

STUDI INTERFERENSI ANTARA FUTURE RAILWAY MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS (FRMCS) DAN GSM SELULER DI INDONESIA

Abdul Khamid Ridwanuddin, Khoirul Anwar, dan Ahmad Sugiana
Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

{abdulridwanuddin@student., anwarkhoirul@, sugianaa@}telkomuniversity.ac.id,

Abstrak

Tim sistem pensinyalan kereta di dunia sedang mengembangkan beberapa teknologi untuk kereta cepat, salah satunya adalah teknologi Future Railway Mobile Communication Systems (FRMCS) yang akan diterapkan di dunia pada 2022. Jurnal ini melakukan studi FRMCS untuk kereta cepat Indonesia dan peluang terkenanya interferensi oleh Global System for Mobile Communication (GSM) seluler yang telah ada karena penggunaan band frekuensi yang sama atau berdekatan.

Jurnal ini mengevaluasi kinerja FRMCS di Indonesia tanpa dan dengan interferensi dari GSM seluler. Interferensi yang muncul dianalisis dengan Bit Error Rate (BER) terhadap Signal to Noise Ratio (SNR) untuk kurva kereta. Evaluasi dilakukan pada model kanal FRMCS Indonesia yang didapatkan dari New York University Simulation (NYUSIM) dengan outage probability yang akan berfungsi sebagai kinerja BER lower bound (terbaik).

Hasil dari Jurnal ini adalah kinerja FRMCS Indonesia dengan dan tanpa interferensi oleh GSM seluler terhadap sinyal FRMCS di sepanjang rel kereta di Indonesia, berupa (i) kurva BER antara kinerja FRMCS dan kinerja Global System for Mobile Communication-Railway (GSM-R), serta (ii) kurva jarak aman antara rel kereta FRMCS dengan base station sistem komunikasi seluler. Hasil Jurnal ini menunjukkan bahwa kinerja FRMCS memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan kinerja GSM-R dalam aspek ketahanan terhadap interferensi. Hasil Jurnal ini diharapkan dapat menjadi rujukan implementasi FRMCS di Indonesia.

Kata kunci: *interference, FRMCS, GSM-R, BER, NYUSIM*

Abstract

The train signaling system team in the world is developing several technologies for fast trains, one of which is the technology of Future Railway Mobile Communication Systems (FRMCS) which will be implemented in the world in 2022. This journal conducts FRMCS studies for Indonesian fast trains and the chance of interference by Global System for Mobile Communication (GSM) cellular that already exists because of the use of the same or adjacent frequency bands.

This journal evaluates the performance of FRMCS in Indonesia without and with interference from GSM cellular. The emerging interference is analyzed by the Bit Error Rate (BER) against Signal to Noise Ratio (SNR) for the train curve. Evaluations were carried out on the Indonesian FRMCS channel model obtained from New York University Simulation (NYUSIM) with probability outage that would function as a lower bound BER performance.

The results of this Journal are the performance of FRMCS Indonesia with and without interference from GSM cellular to FRMCS signals along railroads in Indonesia, in the form of (i) BER curve of FRMCS performance and Global System for Mobile Communication-Railway GSM-R performances, and (ii) a safe distance curve between the FRMCS railroad and the cellular base station communication system. The result of this journal shows that the performance of FRMCS is better than GSM-R in the aspect of resistance to interference. The results of this Journal are expected to be a reference for the implementation of FRMCS in Indonesia.

Keywords: *interference, FRMCS, GSM-R, BER, NYUSIM*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi kereta pertama kali di dunia digunakan oleh perusahaan perkeretaapian di Inggris yaitu Great Westren Railway (GWR) pada tahun 1838 [1]. Pada awalnya kereta di dunia menggunakan bendera, telegraf, *semaphore*, dan lampu posisi untuk melakukan pensinyalan. Teknologi tersebut bertahan hingga

munculnya teknologi komunikasi baru yaitu *wireless* radio. Hadirnya teknologi tersebut membantu sistem komunikasi kereta menjadi lebih baik. Indonesia direncanakan segera membangun kereta cepat dalam waktu dekat. Sistem komunikasi yang digunakan pada kereta cepat tersebut direncanakan menggunakan *Global System for Mobile Communication-Railway* (GSM-R) pada masa yang akan datang.

Teknologi GSM-R diharapkan dapat diterapkan pada perkeretaapian di Indonesia seperti halnya di Eropa. Sistem perkeretaapian di Jerman telah mengaplikasikan GSM-R pada jalur Berlin menuju Halle/Leipzig yang menggunakan *European Train Control System* (ETCS) pertama di Eropa [2]. Gelombang radio yang digunakan GSM-R adalah pada frekuensi 876 sampai 880 MHz untuk sisi *uplink* dan 921 sampai 925 MHz pada sisi *downlink* [3]. Namun, teknologi GSM-R diperkirakan akan berhenti digunakan pada tahun 2030 berdasarkan yang telah yang dikemukakan oleh GSM-R *Industry Group* [6] dan akan digantikan dengan teknologi *Future Railway Mobile Communication System* (FRMCS).

Permasalahan yang dihadapi oleh pemerintah ialah spektrum frekuensi yang terbatas. Pengalokasian frekuensi untuk GSM-R tentunya harus berdasarkan pertimbangan akan berhenti digunakannya GSM-R dan beralih ke FRMCS. Spektrum frekuensi yang dialokasikan pada teknologi FRMCS akan menggantikan spektrum yang dimiliki oleh GSM-R sebelumnya dengan sedikit penambahan *bandwidth* [7]. Berdasarkan standar GSM-R, pengalokasian frekuensi GSM-R dekat dengan frekuensi GSM seluler. Hal tersebut berpotensi adanya interferensi dari GSM seluler. Namun, potensi tersebut belum bisa dianalisis lebih jauh karena belum ada studi tentang interferensi terhadap sistem komunikasi kereta.

Jurnal ini membahas studi tentang beberapa efek yang mungkin ditimbulkan oleh interferensi frekuensi tersebut. Dengan menggunakan kanal GSM Indonesia yang didapat dari New York University Simulation (NYUSIM) akan dilakukan simulasi dengan kondisi yang merepresentasikan karakteristik dari FRMCS dan GSM seluler sehingga diketahui nilai *Bit Error Rate* (BER) pada sistem tersebut.

2. Konsep Dasar

A. *Global System for Mobile Communication-Railway* (GSM-R)

GSM-R adalah sistem komunikasi untuk mengirimkan pertukaran suara dan data sinyal informasi antara kereta dan pusat control [8, 9]. Sistem ini terdiri dari jaringan Base Transceiver Station (BTS) yang terletak di sisi jalur dan kereta cepat yang dilengkapi dengan antena yang terhubung ke ponsel [10].

GSM-R dibangun dengan teknologi GSM yang bertujuan untuk menjadi pengganti digital yang efisien biaya untuk kabel konvensional yang tidak kompatibel. Standar ini merupakan hasil kolaborasi lebih dari sepuluh tahun antara berbagai perusahaan kereta Eropa, dengan tujuan mencapai interoperabilitas menggunakan satu platform komunikasi. GSM-R adalah bagian dari standar European Rail Traffic Management System (ERTMS) dan membawa informasi pemberian sinyal langsung ke masinis kereta, memungkinkan kecepatan kereta dan kepadatan lalu lintas yang lebih tinggi dengan tingkat keamanan yang tinggi [8].

GSM-R adalah platform yang aman untuk komunikasi suara dan data antara staf operasional kereta, termasuk pengemudi, petugas operator, anggota tim shunting, insinyur kereta, dan pengendali stasiun [11]. Ini memberikan fitur seperti panggilan grup, siaran suara, koneksi berbasis lokasi, dan pra-panggilan jika terjadi keadaan darurat. Ini akan mendukung aplikasi seperti pelacakan kargo, pengawasan video di kereta dan di stasiun, dan layanan informasi penumpang.

GSM-R biasanya diimplementasikan dengan menggunakan base station yang berdedikasi di dekat rel kereta, dengan cakupan terowongan dilakukan dengan antena directional. Jarak antar base station adalah 7-15 km [8]. Hal ini menciptakan tingkat redundansi dan ketersediaan dan keandalan yang tinggi.

B. *GSM-R Network Composition*

Jaringan GSM-R terdiri dari sistem komunikasi seluler digital GSM-R (sistem GSM-R) dan sirkuit transmisi trunk. Sistem GSM-R berisi empat bagian, yaitu network subsystem (NSS), base station subsystem (BSS), operation and support subsystem (OSS), dan perangkat terminal. Subsistem jaringan termasuk mobile switching subsystem (SSS), mobile intelligent network (IN), dan subsistem layanan paket radio secara umum [12].

C. *European Rail Traffic Management System*

European Rail Traffic Management System (ERTMS) adalah sistem pensinyalan di Eropa yang umum digunakan untuk pengaturan kereta yang dikembangkan sejak tahun 1990 [13, 14]. Hal ini sangat didukung oleh Uni Eropa yang perlahan-lahan menjadi standar global yang diperkenalkan ke seluruh dunia karena prospek yang cukup meyakinkan [13]. Oleh karena itu, ERTMS pula yang menetapkan standar pemberian sinyal khusus untuk kereta yang memperluas sistem teknologi GSM ke GSM-R [4, 15].

ERTMS memiliki dua elemen penting yang dijadikan sentral [16, 17]. Yang pertama adalah European Train Control System (ETCS), yaitu sistem kontrol pada kereta Eropa yang merupakan sistem otomatis untuk perlindungan kereta atau disebut sebagai Automatic Train Protection (ATP). Sistem terdiri dari elemen onboard dan track-side, yang menciptakan sistem yang dapat mengawasi setiap gerakan kereta. ETCS menyediakan informasi waktu yang sebenarnya untuk masinis dan pengontrol, hal ini dapat meningkatkan fleksibilitas manajemen pada kereta [18].

Elemen penting selanjutnya dari ERTMS adalah GSM-R, yang merupakan sistem jaringan komunikasi bergerak yang dioptimalkan dan didesain untuk penggunaan pada kereta. Pada sistem jaringan ini, layanan suara dan data yang dikhususkan untuk kereta disediakan [17].

D. Isu Interferensi pada GSM-R

Di Eropa, GSM-R beroperasi pada pita frekuensi yang telah ditentukan [17] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Sementara sistem GSM-R tersebut digunakan pada berbagai wilayah di dunia, maka gangguan dapat terjadi karena disebabkan oleh beberapa operator publik yang menggunakan pita frekuensi yang berdekatan dengan frekuensi GSM-R [18], seperti beberapa sistem generasi ketiga dan keempat, misalnya UMTS, WiMax and LTE [19].

Interferensi antara GSM-R dengan berbagai jaringan publik yang disebabkan oleh tabrakan antara komunikasi data dan suara serta kehilangan cakupan daya saat beberapa meter dari rel kereta [24]. Selain itu sumber interferensi juga dikarenakan adanya perangkat lain dengan frekuensi yang sama pada satu cakupan area. Masalah yang terjadi semakin bertambah karena operator seluler yang telah ada serta operator kereta ingin memiliki cakupan sinyal yang baik di sepanjang jalur kereta, sehingga dapat saling mengganggu satu sama lain, dibandingkan saling bekerja sama dalam perencanaan jaringan yang lebih baik.

E. Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)

FRMCS menyediakan komunikasi yang baik kepada pelanggan kereta, FRMCS diprediksi akan mengadaptasi teknologi transportasi 3GPP. Pada akhirnya akan menyerupai teknologi GSM-R tetapi dapat memberikan kemampuan komunikasi melebihi teknologi GSM-R. Teknologi FRMCS akan memberikan kecepatan data yang lebih tinggi, latensi data yang lebih rendah, komunikasi multimedia, dan keandalan komunikasi yang ditingkatkan [20].

Kelebihan FRMCS yang diekspektasikan oleh European Rail Infrastructure Managers (EIM) [6] diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Biaya yang dikeluarkan akan menjadi lebih efektif.
2. Menjadi bukti dan solusi jangka Panjang untuk evolusi teknologi kereta.
3. Menawarkan fleksibilitas dalam penggunaan dan pemodelan jaringan.
4. Memastikan ketersediaan jaringan yang tinggi, setidaknya setara dengan teknologi GSM-R.
5. Menawarkan ketahanan yang tinggi terhadap gangguan saat keadaan diam maupun bergerak.

F. Spektrum Frekuensi untuk FRMCS

Berdasarkan yang telah dilaporkan pada [7] spektrum frekuensi yang mungkin dapat diterapkan pada teknologi FRMCS adalah yang sebelumnya dialokasikan untuk GSM-R akan digantikan dengan frekuensi untuk teknologi FRMCS dengan penambahan spektrum yang telah disiapkan untuk FRMCS. Spektrum frekuensi untuk uplink dimulai dari 873 MHz sampai dengan 880 MHz, dan untuk frekuensi downlink dari 918 MHz sampai 925 MHz.

G. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM yaitu teknik *multiplexing* yang sederhana dan cocok untuk transmisi berkecepatan tinggi melalui kanal multipath fading. Teknik OFDM bagus karena dapat mengkonversi kanal *frequency-selective fading* menjadi seolah-olah kanal *frequency-flat fading* karena penggunaan *cyclic-prefix* [21].

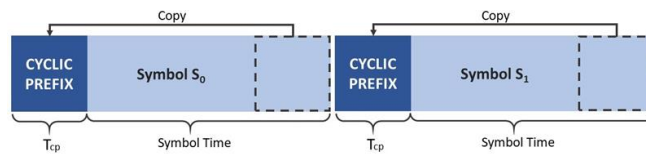
Perbedaan konsep FDM dengan OFDM terlihat dari domain frekuensi. Pada sistem FDM terdapat *guard-band* antar frekuensi *subcarrier*, sedangkan pada OFDM tidak terdapat *guard-band*, melainkan *subcarrier* saling berhimpit dengan *subcarrier* lainnya, sehingga sebuah puncak *subcarrier* bertepatan dengan posisi null *subcarrier* yang lainnya [32]. Hal ini disebut sebagai *orthogonal subcarrier*. Sehingga, saat penerima melakukan demodulasi, aliran data antar dua *subcarrier* tidak akan saling mengganggu.

H. Cyclic Prefix

Cyclic prefix (CP) digunakan dalam OFDM untuk mengatasi *inter-symbol interference* (ISI) akibat efek *multipath fading*. Gambar 2.7 menunjukkan konsep dari *cyclic prefix*, yaitu menyalin bagian akhir dari simbol OFDM sebagai awalan simbol.

Cyclic prefix memiliki dua tujuan yaitu, menyediakan guard interval untuk menghilangkan ISI dari simbol sebelumnya dan menyalin simbol terakhir sedemikian rupa sehingga konvolusi linier dari *frequency-selective*

channel dapat dihitung sebagai konvolusi melingkar untuk menyederhanakan estimasi dan penyamaan saluran. Untuk menjamin performansi yang bebas ISI, panjang *cyclic prefix* sama atau lebih besar dari PDP.



Gambar 2.1. *Cyclic Prefix*

I. *Repetition Codes*

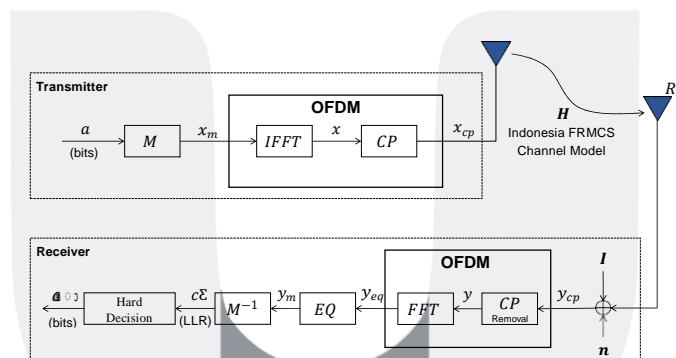
Channel coding digunakan untuk melindungi bit informasi dari gangguan kanal *fading* dan efek distorsi dari *noise*. Suatu *channel coding* melindungi bit informasi dengan bit-bit tambahan yang disebut sebagai bit *parity*. Bit *parity* bertugas untuk melindungi bit-bit informasi dari *noise*. Gabungan antara bit-bit informasi dan bit-bit *parity* disebut *codeword*.

Repetition codes adalah salah satu jenis *channel coding* yang sederhana. Berdasarkan [23], *Repetition codes* memiliki persamaan sebagai perbandingan jumlah bit informasi dengan bit *parity* atau disebut dengan *rate* dapat didefinisikan sebagai $R = \frac{a}{n}$, dengan a adalah bit informasi yang dikirim dan n adalah bit informasi ditambahkan dengan bit *parity* yang digunakan.

Repetition codes mengulang bit informasi yang dikirim menjadi n kali sesuai dengan *rate* yang digunakan. Misalnya suatu sistem mengirimkan bit informasi [1 0], dimana *repetition codes encoder* menggunakan *rate* $\frac{1}{3}$, maka *codeword* yang dihasilkan adalah [1 1 1 0 0 0].

3. Model Sistem dan Skenario Validasi Kinerja FRMCS terhadap Interferensi

A. *Model System*



Gambar 3.1. Model sistem FRMCS

Jurnal ini memanfaatkan teknik OFDM dengan CP (CP-OFDM) pada sistem FRMCS yang dirancang sehingga *outage performances* dari *representative* PDP untuk teknologi FRMCS dengan OFDM *Numerology 0* akan divalidasi menggunakan konsep CP-OFDM 5G NR. Parameter validasi yang diujikan adalah BER dan FER berdasarkan penerapan modulasi C-BPSK. Gambar 3.1 menunjukkan struktur CP-OFDM untuk memvalidasi hasil *outage performances* pada OFDM *Numerology 0* pada kanal FRMCS Indonesia.

Bit informasi a dibangkitkan pada sisi *transmitter* secara acak. Setelah dibangkitkan, bit akan dipetakan dan dimodulasi pada *modulator* M untuk menghasilkan simbol x_m yang berisi bit-bit. Simbol keluaran dari *modulator* kemudian ditransformasikan menggunakan IFFT dengan panjang blok sebesar 64. Blok CP berfungsi untuk menambahkan sejumlah bagian akhir simbol keluaran IFFT ke depan simbolnya sehingga membentuk simbol baru x_{cp} dengan memperhatikan ketentuan jumlah CP yang dapat ditambahkan untuk *Numerology 0*. Simbol-simbol tersebut kemudian ditransmisikan melalui kanal FRMCS Indonesia.

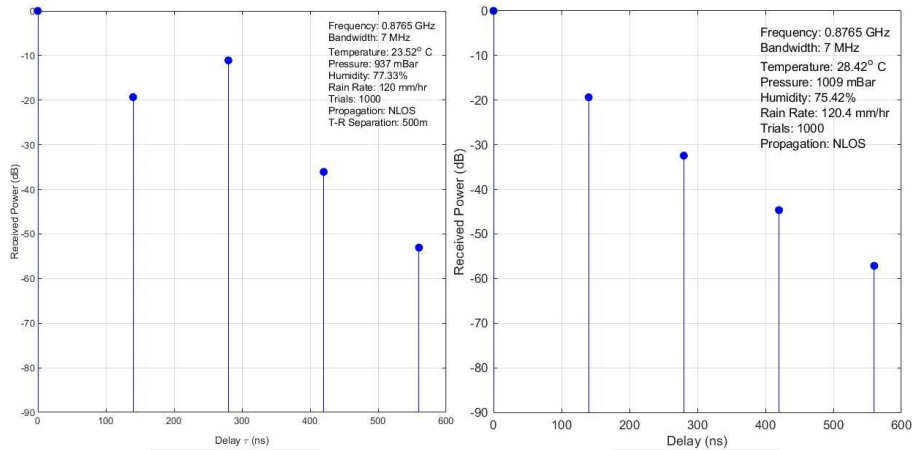
Simbol yang diterima pada sisi *receiver* akan terkena *noise* n dan terkena *power interference* I sebelum simbol y_{cp} masuk ke blok *CP Removal*. CP dalam simbol y_{cp} akan dihapuskan dalam blok *CP Removal* dan menjadi simbol baru y . Setelah itu, simbol y akan ditransformasikan kembali menggunakan FFT untuk menghasilkan simbol y_{eq} sebelum masuk ke blok *equalizer* EQ. Proses *equalization* terjadi di blok EQ dengan menggunakan *minimum mean square error* (MMSE) *equalizer* yang menghasilkan simbol keluaran *equalizer* y_m . MMSE merupakan linear *equalizer* yang diimplementasikan dalam linear transversal filter, di mana nilai-nilai koefisien dari jajaran filter yang merupakan respons *equalizer* harus sama dengan respons kanalnya, tetapi nilainya

berlawanan (*invers*) dari nilai matriks kanal. Simbol y_m kemudian didemodulasi menggunakan *demodulator* M^{-1} untuk memperoleh nilai *log likelihood ratio* (LLR) \hat{c} dari setiap simbol. Langkah terakhir adalah proses *Hard Decision* untuk mengembalikan nilai \hat{c} ke dalam bentuk bit-bit informasi \hat{a} dan menentukan apakah bit-bit yang diterima tersebut adalah bit 0 atau 1 yang diharapkan sesuai dengan bit informasi yang ditransmisikan.

4. Pengujian Kinerja Teknologi FrmcS Terhadap Interferensi Dan Analisisnya

A. Representative Power Delay Profile

Representative PDP yang mewakili kanal FRMCS Indonesia diasumsikan menggunakan OFDM Numerology 0 dengan parameter frekuensi sebesar 0,8765 GHz dan bandwidth sebesar 7 MHz ditampilkan pada Gambar 4.1.

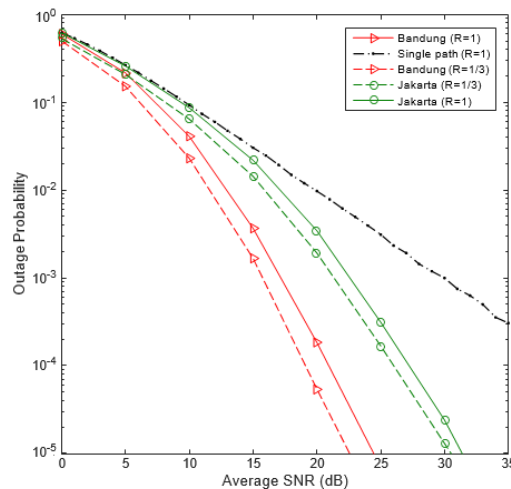


Gambar 4.1. Representative PDP untuk parameter lingkungan (a). kota Bandung dan (b). kota Jakarta.

B. Outage Performance pada Model Kanal FRMCS Indonesia

Jurnal ini menganalisis terhadap *outage performances* dari kanal FRMCS Indonesia yang diasumsikan menggunakan OFDM Numerology 0 dengan mengamati CDF dari kapasitas kanal C yang dihitung dengan *coding rate* $R = 1$ dan $R = 1/3$ dengan menggunakan modulasi C-BPSK yang mempunyai indeks modulasi $M = 1$, serta dari rentang SNR 0 dB sampai SNR 35 dB.

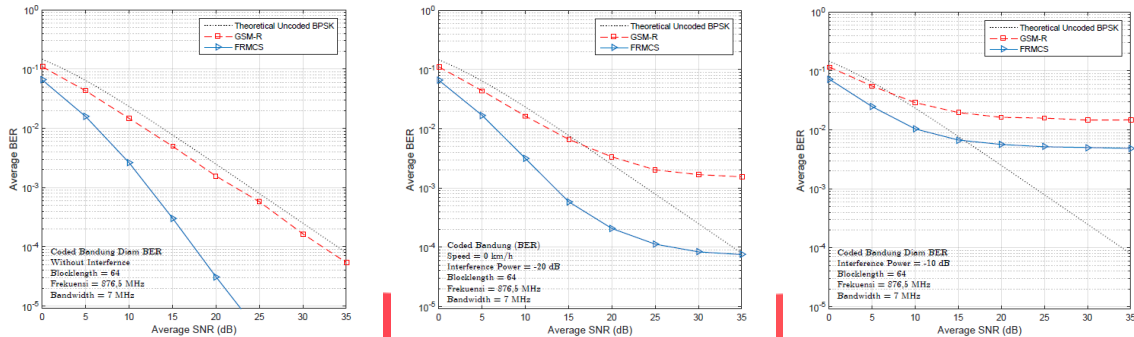
Outage performances dari kanal FRMCS Indonesia adalah hasil yang diperoleh dengan mengambil nilai pada R tertentu untuk setiap nilai SNR. Gambar 4.2 menampilkan hasil *outage performances* terhadap nilai SNR dari model kanal FRMCS Indonesia untuk asumsi sistem menggunakan OFDM Numerology 0. Kurva *outage probability* dari kanal FRMCS Indonesia juga memiliki performansi yang lebih baik dari kanal *single path* akibat adanya efek *diversity* dari kanal *multipath fading*.



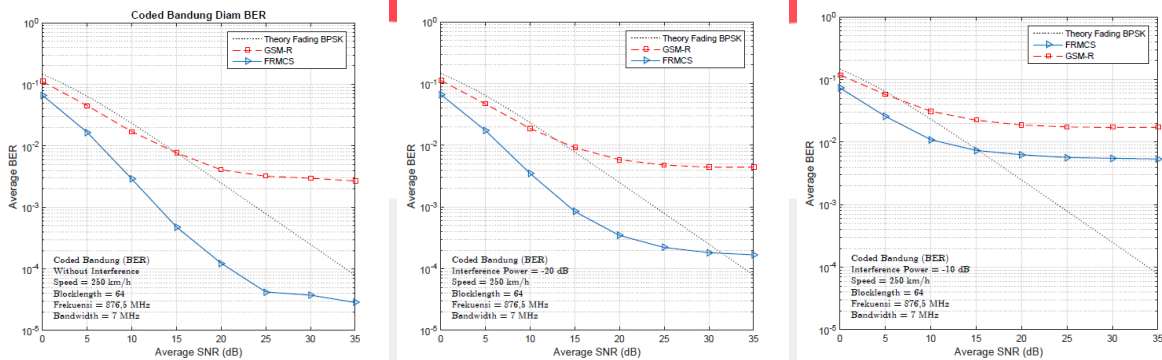
Gambar.4.2. Outage Performances pada kanal FRMCS Indonesia.

C. Pengujian Performansi BER dengan menggunakan channel coding (repetition codes)

Kinerja BER pada system FRMCS dibandingkan dengan GSM-R dengan menggunakan channel coding (repetition codes) dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar.4.4. Gambar 4.3 menunjukkan performansi FRMCS dibandingkan dengan GSM-R dalam aspek ketahanan interferensi pada kecepatan $v = 0$ km/h. Gambar 4.4 menunjukkan performansi FRMCS dibandingkan dengan GSM-R dalam aspek ketahanan interferensi pada kecepatan $v = 250$ km/h.



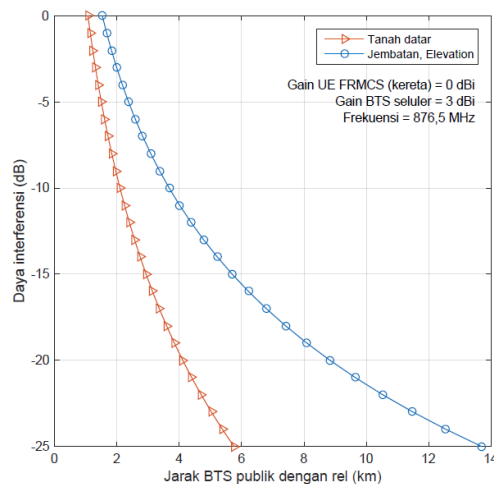
Gambar 4.3. Kinerja BER sistem FRMCS dan GSM dengan kecepatan $v = 0$ km/h dengan menggunakan channel coding (repetition codes) dengan (a). tanpa interferensi, (b). daya interferensi -20 dB, (c). daya interferensi -10 dB.



Gambar 4.4. Kinerja BER sistem FRMCS dan GSM dengan kecepatan $v = 250$ km/h dengan menggunakan channel coding (repetition codes) dengan (a). tanpa interferensi, (b). daya interferensi -20 dB, (c). daya interferensi -10 dB.

C. Penentuan Jarak Aman Interferensi

Gambar 4.5 menjelaskan bahwa saat daya interferensi paling besar $I = 0$ dB mengganggu sistem saat jarak 1,5286 km dari rel saat rel berada di atas jembatan, sedangkan untuk rel yang berada di atas tanah datar terasa pada jarak 1,068 km. Saat diberi daya interferensi $I = -20$ dB, jarak aman BTS publik dengan rel kereta cepat adalah pada jarak 8,829 km saat rel kereta cepat berada di atas jembatan, sedangkan untuk rel yang berada di atas tanah datar yaitu pada jarak 4,1065 km.



Gambar 4.5. Jarak aman interferensi antara rel kereta cepat dan BTS system komunikasi seluler.

5. Kesimpulan

Jurnal ini telah mengevaluasi kinerja FRMCS di Indonesia tanpa dan dengan interferensi dari GSM seluler. Hal tersebut disebabkan karena penggunaan band frekuensi yang sama atau berdekatan dengan sistem komunikasi seluler. Jurnal ini menggunakan pemodelan kanal FRMCS Indonesia pada area kota Bandung dan kota Jakarta. Pemodelan kanal tersebut didapatkan dengan menggunakan software NYUSIM Channel Simulator. NYUSIM Channel Simulator menghasilkan instantaneous PDP yang kemudian diproses untuk mendapatkan representative PDP model kanal FRMCS Indonesia. Parameter yang digunakan adalah parameter lingkungan kota Jakarta dan kota Bandung, antara lain suhu, tekanan udara, kelembapan, curah hujan, dan dedaunan yang dianggap mewakili kondisi alam di jalur kereta cepat Jakarta-Bandung.

Hasil simulasi dalam Jurnal ini menunjukkan bahwa performansi pada area kota Bandung lebih baik dibandingkan dengan kota Jakarta karena memiliki outage performances yang lebih baik. Hal tersebut dikarenakan nilai komponen power delay profile (PDP) kota Bandung lebih tinggi daripada kota Jakarta. Hasil simulasi dalam Jurnal ini menunjukkan bahwa sistem menggunakan channel coding (repetition codes), performansi FRMCS lebih bagus dibandingkan dengan GSM-R. Jurnal ini menunjukkan bahwa kinerja FRMCS lebih handal terhadap interferensi dibandingkan dengan GSM-R. Ketika kereta diam dan kereta cepat diberi interferensi, perbedaan terlihat saat diberi daya interferensi yang rendah, semakin besar interferensi semakin kecil perbedaan SNR yang diterima antara kereta diam dan kereta cepat. Hal ini membuktikan bahwa efek interferensi memiliki efek lebih besar dibandingkan dengan efek kecepatan.

Daftar Pustaka:

- [1] M. H. M. S. d. A. K. R. Khoiril Anwar, Ikhfan Ammar Rangkuti, "Studi sistem komunikasi nirkabel untuk pensinyalan kereta cepat indonesia," Trans- misi p-ISSN 1411-0814 e-ISSN 2407-6422, April 2019.
- [2] R. W. Wardana, "Studi tentang teknologi GSM untuk sistem telekomunikasi perkeretaapian di indonesia," Tech. Rep., 2010.
- [3] A. Adrianco, "Analisis perancangan jaringan GSM-R (global system for mobile communication-railway) untuk komunikasi train dispatching di koridor jakarta-bandung," Tech. Rep., 2011.
- [4] K. Chetty, Q. Chen and K. Woodbridge, "Train monitoring using GSM-R based passive radar," in Radar Conference (RadarConf), 2016.
- [5] J. T. Penttinen, "3GPP mobile communications: GSM," in The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems, 2015.
- [6] EIM, "Future railway mobile communication system, EIM expectations and key challenges," European Rail Infrastructure Managers, Tech. Rep., December 2016.
- [7] ETSI, "System reference document (srdoc); GSM-R networks evolution," TR 103 333 V1.1.1, Tech. Rep., 2017.
- [8] R. He, B. Ai, G. Wang and K. Guan, "High-speed railway communications: From GSM-R to LTE-R," IEEE Vehicular Technology Magazine, August 2016.
- [9] H. Hofstadt, "GSM-R: Global system for mobile radio communications for railway," in Siemens Transportation Systems Group, Germany, March 1995.
- [10] S. Dudoyer, V. Deniau, S. Ambellouis, M. Heddebaut and A. Mariscotti, "Research of observables adapted to the analysis of EM noise impacting the quality of GSM-railway transmissions," in International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Rome, 2012.
- [11] S. Amundsen, "Future rail communication - implementation scenarios for lte," 2013.
- [12] A. Sniady and J. Soler, "An overview of GSM-R technology and its shortcomings," in 12th International Conference on ITS Telecommunications, 2012.
- [13] A. N. Kira Kastell, Steffen Bug and R. Jakoby, "Improvements in railway communication via GSM-R," in Vehicular Technology Conference, 2006.
- [14] K. Kastell, S. Bug, A. Nazarov and R. Jakoby, "Improvements in railway communication via GSM-R," in Vehicular Technology Conference, 2006.
- [15] I. Bibac, "GSM-Railway as part of european rail traffic management system," Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies III, vol. 6635 663515-1, 2007.
- [16] S. K. Abed, "European rail traffic management system - an overview," in 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ), 2010.
- [17] P. Winter and et al., "Compendium on ERTMS," in Eurail Press, 2009.
- [18] Radio Spectrum Committee, "Working document: Spectrum requirements for railway applications," in European Commission, 2010.
- [19] G. Lindstrom, "Is GSM-R the Limiting Factor for the ERTMS System Capacity? Degree Project In Traffic And Transport Planning, 2012.

- [20] K. Solanki and K. Chouhan, "Implementation of high speed railway mobile communication system," International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 2017.
- [21] 3GPP, "Study on future railway mobile communication system; stage 1 (release 16)," TR 22.889 V16.3.0, Tech. Rep., 2018.
- [22] E. Christy, K. Anwar, and R. P. Astuti, 5G Telkom University Channel Model Under Foliage Effects, Bandung, August 2018.
- [23] M. Alfaroby, K. Anwar, and N. Mufti, 5G channel model indonesia menggunakan teknik statistical spatial channel model (SSCM), Bandung, January 2018.
- [24] J. Vihril, A. A. Zaidi, V. Venkatasubramanian, E. T. N. He, J. Medbo, E. Lhetkangas, K. Werner, K. Pajukoski, A. Cedergren, and R. Baldemair, "Numerology and frame structure for 5G radio access," 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), p. 15, September 2016.
- [25] T. K. Moon, Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms. New Jersey, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2002.

