru diforward atau diteruskan pada *mobile station* (UE). Layer 2 RN tidak terlibat didalam pengontrolan operasi dari layer-layer yang lebih tinggi dari PHY layer. Dengan kata lain, tidak isu-isu *scheduling information* ataupun *control signal*. Pensinyalan kontrol atau *control signalling* adalah ditangani oleh eNB donor. Maka suatu layer 2 RN tidak dapat men-generate suatu *cell* yang lengkap dan adalah hanya sebagian *donor cell* dari perspektif UE. Agar supaya dapat diidentifikasi oleh terminal pengguna UE sebagai suatu titik pentransmisi atau penerimaan jaringan, suatu *physical Cell_ID* (PCI) yang disinyalkan oleh suatu sinyal-sinyal sinkronisasi primer dan sekunder (PSS/SSC) adalah diperlukan. Kehadiran dari suatu PCI memerlukan identifikasi layer 3 oleh UE tersebut. Disisi lain, beberapa fungsi-fungsi layer 3, seperti misalnya *radio resource control* (RRC), adalah dilokasikan didalam eNB tersebut daripada di dalam RN. Lalu meskipun *cell* itu sendiri direalisasikan dalam RN, hanya fungsi-fungsi layer 2 yang adalah diimplementasikan disana.

Sebagai alternatifnya, suatu layer 2 RN dapat direalisasikan tanpa UE tersebut mengidentifikasi itu sebagai suatu titik pentransmisi atau penerimaan jaringan dan tidak diperlukan adanya PCI dalam kasus ini. Dalam kasus seperti itu, relay tersebut boleh jadi bekerja dengan eNB dengan cara bekerjasama (*cooperation*), sebagai contoh hanya untuk transmisi dari paket-paket. Suatu layer 2 RN boleh jadi juga dapat mensupport fungsi-fungsi *radio link control* (RLC) seperti misalnya *automatic retransmission request* (ARQ) dan fungsi-fungsi *segmentation* atau *concatenation*.

Keuntungan dari layer 2 RN adalah bahwa pemrosesan *demodulation/decoding* yang dilakukan pada stasiun relay tersebut akan mengatasi kekurangan-kekurangan yang terjadi pada layer 1 RN atas penerimaan SINR yang buruk yang disebabkan oleh penguatan dari *intecell interference* dan *noise*. Jadi pada proses *decode and forward* tersebut, *noise* yang

ditambahkan pada sisi receiver akan dibuang. Sementara kekurangannya adalah delay yang substansial (tipikalnya beberapa milisecond) terjadi selama operasi relaying (terutama selama proses *decoding*).

Layer 3 RN. Suatu layer 3 RN mempunyai PCI (*Physical Cell_ID*) yang unik yang disinyalkan oleh PSS/SSS. Dengan cara ini, suatu stasiun mobil UE dapat mengenali bahwa suatu *cell* disediakan oleh suatu stasiun relay RN yang berbeda dari suatu *cell* yang disediakan oleh suatu *base station* eNB. Kemudian mobilitas diantara RN dan eNB adalah didasarkan pada RRC (*radio resource control*) pada layer 3 *control plane*. Pada *user plane* tersebut, suatu layer 3 RN mensupport protokol-protokol setidaknya hingga PDCP¹ (*packet data convergence protocol*), misalnya *IP packet handling*. Semua fungsi-fungsi layer 1 dan layer 2 adalah disupport pada protokol layer 3 RN ini.

Seperti halnya layer 2 RN, layer 3 RN juga melakukan proses *demodulation/decoding* terhadap sinyal RF yang diterima pada arah *downlink* dari suatu *base station* eNB, tetapi kemudian melanjutkan untuk melakukan pemrosesan (seperti misalnya *chipering* dan *user-data*

concatenation/segmentation/reassembly) untuk pentransmisian data user pada suatu antarmuka radio (*radio interface*) dan akhirnya melakukan *encoding/modulation* dan mentransmisikannya pada *mobile station* UE. Serupa dengan layer 2 RN, layer 3 RN juga dapat meningkatkan *throughput* dengan cara mengeliminasi *inter-cell interference* dan *noise*, dan sebagai tambahan, dengan menggabungkan fungsi-fungsi yang sama seperti halnya sebuah eNB, dia dapat mempunyai dampak yang kecil terhadap spesifikasi-spesifikasi standar untuk teknologi relay radio dan pada implementasinya.

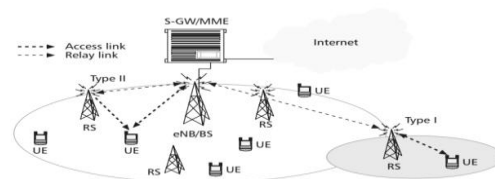
Kekurangannya, bagaimanapun, adalah delay yang disebabkan oleh pemrosesan data user sebagai tambahan atas delay yang disebabkan oleh pemrosesan *modulation* atau *demodulation* dan *coding* atau *decoding*.

¹PDCP (Packet Data Convergence Protocol) layer mengkompres IP header dari paket-paket user untuk dapat mengurangi jumlah dari bit-bit yang sedang mentransmisikan sepanjang (*over*) *interface radio* tersebut. Fungsi utama yang lain dari PDCP adalah *chipering*. Ada satu entitas PDCP per *radio bearer* yang dikonfigurasi untuk sebuah terminal.

3. Tipe-Tipe Teknologi Relay LTE-Advanced

Ada dua tipe relay RN yang menjadi topik pembahasan dalam standard 3GPP LTE-Advanced, yaitu tipe 1 RN dan tipe 2 RN.

Tipe 1 RN. Pada suatu tipe 1 RN (*non-transparent relay*), RN dapat membantu suatu *remote unit* UE yang berlokasi jauh dari suatu *base station* eNB, untuk mengakses eNB tersebut. Oleh karenanya relay pada tipe 1 RN perlu mentransmisikan *common reference signal* dan *control information* untuk eNB tersebut dan tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan sinyal dan layanan *coverage* seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gb. 10. Suatu skenario penggunaan relay tipe 1 dan relay tipe 2 dalam LTE Advanced [Yang Yang et al.]

Tipe 1 RN (*non-transparent relay*) terutamanya melakukan "*IP packet forwarding*" pada network layer (layer 3) dan dapat membuat beberapa kontribusi terhadap keseluruhan kapasitas sistem dengan memungkinkan layanan-layanan komunikasi dan transmisi-transmisi data untuk unit-unit UE yang remote. Relay tersebut dikatakan tipe 1 RN, artinya bahwa dia menciptakan PIC nya sendiri, yaitu mentransmisikan *Cell_ID* nya sendiri, sinyal-sinyal sinkronisasi (*synchronization signal*) nya sendiri dan sinyal-sinyal referensi (*reference signal*) nya sendiri. UE tersebut hanya berkomunikasi dengan RN dan adalah jelas bagi eNB. Sehingga, dari perspektif sebuah UE, tipe 1 RN ini nampak seperti sebuah eNB yang konvensional dan tidak dapat dibedakan darinya. Satu-satunya perbedaan dari *macrocell* eNB yang konvensional adalah bahwa tipe 1 RN ini mempunyai suatu link *backhaul wireless* sebagai pengganti *wired backhaul*. Oleh karenanya, RN ini mempunyai semua fungsi-fungsinya *scheduling* dan alokasi sumber daya sebagai tambahan atas fungsi-fungsi *physical layer*.

Tipe 2 RN. Sementara itu, suatu tipe 2 RN (*transparent relay*) dapat membantu suatu unit UE lokal, yang adalah berlokasi masih berada

didalam jangkauan suatu eNB dan mempunyai suatu link “*direct communication*” dengan eNB tersebut untuk meningkatkan kapasitas link dan kualitas layanannya. Sehingga suatu tipe 2 RN tidak mentransmisikan “*common reference signal*” ataupun “*control information*”, dan tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan keseluruhan kapasitas sistem dengan mencapai *multipath diversity* dan *transmission gain* untuk unit-unit lokal UE.

Tidak seperti halnya tipe 1 RN, yang mempunyai suatu cell ID yang independen, tipe 2 RN tidak mempunyai suatu cell ID nya sendiri yang independen. Oleh karenanya, adalah tidak memungkinkan baginya untuk beroperasi sebagai suatu eNB yang independen. Suatu relay tipe 2 RN adalah digunakan untuk meretransmisikan paket-paket HARQ setelah node relay tersebut telah berhasil menerima paket-paket PDSCH¹ yang dikirimkan pada UEs. Oleh karenanya, suatu tipe RN ini hanya dapat mengirimkan retransmisi dari PDSCH dan sinyal-sinyal referensi yang terkait untuk demodulasi. Suatu tipe 2 RN adalah tidak diijinkan untuk mentransmisikan SCH, RS atau PDCCH². Oleh karenanya, adalah sulit untuk mempertimbangkan kualitas sinyal dari tipe 2 RN didalam menghitung CQI yang digunakan untuk modulasi *adaptif* dan *coding*.

Berikut tabel ringkasan perbandingan dari relay tipe 1 RN dan tipe 2 RN tersebut.

Tabel 1. Perbandingan dari dua tipe relay wireless

	Type 1 relay	Type 2 relay
Cell ID	Relay has a unique cell ID (relay operates as an independent cell)	Cannot have a unique cell ID
Data transmission	Transmits all DL data channel	Retransmits PDSCH HARQ
SYNC, CRS transmission	Transmits	Does not transmit
Notes	Major work item for Release 10	

Pada 3GPP, telah disepakati untuk menstandarkan spesifikasi untuk teknologi relay layer 3 pada LTE release 10 karena fitur-fitur diatas mempunyai *improved received SNR* melalui eliminasi interferensi dan noise, memudahkan pengkoordinasian spesifikasi-spesifikasi standar, and memudahkan

¹ PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) adalah kanal downlink *data bearing* yang utama pada LTE. Dia digunakan untuk semua data user juga untuk informasi sistem broadcast.

² PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) adalah digunakan untuk membawa message *downlink control information* (DCI) atau informasi kontrol downlink seperti misalnya *downlink scheduling assignments* dan *uplink schedulink grants*. Pada umumnya, beberapa PDCCH dapat ditransmisikan pada sebuah subframe.

implementasi. Suatu relay tipe 1 RN adalah suatu layer 3 RN yang dikarakterisasikan sebagai berikut :

- Dia mengontrol *cell*, dimana masing-masingnya (RN) terlihat pada UE sebagai sebuah *cell* yang terpisah dari donor *cell*.
- *Cell* tersebut mentransmisikan identitasnya sendiri yang dapat dikenali oleh UE, mentransmisikan sinyal kontrolnya sendiri seperti misalnya kanal-kanal sinkronisasi (*synchronization channel*) dan sinyal-sinyal referensi (*reference signals*).
- Dalam konteks suatu operasi sel tunggal, UE tersebut menerima informasi *scheduling* dan *feedback HARQ* secara langsung dari RN dan mengirimkan kanal-kanal kontrolnya pada RN

Suatu relay tipe 2 RN adalah suatu layer 2 RN yang dikarakterisasikan sebagai berikut:

- Dia tidak mentransmisikan *Cell_ID* nya sendiri yang terpisah dari eNB dan karenanya tidak dapat menciptakan suatu *cell* yang terpisah.
- Dapat mentransmisikan data pada PDSCH.
- Terminal-terminal UE yang dilayani oleh relay tipe 2 mendapatkan *control signaling* dari eNB.

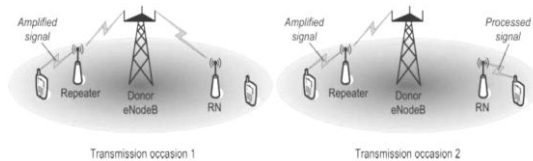
Dia dapat mentransmisikan the *downlink physical data channel* tetapi dia tidak mentransmisikan the *downlink physical control channel* and *cell-specific reference signal* yang adalah digunakan untuk demodulasi dari kanal kontrol downlink (*downlink control channel*) dan pengukuran kanal UE.

4. Perbedaan Pemrosesan Sinyal Repeater dan Relay RN

Teknologi relay pada spesifikasi 3GPP ini dapat dipandang sebagai sebuah evolusi dari repeater untuk mengatasi masalah-masalah pada sistem selular dewasa ini. Suatu node relay RN adalah suatu node jaringan yang dihubungkan secara wireless pada suatu eNB donor. Suatu karakteristik yang penting dari RN adalah bahwa mereka dibawah kontrol penuh dari jaringan akses radio (*radio access network*), yang mengijinkan monitoring yang serupa dan kemampuan-kemampuan mengontrol remote (*remote control capabilities*) seperti halnya sebuah eNB.

Berlawanan dengan sebuah repeater, suatu relay RN memproses sinyal yang diterima sebelum memforwardnya; ini boleh jadi

melibatkan operasi-operasi layer 1, layer 2 dan layer 3, sehingga sebuah relay RN pada prinsipnya, mempunyai *range* dari suatu *enhanced repeater* hingga suatu *fully fledged eNodeB* dengan suatu koneksi *backhaul wireless*. Dan juga berlawanan dengan delay minimal yang dihasilkan melalui proses amplifikasi sederhana dari sebuah repeater, pemrosesan yang dilakukan oleh suatu relay RN memerlukan sedikitnya dua kejadian-kejadian transmisi untuk mengantarkan (*deliver*) sinyal dari eNB donor menuju suatu UE seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.

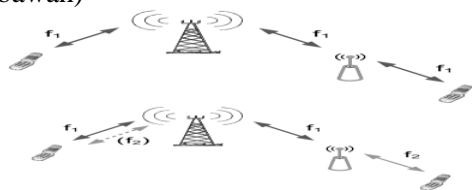


Gb.11. Fase-fase penerimaan dan pengiriman dari sebuah repeater dan node relay [Eric Hardouin et al.]

5. Pemisahan Link Backhaul dan Link Akses

Topik lain yang penting didalam diskusi relaying 3GPP adalah bagaimana memisahkan link *backhaul* dan link akses. Pemisahan link ini adalah penting untuk dapat menghindari terjadinya *self-interference*. Ada dua pendekatan yang telah didiskusikan untuk menghindari *self-interference* tersebut. Pertama adalah *relaying* dengan pemisahan berdasarkan domain waktu yang disebut dengan *inband*. Sementara yang kedua adalah pemisahan berdasarkan domain frekwensi yang disebut sebagai *outband*.

- **Inband.** Link antara eNB makro dan node relay RN menggunakan band frekwensi yang sama dengan yang digunakan untuk link eNB makro menuju UE (gambar 3.15 bagian atas)
- **Outband.** Link antara eNB makro dan node relay RN menggunakan band frekwensi yang berbeda dari link eNB makro menuju UE (gambar 3.15 bagian bawah)

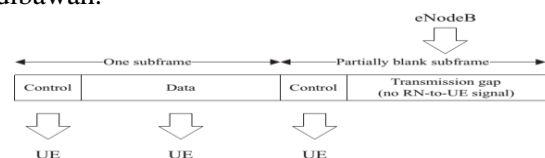


Gb.12. Inband relaying (atas) dan outband relaying (bawah)

Pada pembahasan disini, kami fokus untuk mendiskusikan kasus *inband relaying*, kasus yang memerlukan penanganan lebih cermat. Sementara untuk kasus *outband relaying* adalah cukup jelas karena mereka menggunakan dua band frekwensi yang berbeda sehingga isu *self interference* tidak begitu mengganggu.

Operasi Inband Relaying

Pada operasi *inband relaying*, pemisahan link adalah dilakukan berdasarkan domain waktu, terutamanya untuk *inband half-duplex relaying*. Pada kasus *inband*, link *backhaul* antara node relay RN dan eNB adalah menggunakan band frekwensi yang sama dengan yang digunakan oleh eNB donor pada *donor cell*. Untuk suatu node relay yang beroperasi pada sebuah *inband relaying*, adalah sulit untuk menerima data dari eNodeB makro, sementara pada saat yang bersamaan mentransmisikan sebuah sinyal *downlinkDL* pada UE dengan band frekwensi yang sama. Ini boleh jadi menghasilkan diskontinuitas didalam sinyal *downlink DL* yang dikirimkan dari suatu node relay RN, selama *subframe-subframe* ketika relay tersebut menerima data dari eNode makro. Pada suatu relay tipe 1 RN (layer 3 RN), suatu metode "*partial blanking*" adalah digunakan untuk suatu *downlink subframe* yang adalah dialokasikan pada transmisi dari eNB ke RN seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gb.13. Subframe-subframe DL dari eNB makro dan node relay RN [Dong In Kim et al.]

Metode *partial blanking* yang dimaksud adalah bahwa RN tersebut mentransmisikan beberapa simbol-simbol OFDM pada awal atau permulaan dari sebuah *subframe* untuk mentransmisikan kanal kontrol *downlink (downlink control channel)* dari node relay RN pada terminal-terminal UE dan dia tidak mentransmisikan suatu sinyal pada sisa-sisa dari simbol-simbol tersebut. Solusi yang digunakan untuk *inband relaying tersebut* adalah tidak mengirimkan suatu sinyal (pun) pada arah *downlink DL* dengan cara menciptakan "*gaps*" didalam *subframe-subframe* tersebut. Oleh karenanya, pengaturan waktu (*timing alignment*) adalah salah satu

dari isu-isu yang penting didalam merancang link *wireless backhaul*.

Suatu relay RN seharusnya juga mendukung user UE LTE release 8. Karena UE LTE release 8 adalah tidak dirancang untuk operasi *relaying* dan tidak mengetahui *subframe-subframe* ketika suatu node relay RN menswitch ke mode *DL reception*, mereka boleh jadi mengalami problem dari *subframes* ini yang dikonfigurasi sebagai *gaps* tersebut. Untuk terminal-terminal UE LTE release 8 yang berlokasi didalam suatu *relay cell*, node relay tersebut mendeklarasikan *subframe* ini sebagai *subframe multicast broadcast single frequency network (MBSFN)*, yang mana UE tersebut tidak harus menerima. Pada awalnya *subframe-subframe* MBSFN tersebut adalah digunakan untuk layanan *broadcast* didalam suatu sistem LTE (release 8). Dengan informasi ini, terminal-terminal UE LTE release 8 dapat membuang DL PDSCH dari *subframe-subframe* yang dikonfigurasi sebagai *gaps* tersebut.

Pada gambar diatas ditunjukkan sebuah contoh *timing* atau pengaturan waktu dari suatu eNB makro dan node relay RN. Gambar tersebut hanya memeplihatkan dua *subframe*. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa batas-batas *subframe* adalah diatur diantara eNB makro dan relay RN tersebut. *Subframe* pertama adalah tidak digunakan untuk link *backhaul*. Oleh karenanya, eNB makro dan node relay RN mentransmisikan data pada terminal-terminal UE pada *cell*-nya masing-masing. *Subframe* yang kedua adalah digunakan untuk link *backhaul* dan kemudian eNB makro tersebut dapat mengirimkan datanya pada node relay RN tersebut. (dan pada terminal-terminal UE didalam *macrocell* jika diperlukan). Oleh karenanya, node relay tersebut menghentikan transmisi *downlink* DL setelah transmisi PDCCH pada *subframe* yang kedua dan menswitch modenyanya pada mode menerima data yang dikirimkan melalui link *wireless backhaul*. *Subframe* yang kedua adalah dicatat sebagai suatu *subframe MBSFN* pada teminal-terminal UE pada *cell* yang dilayani oleh node relay tersebut. Terminal-terminal UE didalam suatu *relay cell* hanya dapat mendecode data dari node relay tersebut.

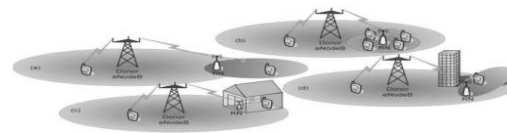
Adalah penting untuk dicatat bahwa karena suatu node relay RN perlu mentransmisikan beberapa informasi kontrol pada dua simbol-simbol yang pertama dari

subframe MBSFN, dia tidak dapat mendengar bagian kontrol dari *subframe* yang dikirimkan dari eNB donor pada link *backhaul*. Oleh karenanya *control signalling* untuk node relay tidak dapat ditransmisikan dengan menggunakan PDCCH yang regular. Sebagai akibatnya, suatu kanal kontrol yang baru, yang disebut dengan Relay PDCCH dan Relay PDSCH adalah diperkenalkan. R-PDCCH seharusnya memulai dengan cukup lambat sehingga node relay RN tersebut dapat menyelesaikan pentransmisian *control region*-nya sendiri dan menswitch dari mode *transmit* ke mode *receive*. R-PDCCH dan R-PDSCH adalah kanal-kanal untuk mengirimkan *control information* dan *data* pada node-node relay tersebut secara berturut-turut.

6. Skenario-Skenario Deploymen

Operasi-operasi *relaying* pada spesifikasi 3GPP LTE-Advanced yang telah kita diskusikan diatas tersebut dapat diaplikasikan untuk berbagai skenario, diantaranya adalah berikut ini:

- Cell coverage extention
- Capacity extention
- Indoor coverage enhancement
- Dead spot mitigation
- Temporary coverage
- Group mobility

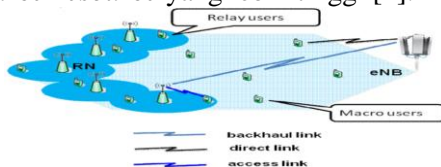


Gb. 14. Skenario-skenario deploymen

Coverage Extention(gambar 14.a). Pada daerah *rural*, *urban* dan *suburban*, suatu RN dapat digunakan untuk menyediakan peningkatan *coverage* yang *cost effective* tanpa harus membangun infratraktur *base station* eNB yang baru. Untuk daerah *rural*, karena *coveragenya* yang luas, maka daya pancar atau *transmit power* bisa diset sama dengan daya pancar untuk eNB makro yaitu sebesar 47 dBm. Kemudian untuk daerah *urban*, daya pancar biasanya lebih kecil dari eNB makro, yaitu sekitar 30 dBm. Sementara untuk daerah *suburban* tipikalnya bisa ditingkatkan hingga sebesar 37 dBm [7].

Suatu RN juga dapat meningkatkan *user experience* pada *cell edge* dimana kekuatan sinyal dari jaringan adalah menjadi lemah karena jauh dari eNB ataupun karena kondisi-kondisi kanal yang memburuk. Pada gambar 15

ditunjukkan contoh dimana pengguna-pengguna *cell edge* adalah dilayani oleh relay-relay RN sementara pengguna-pengguna makro adalah dilayani secara langsung oleh eNB donornya. Pengguna-pengguna yang berada di daerah batas dari sel atau *cell edge* yang dihubungkan dengan RN tersebut akan mengalami sensasi *path loss* yang rendah dan keuntungan dengan *resource-resource* yang lebih tinggi [2].



Gb.15. Skenario cell edge [Ömer Bulakci].

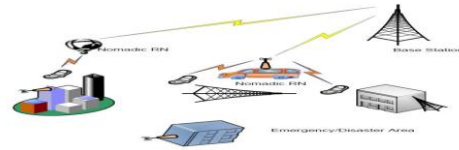
Capacity Extention (gambar 14.b). Pada skenario ini, suatu RN dapat digunakan untuk menyediakan peningkatan kapasitas, misalnya pada daerah *urban* dan *suburban* dimana jumlah pengguna disana cukup padat. Di daerah-daerah tersebut biasanya terdapat area-area tertentu dari suatu *cell* yang disebut sebagai *hot spot*.

Indoor Enhancement (gambar 14.c). Suatu RN dapat ditempatkan di dalam sebuah gedung untuk meningkatkan *coverage indoor*. Dalam kasus semacam itu, mereka dapat dipandang sebagai sebuah *femto* eNB atau *home* eNB dengan suatu *backhaul wireless*. Ini dapat digunakan terutama dalam kasus-kasus dimana user tersebut tidak mempunyai link ADSL, atau daerah-daerah dimana tidak ada jaringan infrastruktur kabel yang menyediakan akses *backhaul* tersebut.

Dead Spot Mitigation (gambar 14.d). Suatu RN dapat digunakan untuk memitigasi area *dead spot*, yaitu suatu *shadowing area* yang terisolasi dimana sinyal dari eNB tidak dapat menjangkau karena terhalang oleh gedung atau bangunan yang tinggi. Kasus-kasus seperti ini banyak terjadi di daerah urban atau daerah perkotaan dimana terdapat banyak bangunan-bangunan tinggi dan gedung-gedung perkantoran. RN yang akan dibangun tersebut tentunya harus dalam kondisi LOS terhadap eNB.

Temporary coverage. Sifat *self-backhaul* dari relay RN dapat dimanfaatkan untuk menyediakan jaringan *wireless* sementara atau *temporary wireless network*, misalnya dalam kasus terjadinya bencana alam, serangan teroris, atau selama diselenggarakannya suatu even seperti misalnya acara olah raga, *public gathering*, konser outdoor dan lain sebagainya.

Dalam kasus-kasus tersebut, jaringan temporer perlu dideploy dengan cepat untuk memenuhi sebagian fungsi-fungsi dari suatu *full-blown network*.



Gb. 16. Temporary coverage

Group Mobility. Suatu RN dapat ditempatkan pada sebuah kendaraan yang bergerak (*moving vehicle*) untuk menyediakan coverage bagi para user yang sedang berada didalam transportasi publik tersebut.



Gb. 17. Group mobility

F. APLIKASI RELAY PADA DAERAH RURAL DI INDONESIA

Negara Republik Indonesia seperti yang pernah dikatakan oleh Soekarno adalah “negara lautan” (*archipelago*) yang ditaburi oleh pulau-pulau atau dalam sebutan umum dikenal sebagai “negara kepulauan”. Indonesia membentang dari 6°08 LU hingga 11°15 LS, dan 94°45 BT hingga 141°05 BT. Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia terdiri dari sekitar 17.508 pulau sekitar 6000 diantaranya berpenduduk. Daerah-daerah di Indonesia terutamanya terbagi kedalam zona urban, suburban dan rural area. Urban adalah daerah perkotaan dengan jumlah penduduk yang cukup padat, suburban adalah daerah dipinggiran kota dengan jumlah penduduk yang juga sangat padat. Sementara itu rural adalah daerah pedesaan yang terpencil dengan area yang sangat luas akan tetapi dengan jumlah penduduk yang masih jarang dan tersebar satu dengan yang lainnya.

1. Pemerataan Pembangunan Infrastruktur Telekomunikasi di Indonesia

Pembangunan infrastruktur telekomunikasi di Indonesia boleh dikatakan sudah sangat maju dan terutamanya terpusat di daerah-daerah *urban* dan *suburban* yang memang jumlah penduduknya yang sangat padat. Namun demikian masih banyak beberapa daerah di Indonesia yang ternyata masih belum tersentuh oleh infrastruktur telekomunikasi, terutamanya adalah untuk daerah-daerah *rural* dan pedesaan. Hal ini seharusnya menjadi perhatian penting bagi semua pihak untuk dapat mengembangkan

dan mempercepat pembangunan infrastruktur telekomunikasi tersebut sehingga dapat dirasakan oleh seluruh lapisan masyarakat secara merata.

Berdasarkan informasi data dari badan pusat statistik bahwa hampir 50% lebih penduduk Indonesia yang tinggal di daerah *rural area* atau pedesaan adalah masih belum terjangkau oleh infrastruktur telekomunikasi. Karena tidak adanya infrastruktur tersebut disana seringkali mereka menjadi terpinggirkan dan asing terhadap dunia luar. Para operator penyedia layanan telekomunikasi nampaknya merasa berat untuk berinvestasi di daerah pedesaan karena biaya pembangunan jaringan selular konvensional yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan jumlah pengguna dan pemakai yang ada di daerah tersebut. Jadi pertanyaan pertama yang menjadi perhatian para operator jaringan adalah bagaimana caranya untuk menurunkan biaya *deployment* sementara pengguna disana bisa menikmati layanan komunikasi. Dalam kasus ini, relay, tentu saja dapat menyediakan solusi yang efektif dan efisien untuk mengatasi permasalahan-permasalahan diatas. Relay adalah pilihan yang terbaik jika dibandingkan harus melakukan pembangunan infrastruktur jaringan telekomunikasi yang baru disana (yaitu membangun BTS-BTS atau eNB-eNB yang baru).

2. Relay Sebagai Sebuah Solusi

Didalam skenario-skenario *rural*, terminal relay RN dapat digunakan untuk meningkatkan kapasitas dan *coverage* dengan *cost* yang dapat ditekan seminimal mungkin. Untuk suatu zona yang luas seperti halnya daerah *rural*, relay digunakan untuk meningkatkan *cell footprint* yang disediakan oleh suatu eNB makro. Relay RN semacam itu tipikalnya adalah dipasang (*mounted*) pada suatu *mast* yang tinggi, dengan suatu daya pancar yang sama dengan daya pancar eNB makro yaitu sekitar 46 dBm. RN juga dapat berguna untuk deployment pada suatu band frekwensi yang lebih tinggi daripada suatu 3G network, dan memungkinkan *coverage* yang sama untuk dipertahankan meskipun kondisi-kondisi propagasi yang buruk, tanpa harus meningkatkan jumlah *site-base station*.

Jarak yang jauh diantara eNB makro dan terminal relay RN berarti SNR yang rendah pada receiver relay RN. Dalam situasi tersebut jelas dibutuhkan paling tidak tipe relay *decode*

and forward untuk meningkatkan SNR pada terminal-terminal UE yang dilayani oleh relay RN tersebut. Relay *amplify and forward* adalah jelas tidak akan cocok untuk penggunaan disini karena noise pada receiver RN juga ikut diperkuat oleh repeater tersebut sehingga tidak ada peningkatan SNR. Kemudian untuk mencapai lebih banyak terminal pengguna UE tanpa terlalu banyak mendeploy relay RN, maka daya pancar atau *transmit power* dari RN dapat diset cukup tinggi bahkan bisa disamakan dengan daya pancar eNB makro sehingga *coverage* dari setiap RN dapat menjangkau beberapa kilo meter. *Coverage* aktual tersebut tergantung pada band atau frekwensi operasi dan lingkungan propagasinya. Pada umumnya propagasi *line of sight* atau LOS akan menjadi dominan sementara NLOS adalah relatif jarang jika *terrain* adalah tidak terlalu berbukit dan/atau tidak ditutupi dengan pohon-pohon yang tinggi.

Tabel dibawah ini adalah pertimbangan-pertimbangan yang akan menjelaskan mengapa kita lebih memilih menggunakan sebuah relay untuk membangun infrastruktur telekomunikasi di daerah *rural* ataupun daerah pedesaan yang terpencil dibandingkan harus membangun sebuah infrastruktur telekomunikasi BTS atau eNB yang baru.

Tabel 2. Pertimbangan-pertimbangan sebelum memutuskan apakah akan menggunakan sebuah eNode atau Relay

No	Item	BTS	Repeater
1	Microwave backhaul	Ya	Tidak
2	Wired backhaul	Ya	Tidak
3	Waktu instalasi lama	Ya	Tidak
4	Biaya infrastruktur dan operational mahal	Ya	Tidak
5	Routine maintenance	Ya	Tidak
6	Biaya ijin frekwensi untuk link backhaul	Ya	Tidak
7	Biaya berlangganan leased line pada network provider	Ya	Tidak
8	Mengonsumsi daya listrik besar	Ya	Tidak
9	Site rental mahal	Ya	Tidak
10	Membutuhkan space yang luas	Ya	Tidak
11	Daya transmit besar	Ya	Ya*

* Hanya untuk skenario rural, selain itu daya transmit relatif kecil

Penyediaan akses telekomunikasi yang *reliable* bagi masyarakat-masyarakat yang tinggal di daerah *rural* atau pedesaan yang terpencil

adalah tentu merupakan suatu tantangan. Tidak seperti halnya daerah-daerah *urban* ataupun *suburban* dimana jaringan pendukung untuk infrastruktur telekomunikasi tersebut adalah tersedia dengan segera, medan-medan di daerah *rural* biasanya adalah cukup berat dan tidak memungkinkan. Masyarakat-masyarakat di daerah *rural* juga seringkali mempunyai kesulitan untuk mendapatkan SDM lokal yang diperlukan untuk mengoperasikan dan memelihara dan juga mendiagnosa isu-isu didalam jaringan

Relay dapat dipertimbangkan sebagai sebuah bentuk dari *Distributed Antenna System*, dimana coverage dari suatu sektor adalah ditingkatkan hingga daerah sekitar layanan relay tersebut. Dengan DAS tersebut, *cell coverage* (ukuran dan bentuk) dapat diatur secara dinamis. Keberhasilan dalam penggunaan skenario relay sangat bergantung kepada aplikasinya yang tepat (misalnya link budget). Suatu *deployment* relay yang bagus harus dapat mempertahankan *gain* yang maksimum dengan isolasi yang dibutuhkan seminimal mungkin. Kebutuhan untuk isolasi adalah untuk mencegah unit tersebut dari osilasi dan tipikalnya suatu perbedaan 15 dB antara gain repeater dan *path loss* dari port ke port (donor/server). Semakin besar persyaratan isolasi semakin besar kebutuhan *spatial* pada deployment. Ini menyebabkan biaya-biaya akuisisi site lebih besar dan membatasi pemilihan kandidat yang potensial.

3. Perbandingan Biaya Deployment Repeater dan BTS

Pada dasarnya ada empat tipe biaya yang harus dikeluarkan didalam pembangunan sebuah perangkat wireless selular. Keempat biaya atau *cost* tersebut adalah biaya perencanaan sel (*cell site planning*), *site acquisition* (SITAC), instalasi dan *commissioning*. Tabel 3 memperlihatkan perbandingan biaya-biaya yang diperlukan untuk pembangunan sebuah BTS dan repeater. Daftar biaya yang disajikan dalam tabel tersebut adalah biaya tipikal, karena harga dari masing-masing perangkat adalah berbeda tergantung dari brand yang dipakai. Dari biaya perangkat saja dapat ditunjukkan bahwa harga sebuah BTS adalah jauh lebih mahal daripada harga sebuah repeater yaitu kira-kira sepuluh kali lipat dari harga sebuah repeater. Belum lagi dengan biaya-biaya lainnya sehingga adalah

wajar apabila para operator lebih memilih untuk menggunakan relay daripada BTS.

Tabel 3. Perbandingan biaya deployment repeater dan BTS yang tipikal [D.J. Shyy et al.; data diambil tahun 2005]

Items	Details	BTS	Repeater	Reference
Equipments	BTS or Repeater	215,000	20,000	+++
	MSC/BSC/Software (per BTS)	20,000	0	++
	Antenna System	15,000	10,000	+
	Others (Backup Battery, E1/T1 Line, etc)	10,000	3,000	+
Maintenance	Rental Cost for Site	12,000	6,000	+
	Maintenance/Repair	50,000	1,000	++
	Rental Cost for E1/T1	6,000	0	+
	Others (Electric charges, Tax, Etc)	3,300	250	+
Others	Site Acquisition	10,000	5,000	+
	Cell Planning /Commissioning	10,000	10,000	
	Installation	40,000	5,000	++
Total		391,300	60,250	Δ331,050

G. KESIMPULAN DAN SARAN

Relay adalah merupakan evolusi atau bentuk lain dari repeater yang selama ini telah banyak digunakan dalam sistem telekomunikasi radio. Relay yang merupakan fitur baru didalam standar 3GPP LTE-Advanced release 10 dapat digunakan untuk meningkatkan *coverage*, kapasitas dan *throughput* pada suatu jaringan selular. Selain berfungsi sebagai repeater, relay dalam spesifikasi LTE-Advanced ini dapat juga berfungsi layaknya sebuah *base station* atau eNB. Instalasi sebuah relay adalah jauh lebih sederhana dan *cost effective* dibandingkan dengan sebuah *base station* eNB yang baru. Selain daripada itu, relay juga tidak membutuhkan power yang besar seperti halnya suatu *base station* pada umumnya. Penggunaan relay LTE Advanced pada area *rural* atau daerah pedesaan adalah dibutuhkan untuk pemerataan layanan telekomunikasi di Indonesia. Diharapkan dengan tersedianya layanan telekomunikasi *broadband* di daerah *rural* tersebut akan dapat meningkatkan taraf hidup masyarakat di daerah *rural* atau pedesaan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Akyildiz Ian F., Gutierrez-Estevéz David M. dan Reyes Elias Chavarria. 2010. The Evolution to 4G Cellular Systems: LTE-Advanced. Physical Communication.
2. Bulakci Ömer. 2010. On Backhauling of Relay Enhanced Networks in LTE-Advanced. Licentiate Seminar, Department of Communications and Networking Aalto University.
3. Chen Yangyang dan Lagrange Xavier. 2013. Architecture and Protocols of EPC-LTE with Relay. *Collection des recherche de Telecom Bretagne*. hal 1-25.

4. Cover Thomas M, dan Thomas Joy A. 1991. *Elements of Information Theory*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
5. Cover Thomas M., dan El Gamal Abbas. 1979. Capacity Theorems for the Relay Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*. Volume IT-25 (5), hal. 572-584
6. Dohler Mischa., dan Li Yonghui. 2012. *Cooperative Communications: Hardware, Channel & PHY*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
7. Hardouin Eric, Laneman J.N., Golitschek Alexander, Suzuki Hidetoshi dan Gonsa Osvaldo. 2011. Relaying. Sesia Stefania, Touffik Issam dan Baker Matthew (ed). *LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, hal. 671-700. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
8. Hong Yao-Win, Huang Wan-Jen, Ciu Fu-Hsua dan Kuo C.C. Jay. 2007. Cooperative Communications in Resources-Constrained Wireless Network. *IEE Signal Processing Magazine*. Hal. 47-57
9. Imamura Mikio, Takahashi Hideaki dan Nagata Satoshi. Relay Technology in LTE-Advanced. *NTT DoCoMo Technical Journal*. Volume 12 (2), hal. 29-36.
10. Kim Dong In, Choi Wan, Seo Hanbyul dan Kim Byoung-Hoon. 2011. Partial Information Relaying and Relaying in 3GPP LTE. Hossain Ekram, Kim Dong In dan Bhargava Vijay K. (ed). *Cooperative Cellular Wireless Networks*, hal. 462-494. New York: Cambridge University Press.
11. Laneman J.N., Tse D.N.C. dan Wornell G. 2004. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*. Volume 50 (12), hal. 3062-3080.
12. Liu K.J. Ray, Sadek Ahmed K., Su Weifeng dan Kwasinski Andres. 2009. *Cooperative Communications and Networking*. New York: Cambridge University Press
13. Moon Hichan, Clerckx Bruno dan Khan Farook. 2011. Cooperative Communications in 3GPP LTE-Advanced Standard. Hossain Ekram, Kim Dong In dan Bhargava Vijay K. (ed). *Cooperative Cellular Wireless Networks*, hal. 425-461. New York: Cambridge University Press.
14. Nosratinia Aria, Hunter Todd E., dan Hedayat Ahmadreza. 2004. Cooperative Communication in Wireless Networks. *IEEE Communication Magazine*. Hal. 74-80.
15. Papadogiannis Agisilaos, Farber Michael, Saadani Ahmed, Nisar M. Danish, Weitkemper Petra, Sui Yutao, Svensson Tommy, Ktenas Dimitri, Cassiau Nicolas dan Martin de Morales Thiago. 2012. Advanced Relaying Concepts for Future Wireless Networks. *Future Network & Mobile Summit 2012 Conference Proceedings*. Hal 1-10.
16. Sendonaris Andrew, Erkip Elza, dan Aazhang Behnaam. 2003. User Cooperation Diversity – Part I: System Description. *IEEE Transactions on Communications*. Volume 51 (11), hal. 1927-1938.
17. Sendonaris Andrew, Erkip Elza, dan Aazhang Behnaam. 2003. User Cooperation Diversity – Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*. Volume 51 (11), hal. 1939-1948.
18. Soldani David dan Dixit Sudhir. 2008. Wireless Relay for Broadband Access. *IEEE Communication Magazine*, hal.58-66.
19. Shyy D.J., Stanziano Craig J., dan Lemson Paul. 2005. CDMA2000 Network Repeater Deployment Experience. IEEE 802.16 Presentation.
20. Tran Thien-Toan, Shin Yoan dan Shin Oh-Soon. 2012. Overview of Enabling Technologies for 3GPP LTE-advanced. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. Hal.1-12
21. Xi Mien, *Relay Channel*. 2003.(Online). (<https://www3.nd.edu/~jnl/ee698g/material/s/summaries/min.pdf>, diakses pada bulan Mei 2015)
22. Yang Yang, Hu Honglin, Xu Zing dan Mao Guokiang. 2009. Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems. *IEEE Communication Magazine*. hal.100-105.
23. Zhioua Ghayet El Mouna, Labiod Houda, Tabbane Nabil dan Tabbane Sami. 2013. LTE Advanced Relaying Standard: A Survey. *Springer Wireless Personal Communications*.Hal 1-19

