

Application of Adaptive QAM Modulation and Diversity Scheme for 30 GHz Cellular Communications under the Impact of Rain Attenuation in Indonesia

Gamantyo Hendratoro¹, Achmad Mauludiyanto¹, Ninik Dwi Yundariani¹

Abstract—In millimeter-wave wireless cellular systems like Local Multipoint Distribution Services (LMDS) rain attenuation is an essential factor of performance degradation. It can cause signal outages and poor quality of signal reception. To mitigate the problem, a combination of diversity and adaptive modulation is proposed. To investigate the impact of the use of these techniques, a simulation is performed for a 30 GHz cellular system to obtain SNR (signal-to-noise ratio), diversity gain, modulation level and BER (bit error rate). Analysis of the implementation of the combined techniques is accomplished by taking into account such factors as length of links and the combining method

Simulation results show that diversity can improve the overall system SNR. Diversity gain of up to 15 dB can be achieved on two 4-km converging links at 0.01% outage probability when maximal-ratio combining (MRC) is used. For systems with luxurious link design for which the clear-sky SNR is more than 30 dB, as considered in this paper, diversity and adaptive modulation do not significantly contribute to improvement of achievable transmission rate and BER performance. However, for systems with lower values of clear-sky SNR, use of both techniques will be more worthwhile.

Keywords— Adaptive modulation, Diversity, LMDS, Rain attenuation.

I. PENDAHULUAN

Local Multipoint Distribution Services (LMDS) merupakan layanan akses nirkabel pita lebar yang beroperasi pada frekuensi antara 20–40 GHz. LMDS menggunakan sistem akses seluler untuk arsitektur jaringannya, namun dengan terminal yang tetap. Sistem ini dapat mengirimkan sinyal dengan bit rate 1,5 Gbps pada downstream dan 200 MBps pada upstream [1]. Salah satu kendala utama dalam implementasi LMDS, terutama di daerah tropis, adalah redaman hujan. Redaman hujan akan memberikan dampak penurunan unjuk kerja sistem komunikasi radio yang beroperasi pada gelombang milimeter yang ditandai oleh nilai BER yang semakin besar [2]. Di daerah tropis dengan curah hujan yang tinggi seperti Indonesia, redaman hujan dapat mencapai lebih dari 85 dB pada lintasan radio sepanjang 5 km [3]. Oleh karenanya untuk dapat menerapkan LMDS di daerah tropis,

perlu dirancang teknik kompensasi redaman yang memanfaatkan variasi ruang-waktu dari redaman hujan.

Teknik kompensasi yang paling awal diusulkan orang adalah dengan mengubah-ubah daya pancar. Namun penerapan teknik ini pada jaringan seluler berpotensi meningkatkan tingkat interferensi kanal bersama untuk pelanggan pada sel yang berbeda [4]. Teknik diversity telah pula diusulkan oleh banyak peneliti. Menurut referensi [5], [6], [7] yang mengevaluasi kemungkinan penerapan diversity dengan memanfaatkan citra radar cuaca dengan hanya mempertimbangkan satu jenis metode combining, yaitu *selection combining*. Sepengetahuan penulis, belum ada satu pun makalah yang melaporkan hasil riset yang memberikan solusi menyeluruh berupa analisis ataupun eksperimen penggunaan modulasi adaptif dan diversity secara terintegrasi.

Makalah ini melaporkan analisis penerapan teknik diversity dengan beberapa metode combining yang umum digunakan serta dipadukan dengan modulasi adaptif, untuk mitigasi pengaruh redaman hujan pada komunikasi radio 30 GHz dengan panjang lintasan 1-4 km. Metode combining yang diuji adalah *Selection Combining* (SC), *Maximal Ratio Combining* (MRC) dan *Equal Gain Combining* (EGC). Teknik ini akan memanfaatkan pengiriman data yang sama, melewati kanal *fading* dari base station yang berbeda-beda melalui beberapa lintasan yang saling bebas. Pada modulasi adaptif, jika kanal mengalami redaman hujan, maka level modulasi akan diturunkan sesuai kondisi kanal untuk mempertahankan target BER. Teknik sejenis telah dilaporkan berturut-turut pada referensi [6], dan [7], namun hasil yang dilaporkan dalam makalah ini lebih komprehensif dan lebih akurat, khususnya dalam perhitungan BER berdasarkan nilai SNR terukur. Di samping itu, pada dua makalah terdahulu metode EGC tidak dipertimbangkan, padahal teknik ini menjanjikan kompromi yang baik antara kompleksitas dan kualitas jika dibandingkan dengan SC dan MRC [8].

Mengikuti bagian pendahuluan ini akan dibahas dasar-dasar teknik modulasi adaptif dan diversity, diikuti dengan bagian berikutnya mengenai model sistem yang diuji beserta teknik pengujian menggunakan simulasi. Analisis hasil simulasi dibahas pada bagian 4 yang diikuti dengan kesimpulan sebagai penutup makalah.

II. MODULASI ADAPTIF DAN DIVERSITY

A. Modulasi Adaptif

Ide yang mendasari modulasi adaptif adalah bagaimana mengestimasi kanal dan mengumpukan-balikkan hasil esti-

Naskah diterima 29 Nopember 2006; selesai revisi pada 15 April 2008

¹ Gamantyo H., Achmad M., dan Ninik D.Y. adalah dosen Jurusan Teknik Elektro, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, INDONESIA.

masi ini ke pemancar, sehingga pemancar dapat mengadaptasikan parameter transmisinya sesuai dengan kondisi kanal. Pada suatu sistem adaptif dengan variasi laju data (*variable rate*), laju data disesuaikan dengan kondisi kanal. Jika kanal dalam keadaan buruk, maka laju data diturunkan dan jika kondisi kanal lebih baik mencapai *threshold* tertentu, maka laju data dinaikkan.

Untuk penerapan teknik variasi laju data, ditetapkan *threshold* SNR yang diterima untuk memutuskan penggunaan level modulasi yang digunakan. Jika SNR lebih kecil dari nilai *threshold* 64-QAM yang disyaratkan untuk mendapatkan target BER, maka penerima mengirim informasi ke pemancar untuk menurunkan level modulainya ke 16-QAM dan seterusnya. Jika suatu saat SNR lebih kecil dari batas bawah 4-QAM, maka transmisi dihentikan, sampai akhirnya SNR yang diterima berada minimal \geq dari batas bawah 4-QAM [9].

B. Teknik Diversity

Konsep diversity sangat sederhana yaitu jika satu lintasan gelombang radio mengalami gangguan yang disebabkan oleh fading, dimungkinkan ada lintasan-lintasan lainnya yang memiliki sinyal lebih bagus. Dengan adanya banyak lintasan untuk dipilih, maka rata-rata SNR dapat diperbaiki pada penerima. Skenario site diversity dengan selection combining dapat dijelaskan dengan Gambar 1. Suatu terminal pelanggan (ST) dilayani oleh tiga hub, dimana dalam hal ini hub 1 (terdekat) menjadi default. Pada saat hub 1 mengalami degradasi unjuk kerja karena hujan, maka hub 2 dan hub 3 dapat menggantikan tugas hub 1 dengan asumsi pada penerima terdapat teknologi untuk memonitor secara kontinyu dan simultan *link* penerima ke semua hub [6].

Keberhasilan teknik diversity diukur dengan parameter diversity gain $G(p)$ yang didefinisikan sebagai penurunan redaman dalam dB yang dicapai dengan teknik diversity relatif terhadap redaman pada link tunggal yang menjadi default untuk suatu persentase waktu p tertentu. Secara matematis:

$$G(p) = A(p) - A_d(p) \quad (1)$$

dengan $A(p)$ menyatakan nilai redaman (dB) yang memiliki probabilitas p untuk terlampaui pada satu link yang menjadi default dan $A_d(p)$ adalah redaman yang terlampaui dengan probabilitas p pada sistem diversity dengan dua link. Dalam perencanaan link, nilai p terkait dengan probabilitas terjadinya outage di mana redaman yang terjadi menyebabkan kualitas sinyal (daya yang diterima, SNR, ataupun kinerja BER) melebihi nilai ambang yang masih diperbolehkan. Jika diasumsikan bahwa site diversity melibatkan dua link dengan daya noise yang sama, maka diversity gain dapat dituliskan sebagai:

$$G(p) = \gamma_d(p) - \gamma(p) \quad (2)$$

di mana $\gamma_d(p)$ dan $\gamma(p)$ berturut-turut adalah SNR yang dicapai oleh konfigurasi diversity dan konfigurasi link tunggal jika ditinjau pada probabilitas outage p .

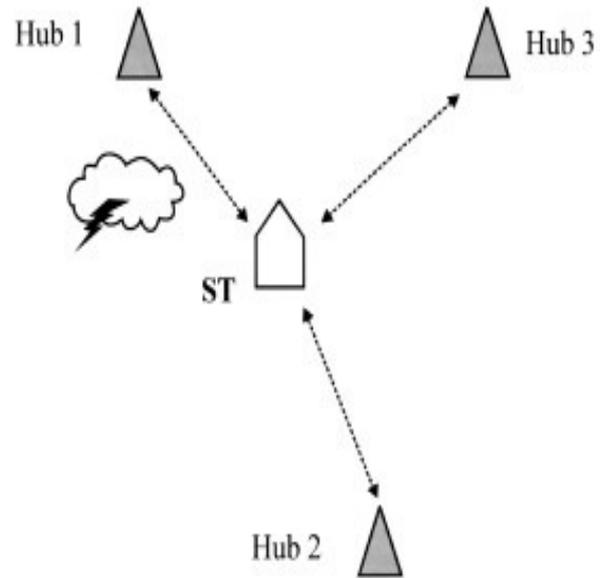
a. Selection Combining

Pada teknik ini, penerima memilih sinyal yang paling baik, dalam hal ini sinyal dengan SNR terbesar. Blok diagram dari metoda ini ditunjukkan pada Gambar 2, di

mana sinyal pada K cabang diversity masuk ke rangkaian pemilih, dan output merupakan sinyal terkuat yang dipilih [8]. Nilai SNR dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$\gamma_d = \max(\gamma_1, \dots, \gamma_M) \quad (3)$$

dimana γ_n menyatakan SNR pada lintasan ke- n . Metoda ini sangat mudah diimplementasikan, tapi tidak memberikan hasil yang optimal karena tidak menggunakan semua cabang yang memungkinkan.



Gambar 1. Skenario cell-site diversity

b. Maximal Ratio Combining

Gambar 3 menunjukkan blok diagram dari metode ini, dimana ada M cabang yang masuk ke rangkaian dan setiap cabang memiliki gain tertentu yang ditentukan berdasarkan SNR setiap lintasan. Nilai SNR output adalah:

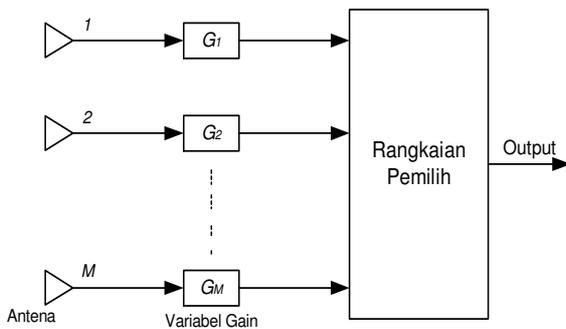
$$\gamma_d = \sum_{i=1}^M \gamma_i \quad (4)$$

c. Equal Gain Combining

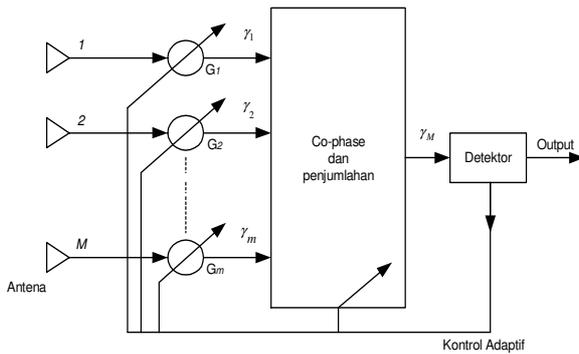
Pada EGC (Gambar 4), semua cabang diversity mendapat gain yang sama sebelum akhirnya dijumlahkan bersama-sama. Persamaan untuk mencari nilai SNR dari metode combining ini dapat diekspresikan dengan rumus sebagai berikut:

$$\gamma_d = \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^M \sqrt{\gamma_i} \right)^2 \quad (5)$$

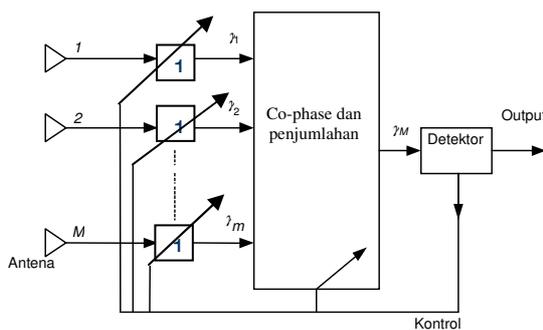
MRC memiliki kinerja BER yang lebih baik dibandingkan dengan EGC maupun selection diversity jika digunakan untuk sistem modulasi dengan level yang tetap dengan SNR rata-rata yang sama untuk setiap cabang [8]. Jika dipadukan dengan teknik modulasi adaptif dengan level modulasi yang bervariasi, SNR yang tinggi akan mendorong penggunaan level modulasi yang tinggi pula sehingga perbandingan kinerja untuk MRC, EGC, dan selection combining belum tentu sama dengan kondisi di atas. Ini dibuktikan oleh hasil simulasi pada bagian 4.



Gambar 2. Selection Combining



Gambar 3. Maximal Ratio Combining



Gambar 4. Equal Gain Combining

III. MODEL KANAL DAN SISTEM

A. Model Redaman Hujan

Perhitungan redaman hujan dengan metode ITU-R pada link teresterial sesuai dokumen ITU-R Rec. P.530 (2001). Perhitungan dilakukan untuk lintasan pada 30 GHz dengan mengambil data pengukuran curah hujan rata-rata di Surabaya [10] dimana disebutkan intensitas hujan yang terlampaui dengan probabilitas 0,01% adalah 120 mm/jam. Panjang link bervariasi dari 1 km sampai dengan 5 km.

Diasumsikan redaman hujan dalam dB yang dialami oleh lintasan radio berada dalam satu daerah yang mengalami kejadian hujan yang sama untuk beberapa lintasan (kasus multi-link). Pada sistem LMDS, jarak yang dimungkinkan tidak terlalu jauh ≤ 4 km untuk mendapatkan kondisi LOS. Selain itu, kejadian hujan dianggap stasioner terhadap waktu dan jarak, sehingga karakteristik statistik dari hujan tersebut berlaku secara homogen terhadap ruang dan waktu. Pembangkitan redaman hujan pada dua link radio dari titik terminal pelanggan yang sama tetapi berujung pada dua hub yang berbeda dilakukan berdasarkan model autoregresif multivariabel yang

diusulkan pada referensi [6]. Kedua link diasumsikan memiliki panjang yang sama dan terpisah oleh sudut 180° . Redaman total (dB) pada setiap link adalah:

$$L_{tot} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + A \quad (6)$$

dengan d menyatakan panjang lintasan (m), λ panjang gelombang (m) dan A redaman hujan (dB).

B. Penerapan Modulasi Adaptif

Penerapan modulasi adaptif J -QAM dilakukan dengan pengamatan nilai SNR $\gamma[k]$ pada menit ke- k . Jika $\gamma[k]$ melebihi threshold yang ditetapkan untuk suatu level modulasi J , maka informasi ini diumpanbalikkan oleh penerima ke pemancar agar level modulasi ditingkatkan ke level J yang lebih tinggi. Begitu pula sebaliknya, pada suatu kondisi kanal yang lebih buruk sehingga $\gamma[k]$ kurang dari threshold sebelumnya, maka level modulasi diturunkan pada level yang lebih rendah. Tabel 1 memberikan interval SNR untuk setiap level modulasi $J \in \{J_0, \dots, J_3\}$ yang telah dihitung sebelumnya untuk kanal AWGN [6]. Jika pada waktu ke- k SNR lebih kecil dari 13,6 dB (batas bawah modulasi 4-QAM untuk target BER 10^{-6}) maka transmisi dihentikan hingga pada suatu saat SNR bernilai minimal sebesar batas bawah dari 4-QAM.

SNR yang terukur merupakan SNR clear-sky (cuaca cerah) yang diperoleh dari perhitungan link budget dengan asumsi kondisi line-of-sight (LOS) dikurangi dengan redaman hujan yang diperoleh dari simulasi. Parameter-parameter serta cara perhitungan link budget pada kondisi tanpa hujan diperoleh dari referensi [4]. Dalam penelitiannya Chu menggunakan parameter LMDS yang diproduksi oleh Newbridge Canada dan mendapatkan SNR clear-sky untuk jarak 1, 2, 3, dan 4 km secara berurutan adalah 44,8 dB, 38,8 dB, 35,3 dB dan 32,8 dB. Variasi nilai SNR clear-sky tersebut disebabkan oleh efek jarak terhadap redaman lintasan yang diasumsikan mengikuti model ruang bebas (*free space*).

TABEL 1
SKENARIO MODULASI ADAPTIF

Interval SNR (dB)	< 13,6 dB	13,6-20,6	20,6-26,8	>26,8
Level Modulasi (J)	Tidak ada Transmisi (J_0)	4-QAM ($J_1=4$)	16-QAM ($J_2=16$)	64-QAM ($J_3=64$)

Perhitungan BER J -QAM dilakukan dengan pendekatan yang telah diformulasikan pada referensi [9]:

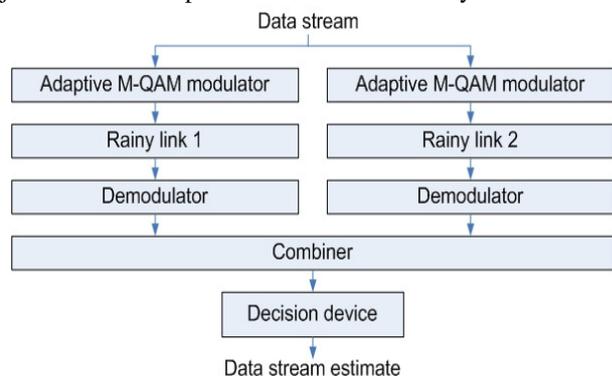
$$BER_{J-QAM} \leq 0.2 \exp \left(\frac{-1.5\gamma}{2^k - 1} \right) \quad (7)$$

di mana $k = \log_2(J)$. Metode observasi BER pada simulasi ini dilakukan secara quasi-analitik dengan menggunakan batas atas dari pertidaksamaan (7).

C. Modulasi Adaptif dan Diversitas

Pada penelitian ini dikombinasikan dua teknik: modulasi adaptif dan diversity, seperti ditunjukkan pada Gambar 5 [6]. Untuk kondisi dengan dua lintasan, nilai SNR keluaran dari sistem diversity dipakai sebagai variabel penentu level modulasi. Penetapan SNR diversitas seba-

gai penentu perubahan level modulasi bergantung pada metode combining yang digunakan dan dilakukan dengan menerapkan persamaan (3), (4), atau (5). Jika pada suatu saat nilai SNR diversity berada pada level modulasi 64, maka hub 1 dan hub 2 diberi umpan balik informasi untuk menggunakan modulasi 64-QAM, begitu seterusnya jika SNR berada pada level modulasi lainnya.



Gambar 5. Kombinasi diversity dan modulasi adaptif

IV. ANALISIS DATA

A. Fungsi Distribusi Kumulatif untuk SNR

Gambar 6 menunjukkan grafik fungsi distribusi kumulatif (*cumulative distribution function* atau CDF) dari SNR γ yang "terukur" pada penerima diversity,

$$F_{\gamma}(x) = \Pr\{\gamma < x | L_1, L_2\} \tag{8}$$

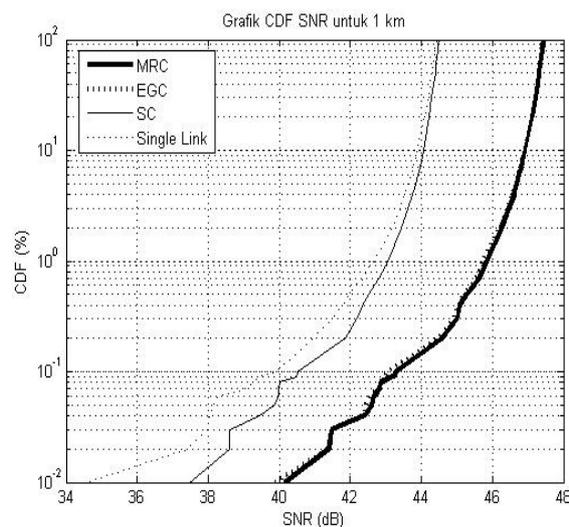
untuk panjang lintasan pertama dan kedua $L_1 = L_2 = 1$ km. Pengaruh penggunaan teknik diversity paling tampak pada perbandingan grafik SNR untuk MRC dan link tunggal, di mana terlihat selisih yang cukup menyolok. Pada grafik SNR MRC, semua nilai SNR bernilai diatas 40 dB, sedangkan pada grafik SNR single link, nilai SNR hanya berada di atas 34 dB saat CDF = 0,01%. Dengan demikian untuk tingkat probabilitas tersebut, diperoleh diversity gain hampir 6 dB.

Gambar 7 menunjukkan grafik CDF untuk SNR pada panjang lintasan 4 km. Pengaruh penggunaan teknik diversity untuk panjang lintasan yang lebih jauh, yaitu pada 4 km tetap tampak pada perbandingan grafik SNR MRC dan single link. Pada grafik SNR untuk MRC, SNR bernilai diatas 19 dB, sedangkan untuk link tunggal, nilai SNR hanya berada di atas 4 dB saat CDF = 0,01%. Dengan demikian, pada tingkat probabilitas yang sama, semakin panjang lintasan radio semakin besar *diversity gain* yang diperoleh. Hal ini secara intuitif dapat diduga dari karakteristik korelasi spasial curah hujan pada dua titik yang menurun secara eksponensial terhadap jarak antara kedua titik [11].

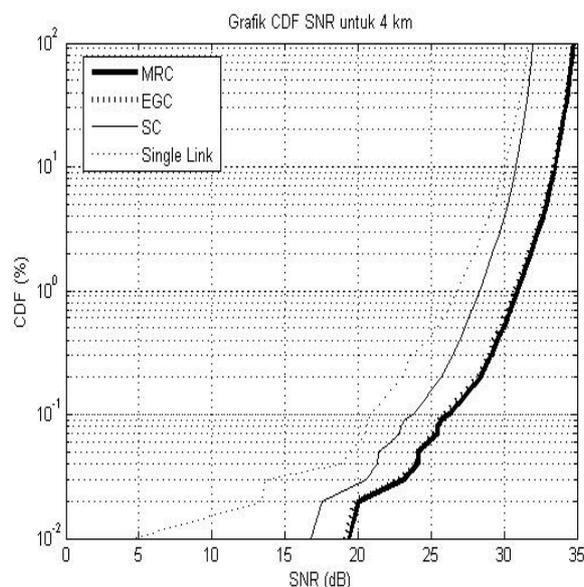
B. Diversity Gain

Gambar 8 menunjukkan grafik diversity gain atau $G(p)$ pada panjang lintasan 1 km sebagai fungsi probabilitas outage p (%). Pengaruh penggunaan teknik diversity dari tiap-tiap metode combining yang diterapkan akan tampak pada perbandingan grafik $G(p)$ untuk MRC, EGC ataupun SC. Pada grafik $G(p)$ untuk MRC, semua nilai $G(p)$ bernilai dibawah 6 dB, sedangkan pada grafik $G(p)$ untuk SC, nilai $G(p)$ hanya berada di bawah 3 dB saat $p = 10^{-2}$. Gambar 9 menunjukkan grafik diversity gain pada pan-

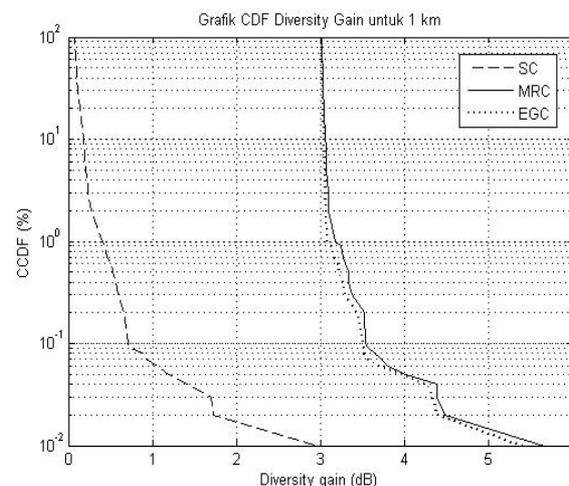
jang lintasan 4 km. Nilai $G(p)$ terkecil dan terbesar diberikan beturut-turut oleh sistem SC dan MRC untuk semua nilai p .



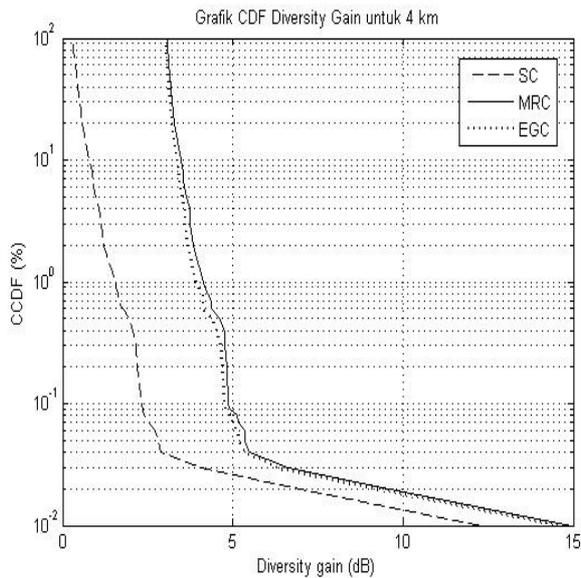
Gambar 6. Grafik CDF SNR untuk $L_1 = L_2 = 1$ km



Gambar 7. Grafik CDF SNR untuk $L_1 = L_2 = 4$ km



Gambar 8. Grafik CCDF diversity gain untuk $L = 1$ km

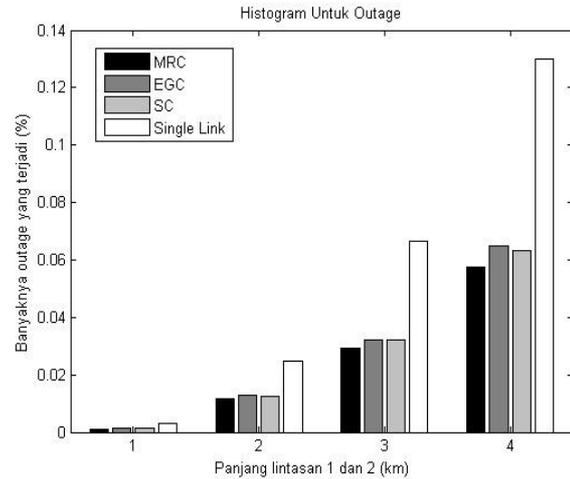
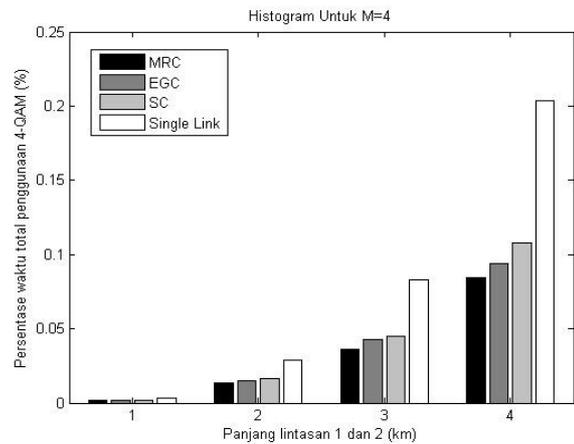
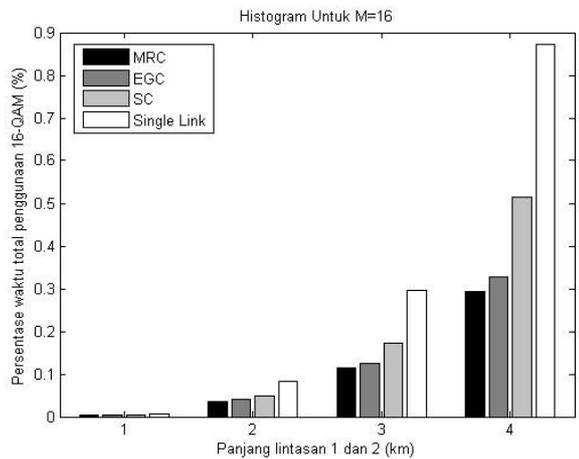
Gambar 9. Grafik CCDF diversity gain untuk $L = 4$ km

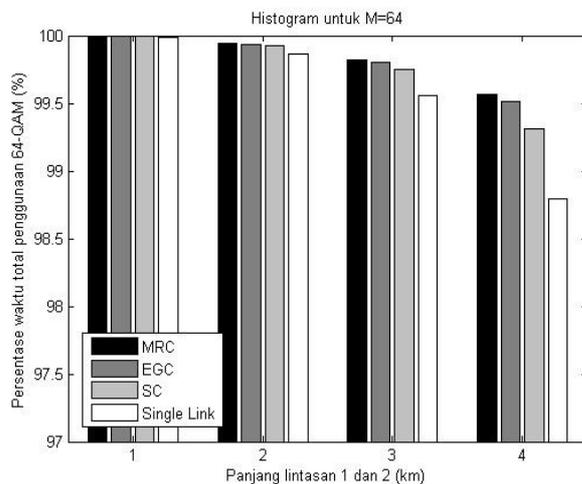
C. Level Modulasi Adaptif

Gambar 10 menunjukkan grafik probabilitas terjadinya outage pada setiap jarak lintasan (1–4 km) dari metode MRC, EGC, SC, dan single link (tanpa diversity). Pada evaluasi ini SNR clear-sky mengikuti asumsi yang telah digunakan sebelumnya, yaitu sebesar 44,8 dB dan selanjutnya menurun untuk jarak yang makin besar sesuai bentuk redaman ruang bebas. Terlihat bahwa probabilitas outage paling tinggi terjadi saat tidak diterapkan teknik diversity. Sedangkan probabilitas outage terkecil terjadi ketika digunakan metode combining MRC.

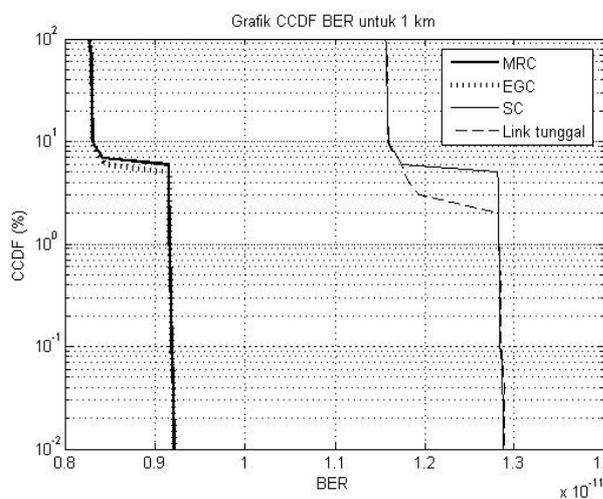
Gambar 11 dan 12 masing-masing merupakan grafik probabilitas penggunaan 4-QAM dan 16-QAM pada setiap jarak lintasan (1–4 km) dari metode MRC, EGC, SC dan single link. Kedua grafik ini menunjukkan hal yang hampir sama, yaitu peningkatan probabilitas penggunaan level modulasi rendah (4 dan 16) seiring dengan bertambahnya panjang lintasan, karena nilai SNR yang semakin kecil seiring bertambahnya panjang lintasan.

Gambar 13 menunjukkan bahwa penerapan diversity meningkatkan persentase waktu penggunaan modulasi dengan level tertinggi yaitu 64-QAM yang mengindikasikan adanya peningkatan laju transmisi kanal. Secara umum dari Gambar 11-13 dapat diamati bahwa teknik modulasi adaptif dan diversity, baik secara bersama-sama ataupun terpisah, menunjukkan pengaruh yang makin signifikan terhadap laju transmisi untuk lintasan yang lebih panjang karena efek redaman hujan yang makin besar pula. Sedangkan untuk lintasan 1-2 km tidak terdapat kontribusi peningkatan laju yang signifikan dari teknik ini.

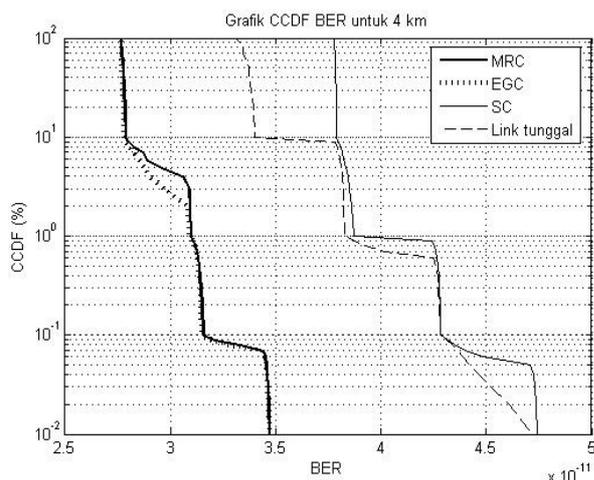
Gambar 10. Probabilitas outage untuk panjang lintasan L_1 dan L_2 antara 1 - 4 kmGambar 11. Probabilitas penggunaan 4-QAM untuk panjang lintasan L_1 dan L_2 antara 1 - 4 kmGambar 12. Probabilitas penggunaan 16-QAM untuk panjang lintasan L_1 dan L_2 antara 1 - 4 km



Gambar 13. Probabilitas penggunaan 64-QAM untuk panjang lintasan L_1 dan L_2 antara 1 - 4 km



Gambar 14. grafik CCDF BER untuk panjang lintasan L_1 dan L_2 sebesar 1 km



Gambar 15. Grafik CCDF BER untuk panjang lintasan L_1 dan L_2 sebesar 4 km

Perhitungan sederhana menunjukkan bahwa untuk lintasan 4 km diperoleh laju transmisi rata-rata sebesar 5,9668, 5,9822, 5,9846, dan 5,9896 bps/Hz masing-masing untuk konfigurasi link tunggal, SC, EGC, dan MRC, jika diasumsikan efisiensi modulasi 1 simbol per detik per hertz bandwidth. Kecilnya peningkatan laju transmisi rata-rata yang ditawarkan oleh teknik diversity menun-

jukkan kurangnya manfaat cell-site diversity pada sistem seluler LMDS jika digunakan SNR clear-sky setinggi yang digunakan dalam desain sistem LMDS Newbridge. Demikian pula besarnya dominasi modulasi 64-QAM pada semua sistem termasuk sistem link tunggal menunjukkan bahwa modulasi adaptif tidak begitu diperlukan apabila desain link menerapkan SNR clear-sky lebih dari 30 dB. Peningkatan laju transmisi ini akan menjadi lebih signifikan jika SNR clear-sky cukup rendah, misalnya dengan tujuan untuk penghematan biaya daya pancar, sehingga link menjadi lebih rentan terhadap redaman hujan.

D. Fungsi Distribusi Kumulatif Komplementer untuk BER

Fungsi distribusi kumulatif komplementer (*complementary cumulative distribution function* atau CCDF) untuk BER didefinisikan secara matematis sebagai:

$$F'_{BER}(x) = \Pr\{BER \geq x\} \tag{9}$$

Gambar 14 dan 15 berturut-turut menunjukkan grafik CCDF untuk BER pada panjang lintasan 1 dan 4 km, dengan SNR clear-sky yang sama dengan asumsi sebelumnya. Semua konfigurasi menunjukkan BER pada orde yang lebih rendah sekitar 10^{-10} , sangat memadai sebagai lapisan fisik untuk penerapan Asynchronous Transfer Mode [12] bahkan untuk lintasan sepanjang 4 km sekalipun.

Pada grafik BER MRC, semua nilai BER bernilai $9,2 \times 10^{-12}$, sedangkan pada grafik BER single link, nilai BER hanya bernilai $1,3 \times 10^{-11}$ saat CCDF = 0,01%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan teknik EGC dan MRC menurunkan BER relatif terhadap link tunggal. Namun di sini terlihat bahwa SC tidak lebih baik daripada link tunggal, sedangkan MRC juga memiliki BER yang sedikit lebih besar dibandingkan EGC. Hal ini sesuai dengan dugaan sebelumnya, yaitu bahwa dengan membaiknya nilai SNR maka modulasi cenderung menggunakan level yang lebih tinggi sehingga terdapat kemungkinan terjadinya peningkatan BER walaupun tidak besar. Ini menunjukkan adanya kompromi antara laju transmisi dengan BER pada sistem yang menerapkan modulasi adaptif dan diversity.

Dari Gambar 14 dan 15 dapat diketahui juga bahwa nilai BER semakin besar saat L semakin besar, hal ini dipengaruhi nilai redaman yang semakin besar untuk jarak L yang semakin jauh. Bentuk bertingkat pada kurva CCDF pada kedua gambar juga menunjukkan efek dari segmentasi SNR pada modulasi adaptif. Gambar 14 menunjukkan adanya dua tingkat BER pada kurva CCDF karena untuk link 1 km redaman yang terjadi cukup rendah sehingga modulasi adaptif cenderung memilih level tertinggi yaitu 16-QAM dan 64-QAM saja. Sedangkan pada link 4 km, keempat level modulasi (termasuk kondisi tanpa transmisi) memiliki kemungkinan terpilih sehingga terdapat 3-4 tingkat BER pada kurva CCDF. Fenomena ini tidak terpantau pada referensi [7] karena perhitungan BER yang kurang akurat.

V. KESIMPULAN

Dari data hasil simulasi dan hasil analisis dapat disimpulkan beberapa hal. Pertama, penggunaan teknik diversity mampu meningkatkan nilai SNR, sehingga peluang

penggunaan level modulasi yang lebih tinggi menjadi bertambah dan peluang terjadinya outage menjadi berkurang, terutama untuk konfigurasi dengan link sepanjang 4 km. Artinya, teknik diversity akan semakin bermanfaat jika ukuran sel semakin besar. Metode MRC merupakan metode combining dengan kinerja SNR yang paling baik, namun EGC yang jauh lebih sederhana memiliki SNR yang hanya sedikit di bawah MRC.

Di lain pihak, modulasi adaptif masih mampu menjaga target BER pada orde di bawah 10^{-10} untuk semua panjang lintasan yaitu 1–4 km, bahkan untuk kondisi link tunggal (tanpa diversity). Namun kombinasi teknik diversity dengan modulasi adaptif memberikan manfaat yang tidak signifikan ditinjau dari efek peningkatan yang kecil dari laju transmisi rata-rata walaupun dibarengi dengan perolehan nilai BER yang lebih kecil jika dibandingkan dengan kondisi link tunggal. Peningkatan laju transmisi dengan diversity akan menjadi lebih signifikan apabila link memiliki SNR rendah pada kondisi cuaca cerah, misalnya sebesar 30 dB atau kurang. Namun penemuan ini juga mengindikasikan adanya kemungkinan kompromi terhadap daya pancar karena dengan daya pancar lebih rendah (paling tidak, relatif terhadap desain sistem LMDS yang digunakan Newbridge) dapat dicapai penekanan interferensi co-channel yang lebih baik, dengan tetap menjaga laju transmisi yang tinggi oleh adanya cell-site diversity dan modulasi adaptif, sehingga sekaligus dapat dicapai penghematan biaya untuk daya pancar.

Dari seluruh studi dapat disimpulkan bahwa sistem transmisi yang menggunakan teknik modulasi adaptif dan diversity memiliki potensi untuk diterapkan di Indonesia untuk sistem seluler gelombang milimeter, dengan menerapkan strategi khusus. Pelanggan pada jarak yang sangat dekat dari suatu base station (<1 km) tidak memerlukan kedua teknik tersebut, sementara pelanggan pada jarak menengah (antara 1–3 km) dapat menerapkan modulasi adaptif pada saat terjadi hujan. Sedangkan untuk pelanggan pada jarak lebih dari 3 km, atau berada di sekitar perbatasan antar sel, dapat menerapkan modulasi adaptif dan diversity jika terjadi hujan.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian yang dilaporkan dalam makalah ini didanai dari Proyek PREDICT-ITS JICA, Hibah Penelitian Fundamental 2007 Depdiknas, dan Dana DIKS 2007 Riset Unggulan Jurusan Teknik Elektro ITS.

VII. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Vacca, J.R. *Wireless Broadband Network Handbook: 3G, LMDS, Wireless Internet*, Mc Graw-Hill. 2001.
- [2] Falconer, D., DeCruyenaere, J.-P., "Coverage Enhancement Methods for LMDS", *IEEE Communications Magazine*, July 2003, hal. 86-92. 2003.
- [3] Salehudin, M., Hanantasena, B., Wijedeman, L. "Ka-Band Line-of-Sight Radio Propagation Experiment in Surabaya Indonesia", *Proc 5th Ka-Band Utilization Conference*, Taormina, Italy, hal.161-165. 1999.
- [4] Chu, C.-Y., Chen, K.S. "Effects of rain fading on the efficiency of the Ka-band LMDS system in the Taiwan area", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 1, Jan. 2005, hal. 9-19. 2005.
- [5] Hendranto, G., Bultitude, R. J. C., Falconer, D. D. "Use of Cell-Site Diversity in Millimeter-Wave Fixed Cellular Systems to Combat the Effects of Rain Attenuation", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 20, No. 3, hal 602. 2002.
- [6] Hendranto, G., Indrabayu, Suryani, T., Mauludiyanto, A. "A Multivariate Autoregressive Model for Rain Attenuation on Multiple Short Links", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6. 2006.
- [7] Indrabayu, Hendranto, G., Suryani, T., Hasanuddin, Z. B. "Diversitas Makro untuk Meningkatkan Kinerja Sistem LMDS pada Kanal Hujan di Indonesia", *Proc. EECCIS*, Malang. 2006.
- [8] Rappaport, T. S. (2002), *Wireless Communications Principles and Practice*, ed. 2, Prentice Hall. 2002.
- [9] Goldsmith, A.J., Chua, S.G. "Variable-Rate Variable Power MQAM for fading Channels", *IEEE transactions of communication*, vol. 45, no. 10. 1997.
- [10] Maagt, P. J. L., Touw, S. I. E., Dijk, J., Brussaard, G., Allnutt, J. E. "Results of 12 GHz propagation experiments in Indonesia", *Electronics Letters*, vol. 29, hal. 1988-1990. 1993.
- [11] Morita, K., Hikutu, I., "Prediction Methods for Rain Attenuation Distributions of Micro- and Millimeter Waves", *Review of the Electrical Communication Laboratories*, vol. 24, no. 7-8, Jul.-Aug. 1976, hal. 651-668. 1976.
- [12] Stallings, W., *Data and Computer Communications*, ed. 6, Prentice-Hall. 2000.