

# 5G CHANNEL MODEL INDONESIA MENGGUNAKAN TEKNIK *STATISTICAL SPATIAL CHANNEL MODEL* (SSCM)

## INDONESIA 5G CHANNEL MODEL BASED ON *STATISTICAL SPATIAL CHANNEL MODEL* (SSCM)

M. Alfaroby E.<sup>a</sup>, Dr. Eng. Khoirul Anwar S.T., M.Eng.<sup>1</sup>, Dr. Nachwan Mufti Ardiansyah S.T., M.T.<sup>1</sup>

<sup>a</sup>Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom,  
Jalan. Telekomunikasi No.1 Terusan Buah Batu, Bandung, 40257 INDONESIA  
Email: {alfaroby@student., anwarkhoirul@, nachwanma@}telkomuniversity.ac.id

---

### Abstrak

Teknologi telekomunikasi generasi kelima (5G) bisa diterapkan secara optimal di Indonesia pada 2020 jika parameternya didesain sesuai dengan kanal 5G Indonesia. Tugas Akhir ini memodelkan kanal 5G Indonesia dengan menggunakan teknik *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM). Model SSCM usulan New York University Wireless (NYU Wireless) dipilih sebagai referensi utama dalam Tugas Akhir ini karena keakuratan hasilnya serta kemudahannya dalam penyesuaian dengan parameter lapangan.

Tugas Akhir ini melakukan kajian atas berbagai parameter kanal secara mendalam untuk menghasilkan model kanal 5G Indonesia berdasarkan parameter lingkungan nyata Indonesia. Studi ini menjadi sangat penting karena parameter alam Indonesia berbeda dengan parameter alam di luar negeri, sehingga alam Indonesia diperkirakan akan berpengaruh besar dalam model kanal 5G. Hal ini dikarenakan frekuensi operasi 5G berada pada rentang 1 – 100 GHz yang merupakan frekuensi tinggi yang sensitif terhadap pengaruh alam. Faktor yang mempengaruhi redaman pada frekuensi tinggi antara lain suhu, kelembapan, tekanan udara, curah hujan, dan kerapatan vegetasi Indonesia. Tugas Akhir ini menghasilkan sebuah model kanal 5G Indonesia yang diharapkan menjadi salah satu referensi untuk kinerja 5G di Indonesia dengan menggunakan parameter kota Bandung yang dianggap representatif untuk mewakili alam Indonesia.

Dalam Tugas Akhir ini, model kanal 5G Indonesia diwakili oleh karakteristik *Power Delay Profile* (PDP) alam Indonesia yang diperoleh dengan menggunakan simulasi komputer berbasis SSCM. Tugas Akhir ini kemudian menggunakan PDP yang didapat untuk menghitung kapasitas Shannon untuk memperoleh teori kinerja 5G Indonesia. Kapasitas kanal dan *outage probability*, masing-masing, dihitung menggunakan konsep *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dengan blok yang cukup panjang (sehingga efek *loss* dari *cyclic prefix* dapat diabaikan). *Cumulative Distribution Function* (CDF) dari kapasitas kanal dihitung dengan sampel yang cukup banyak untuk dievaluasi peluang kapasitas 5G tersebut jatuh di bawah *channel coding rate* yang kemudian disebut sebagai *outage probability*. Hasil Tugas Akhir ini diharapkan mampu menjadi sumbangan prediksi 5G Indonesia sehingga Indonesia dapat mempersiapkan sejak dini penggelaran teknologi 5G dan optimalisasinya pada 2020.

*Keywords:* 5G, model kanal, *power delay profile*, *outage probability*.

---

*Email addresses:* alfaroby@student.telkomuniversity.ac.id (M. Alfaroby E.),  
anwarkhoirul@telkomuniversity.ac.id (Dr. Eng. Khoirul Anwar S.T., M.Eng.), nachwanma@telkomuniversity.ac.id  
(Dr. Nachwan Mufti Ardiansyah S.T., M.T.)

## Abstract

To optimally implement the fifth generation mobile communication (5G) in Indonesia in 2020, the parameters of 5G should be designed match with the Indonesia 5G channel. This undergraduate thesis studies the 5G channel model of Indonesia using statistical spatial channel model (SSCM) technique. SSCM technique developed by New York University Wireless (NYU Wireless) is considered as the main reference in this thesis due to its accuracy and flexibility in environmental parameters setup.

This thesis studies and develops Indonesia 5G channel model based on real environmental parameters of Indonesia. This study is important because Indonesia has unique environmental parameters being different from other countries causing different channel model. Furthermore, 5G operating frequency is in between 1 – 100 GHz, which is a high frequency being sensitive to the nature. These environmental parameters are, for example, temperature, humidity, and air pressure. Bandung is used as the main parameters to represent parameters of environment of Indonesia.

5G channel model in this thesis is represented by the power delay profile (PDP) measured from thousands instantaneous PDP under Indonesia environmental parameters using computer simulation based on SSCM. From the obtained PDP, this thesis calculates the Shannon capacity for 5G Indonesia. The performance of 5G in Indonesia is predicted based on the analyzed channel capacity and outage probability, and is validated using orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). Outage probability is obtained from the cumulative distribution function (CDF) of Shannon capacity expressing the probability when capacity drops below the code rate, causing detection failure. This thesis is expected to provide contributions to the implementation of 5G in Indonesia such that Indonesia can optimize and prepare optimal 5G technology in Indonesia by 2020.

Keywords: 5G, channel model, power delay profile, outage probability.

## 1. Pendahuluan

Teknologi seluler berkembang pesat terutama generasi kelima (5G) yang akan diluncurkan pada 2020. Teknologi 5G diprediksikan menggunakan frekuensi di antara 1 GHz - 100 GHz [1, 2, 3]. Frekuensi yang sangat tinggi ini menghadirkan tantangan baru, yaitu masalah redaman propagasi gelombang yang sangat dipengaruhi oleh kondisi alam [4].

Teknologi 5G akan menggunakan frekuensi di antara 1 GHz sampai 100 GHz, sebuah rentang frekuensi yang lebih tinggi dari generasi sebelumnya. Rentang frekuensi ini menghadirkan tantangan baru terhadap pengaruh parameter iklim seperti suhu, kelembapan dan tekanan udara terhadap propagasi gelombang. Salah satu kandidat frekuensi terkuat yang akan digunakan 5G adalah frekuensi 28 GHz yang sekaligus menjadi frekuensi kerja yang dipakai dalam Tugas Akhir ini.

Kanal adalah media di antara antenna pengirim dan antenna penerima yang perlu dimodelkan sehingga menghasilkan desain sistem komunikasi yang meminimalkan *error* serta memaksimalkan transmisi informasi atau *bitrate*.

Model kanal (untuk *small-scale fading* biasanya dinyatakan dalam *power delay profile* (PDP) [5], yaitu sebuah gambar yang tingginya menunjukkan *power* untuk *delay* yang berbeda. Model kanal, selain untuk desain dan pengujian, bisa juga dipakai untuk pembuktian suatu teknologi komunikasi, terutama teknologi *wireless*. Hal ini karena kapasitas dan performansi sistem tergantung pada kanal. Jika model kanal untuk suatu negara atau daerah diketahui, parameter pada alat bisa diatur sedemikian rupa sehingga menghasilkan kinerja maksimal untuk negara tersebut [6]. Oleh karena itu, pemodelan kanal sangat membantu perancangan sistem komunikasi implementasinya secara optimal.

*Statistical spatial channel model* SSCM menggunakan data dari banyak percobaan yang parameter kanal dan probabilitasnya dimodelkan secara statistik. Parameter statistik ini dapat digunakan untuk menggambarkan keadaan kanal sebenarnya, misalnya hasil di [7, 4]. Model kanal ini didapatkan dari percobaan yang dari tahun 2011 hingga tahun 2015. SSCM dibuat dari pola yang dihasilkan dari berbagai pengukuran dengan skenario yang diinginkan, seperti radius sel, frekuensi yang digunakan, parameter lingkungan dan lainnya [4, 8].

Tugas Akhir ini menggunakan teknik SSCM untuk memodelkan kanal 5G Indonesia. Model kanal yang diusulkan berupa sebuah PDP yang dianggap mewakili Indonesia dengan mengambil kota Bandung sebagai kota yang dianggap mewakili. Tentu saja akurasi dapat diperbaiki dengan sampel banyak kota lain di Indonesia, tetapi kami berpikir bahwa kanal 5G di kota Bandung dapat lebih mewakili Indonesia daripada sebuah model kanal 5G di kota New York.

Kapasitas kanal sistem komunikasi dapat dihitung berdasarkan PDP menggunakan Shannon *capacity* yang mengasumsikan bahwa semua keadaan ideal, seperti panjang blok tak terhingga dan *coding* yang dilakukan secara *random*. Oleh karena itu, hasil perhitungan ini dapat dianggap sebagai kinerja teori 5G di Indonesia. Seluruh peluang kanal dievaluasi dalam Tugas Akhir ini dengan angka sebesar 200,000 kanal yang dianggap cukup mewakili seluruh kanal terjadi di Indonesia. Setelah itu kanal dianalisis dari segi *cumulative distribution function* (CDF) untuk mendapatkan *outage probability* dan kemudian dibandingkan dengan hasil praktis seperti *frame-error-rate* (FER) yang diperoleh dari teknologi praktis seperti *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM). Hasil Tugas Akhir ini diharapkan menjadi bahan referensi untuk mengoptimalkan performansi sistem 5G di Indonesia.

## 2. Dasar Teori

Bab ini membahas dasar teori untuk mendukung bab selanjutnya yang meliputi kapasitas kanal untuk *narrowband* dan *broadband*, dasar matriks dan operasinya, dan *outage performance* dari sebuah kanal yang diturunkan dari teorema kapasitas Shannon.

### 2.1. Kanal Narrowband

Kanal *narrowband* biasanya digunakan untuk sistem berkecepatan rendah. Salah satu karakteristik kanal *narrowband* adalah tidak adanya efek *multipath* karena *bandwidth* yang sempit. Kapasitas kanal *narrowband* dihitung dengan

$$C = B \cdot \log_2(1 + |h|^2 \cdot \gamma) \quad (1)$$

berdasarkan teori Shannon pada *information theory*[9]. Variabel  $h$  pada (1) menunjukkan bahwa hanya terdapat satu *path* yang terjadi dalam transmisi dengan  $B$  adalah *bandwidth*,  $h$  adalah kanal dan  $\gamma$  adalah *signal to noise power ratio* (SNR).

Perhitungan kapasitas terhadap *energy per bit to noise power spectral density ratio* ( $E_b/N_0$ ) dinyatakan dengan

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + |h|^2 \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot M \cdot R \right), \quad (2)$$

dengan  $M$  adalah indeks modulasi dan  $R$  adalah *channel coding rate* yang didalam Tugas Akhir ini  $R = \{1/2, 1\}$ .

### 2.2. Kanal Broadband

Sistem *broadband*, seperti 3G, 4G, dan 5G, memiliki kanal yang sangat lebar sehingga kapasitasnya lebih besar daripada kanal *narrowband* yang dihitung dengan

$$C = \frac{1}{N} \cdot B \cdot \sum_{n=1}^N \log_2(1 + |\psi_n|^2 \cdot \gamma) \quad (3)$$

kanal *broadband* memiliki lebih dari satu *path* yang diindikasikan dengan  $\psi_n$  untuk  $n = \{1, 2, 3, \dots, N\}$  dengan  $N$  adalah panjang blok transmisi yang dalam Tugas Akhir ini diambil  $N = 64$ . Nilai untuk setiap kanal paralel ekuivalen dinyatakan dengan

$$\psi = \text{diag} [\mathbf{F}\mathbf{H}_c\mathbf{F}^H] \quad (4)$$

dengan  $\mathbf{H}_c$  adalah matriks *circulant* hasil dari penambahan *cyclic prefix* (CP).  $\mathbf{F}$  adalah matriks *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan  $\mathbf{F}^H$  adalah matriks *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT).

Hubungan SNR dan  $E_b/N_0$  ditulis dengan

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \cdot m \cdot R \quad (5)$$

dengan  $m$  adalah indeks modulasi yang memuat jumlah bit per simbol, misalnya  $m = 1$  pada *binary phase shift keying* (BPSK) dan  $m = 2$  pada *4-quadrature amplitude modulation* (QAM).

Perhitungan kapasitas BPSK dengan  $m = 1$  adalah [10]

$$C \approx \frac{B}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2 \left( 1 + 2 |\psi_n|^2 \cdot m \cdot R \cdot \frac{N}{(N+Q)} \cdot \frac{E_b}{N_0} \right), \quad (6)$$

dengan  $Q$  adalah panjang CP.

### 2.3. Matriks Toeplitz dan dan matriks Circulant

Sinyal yang diterima di *receiver* dinyatakan dengan

$$y = H * x + n \quad (7)$$

dengan  $n$  adalah vektor *noise*,  $x$  adalah data yang dikirim dan  $\mathbf{H}$  adalah kanal yang berupa matriks Toeplitz dengan elemen kolom matriks berisi PDP kanal. Operasi perkalian kanal  $\mathbf{H}$  dengan data  $x$  mengikuti operasi konvolusi. Jika PDP  $\mathbf{h} = [h_0 \ h_1]$ , dan data  $\mathbf{x}$  yang ditambahkan CP menjadi  $\mathbf{x}_{cp} = [d \ e \ a \ b \ c \ d \ e]$ , maka

$$y = H * x + n \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ e \\ a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \\ n_8 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Pada penerima CP akan dihapus dan hanya blok yang diperlukan saja yang diambil yaitu

$$y = \begin{bmatrix} h_1 e + h_0 a \\ h_1 a + h_0 b \\ h_1 b + h_0 c \\ h_1 c + h_0 d \\ h_1 d + h_0 e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Untuk analisis matematis  $y$  juga dapat dihasilkan langsung dari perkalian matriks Circulant  $\mathbf{H}_c$  dengan  $x$  tanpa CP, yaitu

$$y = H * x + n \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & h_1 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Jadi matriks *circulant* adalah matriks yang ekuivalen dengan matriks hasil dari transmisi menggunakan CP.

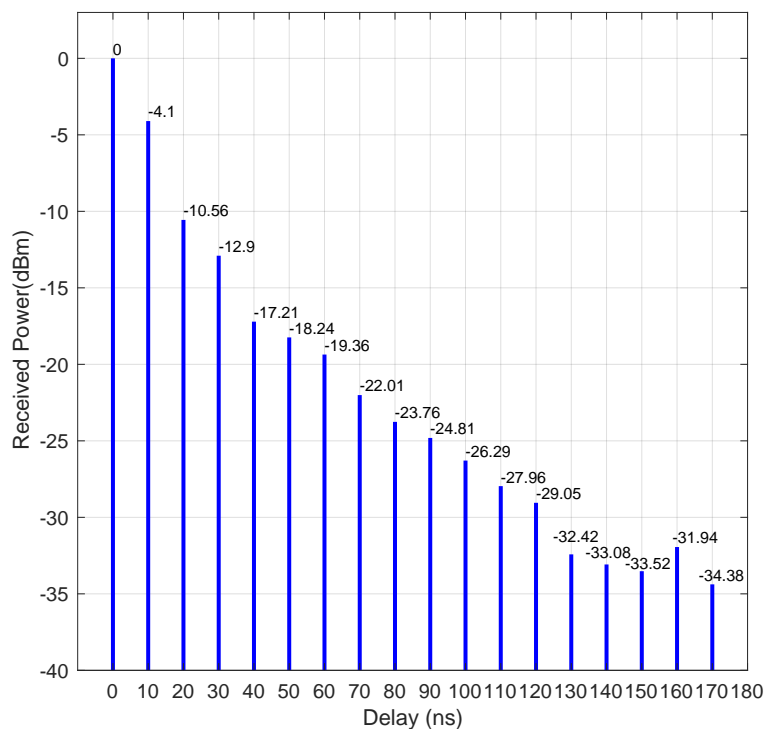


Figure 1: Usulan model kanal 5G Indonesia dengan jarak 200 meter.

#### 2.4. Outage Performance

*Outage performance* didapat dari kumpulan *Outage probability* untuk SNR atau  $E_b/N_0$  berbeda. *Outage probability* adalah probabilitas *channel capacity* ( $C$ ) bernilai lebih kecil daripada *Channel Coding Rate* ( $R$ ),

$$P(C \leq R), \quad (13)$$

yang diakibatkan oleh terjadinya *Rayleigh fading*. Ini mengindikasikan bahwa terjadi kegagalan deteksi yang menurut teori Shannon bahwa *error* mendekati nol didapat jika  $R = C$ .

Model kanal telah digunakan dan sangat efektif untuk mengevaluasi performansi, seperti pada [11] berdasarkan eksperimen pada lingkungan nyata di Jerman. Penghitungan *outage probability* telah dibuktikan pada [12] dan [13], yang sesuai dengan dengan *coding* praktis, walaupun *outage probability* dihitung ter sendiri.

### 3. Model Kanal 5G Indonesia dan Analisisnya

#### 3.1. Model Kanal 5G Indonesia

*Instantaneous* PDP bervariasi pada setiap pengukuran sehingga untuk mendapatkan PDP yang representatif data PDP ini diolah menggunakan statistika yaitu CDF dengan 85th persentil. Penentuan 85th persentil dari data didasarkan pada distribusi data PDP yang lebih banyak data bernilai kecil sehingga hasil ini bisa memberikan data yang representatif untuk tiap *path* dari PDP. Untuk menghindari *noise* agar tidak dianggap sebagai *path*, PDP hanya diambil yang bernilai di atas *threshold* -140 dB karena kecenderungan generasi baru memiliki *power sensitivity* yang lebih baik. Proses berikutnya adalah normalisasi terhadap

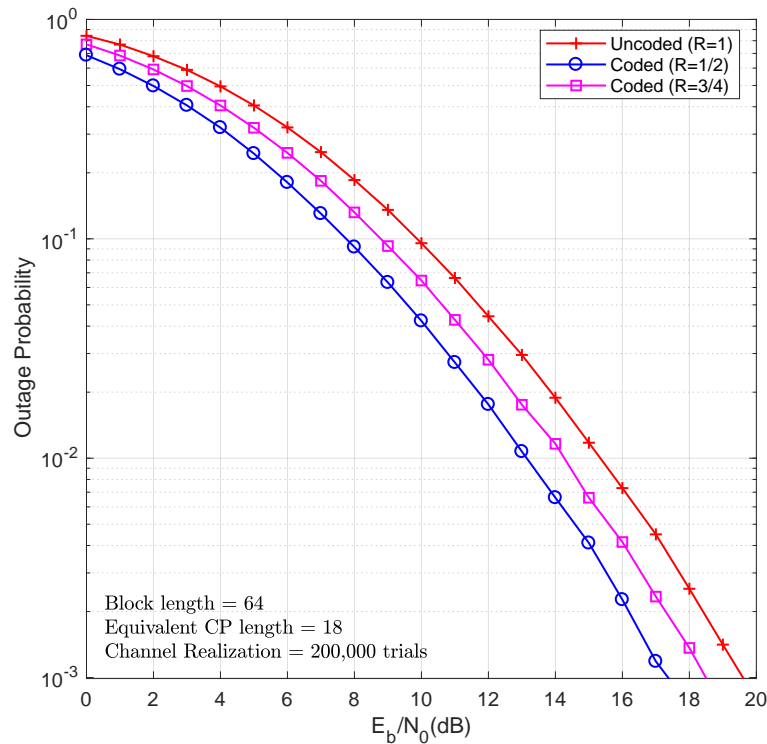


Figure 2: *Outage Probability* dari model kanal 5G Indonesia pada  $R = 1$ ,  $R = 3/4$  dan  $R = 1/2$ .

*path* dengan daya terkuat pada PDP tersebut, sehingga PDP representatif yang didapat merupakan PDP yang sudah dinormalisasi.

Kota Bandung memiliki karakteristik tekanan udara 924.1 mbar dengan kelembapan 77.87% dan suhu rata-rata 23.65 derajat celsius. Pada Tugas Akhir ini PDP representatif kota Bandung diusulkan sebagai model kanal Indonesia yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan 18 *path*. Daya dari PDP representatif model kanal Indonesia mengalami penurunan secara eksponensial yang mengindikasikan *diversity effect* akan dicapai pada  $E_b/N_0$  yang cukup tinggi.

Tugas Akhir ini menghitung *Mean excess delay* untuk kanal 5G Indonesia dengan

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{k=0}^K P(\tau_K) \tau_K}{P(\tau_K)}, \quad (14)$$

sehingga didapatkan *Mean excess delay* sebesar 7.15 ns dengan variabel  $P$  adalah daya dan  $\tau$  adalah *delay*. *Root mean square (RMS) delay spread* dihitung menggunakan

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2}, \quad (15)$$

dengan  $\tau$  merupakan *Mean excess delay*. *RMS delay spread* didapat sebesar 14.81 ns.

### 3.2. Analisis Outage Performances

*Outage probability* didapat dari kapasitas kanal dengan probabilitas  $P(C \leq R)$  untuk akhirnya didapatkan *outage performance*. Pada Tugas Akhir ini *outage probability* dihitung pada  $R = 1$ ,  $R = 3/4$

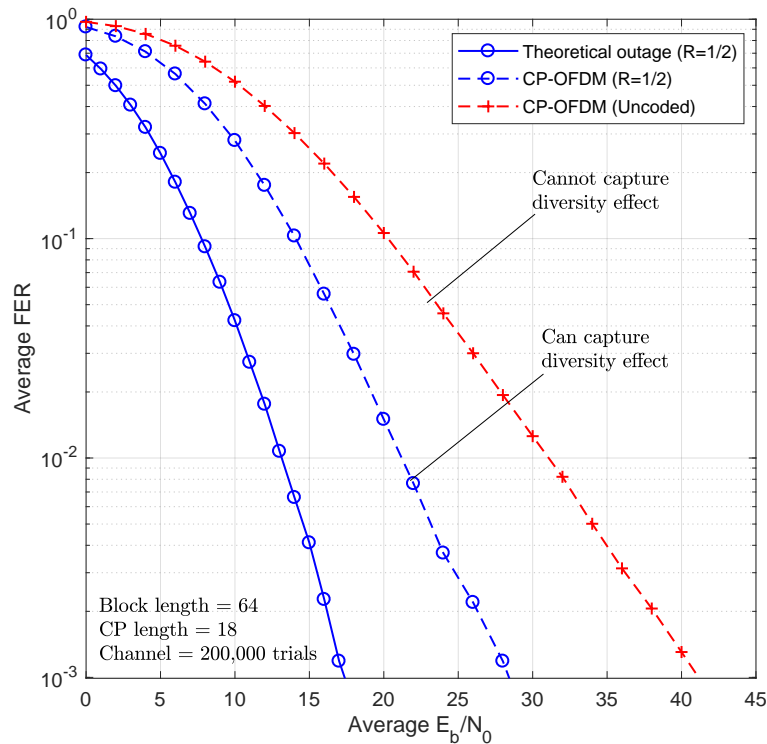


Figure 3: FER hasil simulasi dari model kanal 5G Indonesia pada  $R = 1$  dan  $R = 1/2$  dibandingkan dengan *outage probability*.

dan  $R = 1/2$  untuk kemudian divalidasi menggunakan sistem OFDM dengan modulasi BPSK  $M = 1$ . Hasil perhitungan *outage performance* ditampilkan pada Gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan tiga kurva *outage performance* dari kanal model Indonesia dengan 18 *path* untuk *channel coding rate*  $R = \{1/2, 3/4, 1\}$ . Tiga kurva *outage performance* memiliki gradien yang sama yang mengindikasikan bahwa ketiga kurva tersebut memiliki *diversity order* yang sama. Gambar 2 juga menampilkan bahwa untuk mendapatkan probabilitas *outage* sebesar  $10^{-2}$  sistem 5G dengan  $R = 1/2$  perlu 13 dB, pada  $R = 3/4$  perlu 14 dB dan pada  $R = 1$  perlu 15 dB. Nilai  $E_b/N_0$  tersebut diharapkan menjadi referensi teori  $E_b/N_0$  untuk sistem 5G di Indonesia.

### 3.3. Validasi

Pada Tugas Akhir ini, validasi *outage performance* belum menggunakan sistem 5G sesungguhnya. Sebagai gantinya, Tugas Akhir ini mengusulkan pengujian BER dan FER untuk memvalidasi usulan model kanal 5G Indonesia.

#### 3.3.1. Pengujian FER

FER dihitung dengan FFT berukuran 64, panjang CP 18 dan diuji di atas 200.000 kanal. Hasil FER dengan *channel coding* ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar 3 menampilkan perbandingan untuk *channel coding rate*  $R = 1/2$ . Kurva FER  $R = 1$  ditambahkan sebagai pembanding untuk melihat *diversity effect*. Gambar 3 mengkonfirmasi bahwa CP-OFDM dengan *channel coding* dapat menangkap *diversity effect*. Gap antara CP-OFDM dan teori tidak menjadi masalah karena *channel coding* sangat sederhana, Convolutional codes. Gap ini dapat diperkecil dengan menggunakan *channel coding* yang lebih kuat, seperti Polar codes atau LDPC codes seperti yang digunakan pada standard 5G [14]. Sebaliknya, CP-OFDM tanpa *channel*



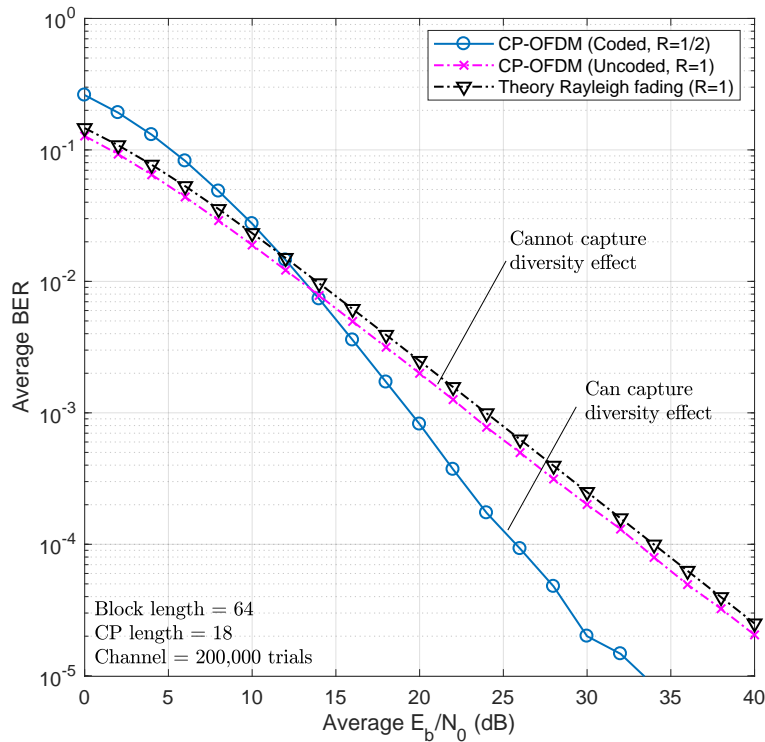


Figure 4: BER hasil simulasi dari model kanal 5G Indonesia pada  $R = 1$  dan  $R = 1/2$ .

*coding* tidak dapat menangkap *diversity effect* yang membuat gradiennya sama dengan gradien FER pada *frequency-flat fading*.

### 3.3.2. Pengujian BER

Tugas Akhir ini juga menampilkan performansi BER dari sistem CP-OFDM pada Gambar 4 untuk 5G pada model kanal kota Bandung yang menjadi representasi kanal model 5G Indonesia yang diharapkan untuk menjadi referensi untuk implementasi sistem sesungguhnya. Kami juga membandingkan hasil simulasi performansi BER dengan teori performansi BER pada kanal *single path Rayleigh fading*, yang dinyatakan dengan [15]

$$BER_{BPSK-Fading} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/N_0}}} \right] \tag{16}$$

untuk *channel coding rate*  $R = 1$ . Perlu disampaikan di sini bahwa teori BER untuk  $R$  dibawah 1 belum ada (sepanjang pengetahuan kami 2018).

Kami menemukan bahwa performansi BER dari *uncoded* 5G CP-OFDM memiliki kecenderungan yang sama dengan teori dengan performansi yang sedikit lebih baik dikarenakan *multipath fading effect* dari model kanal 5G. Berdasarkan dari konfirmasi untuk  $R = 1$ , performansi BER untuk  $R = 1/2$  juga diharapkan benar yang mampu "menangkap" *diversity effect* akibat kanal *multipath fading* dengan gradien yang lebih baik dengan *diversity order* 2.



## 4. Kesimpulan dan Saran

### 4.1. Kesimpulan

Tugas Akhir ini telah melakukan studi tentang model kanal 5G Indonesia untuk mengevaluasi kinerja jaringan 5G di Indonesia. Tugas Akhir ini juga mengusulkan model kanal untuk Indonesia dan juga mengevaluasi *outage probability*, FER, dan BER dari jaringan 5G di Indonesia yang diharapkan bisa menjadi salah satu referensi implementasi 5G di Indonesia. Model kanal 5G Indonesia memiliki 18 *paths*, dengan *mean excess delay* sebesar 7.15 ns, dan *RMS delay spread* sebesar 14.81 ns. Kapasitas kanal (per-link) dihitung menggunakan representatif PDP dan dievaluasi menggunakan CDF, dengan metode perhitungan *eigen value* seperti pada CP-OFDM. Validitas dari *outage performance* telah dikonfirmasi menggunakan simulasi komputer menggunakan sistem CP-OFDM dengan Convolutional codes sebagai *encoder*-nya dan Viterbi algorithm sebagai *decoder*-nya. Kinerja menggunakan 5G *channel coding scheme* sesuai standar 5G, seperti LDPC dan Polar codes, akan memberikan kinerja yang lebih baik, menghilangkan *gap* dan mendekati teori *outage performances*.

Tugas Akhir ini diharapkan dapat bermanfaat untuk membantu eksperimen dan implementasi jaringan 5G di Indonesia.

### 4.2. Saran

Tugas Akhir ini telah menjadi pengantar pembuatan model kanal 5G Indonesia beserta teori dan validasinya. Tugas Akhir ini menyarankan untuk (i) validasi model kanal Indonesia dengan pengukuran lapangan menggunakan *channel sounder* sehingga model kanal yang didapatkan semakin akurat dan (ii) memperbanyak sampel untuk kota-kota lainnya di Indonesia.

## References

- [1] K. Haneda, L. Tian, Y. Zheng, H. Asplund, J. Li, Y. Wang, D. Steer, C. Li, T. Balercia, S. Lee, Y. Kim, A. Ghosh, T. Thomas, T. Nakamura, Y. Kakishima, T. Imai, H. Papadopoulos, T. Rappaport, G. Maccartney, A. Ghosh, 5G 3GPP-like channel models for outdoor urban microcellular and macrocellular environments.
- [2] N. T. N. O. Tetsuro IMAI, Koshiro Kitao, Radio propagation for 5G, NTT DOCOMO Technical Journal.
- [3] T. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. Wong, J. Schulz, M. Samimi, F. Gutierrez, Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! 1 (2013) 335–349.
- [4] S. Sun, G. R. M. Jr., T. S. Rappaport, A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications, in: 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, 2017, pp. 1–7.
- [5] R. Jain, Channel models a tutorial.
- [6] A. F. Molisch, Wireless Communications, 2nd Edition, Wiley Publishing, 2011.
- [7] M. Samimi, T. Rappaport, 3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design (2016) 1–19.
- [8] M. Samimi, T. S. Rappaport, 3-D statistical channel model for millimeter-wave outdoor mobile broadband communications, in: ICC, 2015.
- [9] C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, The Bell System Technical Journal 27 (3) (1948) 379–423. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- [10] C. Schlegel, L. Perez, Trellis and Turbo Coding, John Wiley & Sons, 2003.
- [11] K. Anwar, T. Matsumoto, “Field measurement data-based performance evaluation for Slepian Wolf relaying systems.
- [12] K. Anwar, T. Matsumoto, Low-complexity Time-concatenated Turbo Equalization for Block Transmission: Part 1 - The Concept, Wireless Personal Communications 67 (2012) 761–781.
- [13] K. Anwar, T. Matsumoto, Accumulator-assisted distributed turbo codes for relay systems exploiting source-relay correlation, IEEE Communications Letters 16 (7) (2012) 1114–1117.
- [14] 3GPP, Technical specification group radio access network; NR, multiplexing and channel coding, Tech. rep., 3GPP (December 2017).
- [15] H. Harada, R. Prasad, Simulation and Software Radio for Mobile Communications, Artech House, Inc., Norwood, MA, USA, 2002.