

KODE RAPTOR BERBASIS *LOW DENSITY GENERATOR MATRIX (LDGM)* UNTUK *SINGLE CARRIER INTERNET OF THINGS (SC-IoT)*

LOW DENSITY GENERATOR MATRIX (LDGM) BASED RAPTOR CODES FOR SINGLE CARRIER INTERNET OF THINGS (SC-IoT)

Fadilah Nur Hidayah^a, Dr. Eng. Khoirul Anwar S.T., M.Eng.¹, Dr. Nachwan Mufti Ardiansyah S.T., M.T.¹

^aProdi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom,
Jalan. Telekomunikasi No.1 Terusan Buah Batu, Bandung, 40257 INDONESIA
Email: {fadilahnh@student., anwarkhoirul@, nachwanma@}telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Tugas Akhir ini mengusulkan kode Raptor baru berbasis *low density generator matrix (LDGM)* untuk mendukung *Internet of Things (IoT)* yang berkomunikasi menggunakan *single carrier transmission*, disebut *single carrier-IoT (SC-IoT)*. IoT merupakan teknologi masa depan yang terrealisasi dengan *Machine-to-Machine (M2M) communications* dan melibatkan miliaran *device* yang saling terkoneksi dalam Internet.

Target utama Tugas Akhir ini adalah pada pengembangan Kode Raptor untuk internal *device*, namun tidak menutup kemungkinan bahwa beberapa hasil dalam Tugas Akhir ini bisa dipakai untuk desain, analisis, dan pengembangan lanjut *network coding* berbasis Kode Raptor. Teknik yang diusulkan dalam Tugas Akhir ini dikhususkan untuk SC-IoT, karena *single carrier transmission* memiliki kelebihan berupa kesederhanaan desain sehingga sesuai untuk aplikasi yang memerlukan baterai tahan lama.

Tugas Akhir ini mengusulkan Kode Raptor untuk SC-IoT *devices* dengan *degree distribution* baru yang (*sub*)*optimal*, didapat dengan *extrinsic information transfer (EXIT)* analisis, sehingga performansinya mendekati Shannon limit dan menghindari pemborosan *power* dalam transmisi. Kode Raptor terdiri atas *precode* dan Kode Luby Transform (LT). Tugas Akhir ini mengusulkan *precode* berupa LDGM, yang kemudian disebut Kode LDGM-Raptor. Kode LDGM-Raptor ini dirancang secara (*sub*)*optimal* sehingga sesuai untuk SC-IoT dengan *bit-error rate (BER)*, dan *outage probability* yang rendah tetapi *throughput* yang tinggi. Tugas Akhir juga ini mengevaluasi performansi Kode LDGM-Raptor dengan Shannon *limit*, yang diturunkan dari kapasitas kanalnya, untuk mengkonfirmasi kesesuaian dengan kebutuhan jaringan masa depan.

Keywords: *Internet of Things*, Kode LDGM, Kode Raptor, EXIT chart.

Abstrack

This undergraduate thesis proposes new Raptor codes based on low density generator matrix (LDGM) to support the Internet of Things (IoT) using single carrier transmission scheme, called single carrier-IoT (SC-IoT). IoT is a future technology supported by Machine-to-Machine (M2M) communications and is involving billions of interconnected devices on the Internet.

Email addresses: fadilahnh@student.telkomuniversity.ac.id (Fadilah Nur Hidayah),
anwarkhoirul@telkomuniversity.ac.id (Dr. Eng. Khoirul Anwar S.T., M.Eng.), nachwanma@telkomuniversity.ac.id
(Dr. Nachwan Mufti Ardiansyah S.T., M.T.)

The main target of this Final Project is to develop Raptor codes for internal devices. However, it is expected that some results from this thesis are applicable for the design, analysis, and further development of Raptor codes-based network coding. The proposed technique in this thesis is devoted to SC-IoT, since single carrier transmission has advantages of simplicity in the design and is suitable to provide long term battery life services.

This thesis proposes Raptor codes for SC-IoT devices with new (sub)optimal degree distribution, obtained from extrinsic information transfer (EXIT) analysis. We found that the performances approach the Shannon limit leading to avoid wasting power in the transmission. Raptor codes consist of precode and Luby Transform (LT) codes. This thesis designs the precode using LDGM codes, which is then called the LDGM-Raptor codes in this thesis. The LDGM-Raptor codes are designed (sub)optimally to meet the requirement of SC-IoT with low bit-error rate (BER), and outage probability but with high throughput. This thesis also evaluates the performances of the LDGM-Raptor codes with the Shannon limit, derived from its channel capacity, to confirm the suitability of the proposed LDGM-Raptor codes to the future wireless network requirements.

Keywords: Internet of Things, LDGM codes, Raptor codes, EXIT chart.

1. Pendahuluan

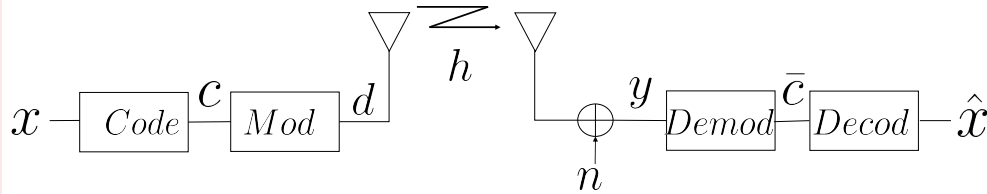
Pada tahun 2020 diperkirakan komunikasi tidak hanya diperlukan oleh manusia tetapi juga oleh benda (*things*)/mesin/*devices*. *Internet of Things* (IoT) memungkinkan hal tersebut dapat terjadi karena mengkoneksikan setiap *device* pada Internet dengan komunikasi *machine-to-machine* (M2M). Dengan terkoneksi setiap benda dengan internet, pada tahun 2020 diperkirakan 14 miliar *devices* akan saling terkoneksi satu sama lain padahal manusia hanya berjumlah 5 miliar. IoT menggunakan sistem komunikasi pita lebar (*broadband*) jika data yang dikirim besar, sedangkan komunikasi pita sempit (*narrowband*), biasanya dengan *single carrier transmission* dipilih jika data yang dikirimkan kecil.

Berdasarkan mekanisme aksesnya, IoT dapat dikategorikan menjadi empat [1], yaitu: (a) *pure ALOHA*, (b) *slotted ALOHA*, (c) *non-slotted carrier sense multiple access with collision avoidance* (CSMA/CA), dan (d) *slotted CSMA/CA*. NB-IoT yang diusulkan oleh 3GPP [2] mengusulkan mekanisme *non-slotted CSMA/CA* dan *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) meskipun menggunakan *narrowband*. Mekanisme IoT yang kelima diusulkan di [3], dengan nama *coded random access* (CRA), yang mampu mencapai *throughput* di atas 1 paket/slot.

Permasalahan mengenai *massive multiple access* telah diselesaikan menggunakan *coded random access* untuk satu paket/slot [4]. Referensi [5], dan [6] mengusulkan teknik baru menggunakan repetition codes untuk mendeteksi dua paket/slot. Pada 2016, penulis [3] menyelesaikan permasalahan tersebut menggunakan teknik baru untuk mendeteksi tiga, dan empat paket/slot. Namun, sepanjang pengetahuan penulis masih terdapat permasalahan yang belum diselesaikan oleh literatur yang ada yaitu *error-floor* yang terjadi karena tidak sampainya paket disebabkan oleh *deep fading*. *Error-floor* ini bisa dihubungi dan bahkan dihapus (sampai BER dibawah 10^{-5} dengan cara menambahkan *precoding* dalam jaringan. *Precoding* ini perlu dianalisis secara mendalam sebelum diimplementasikan pada jaringan *wireless IoT*. Kajian *precoding* bisa dimulai dengan mengkaji *precoding* pada *internal device*, karena desain yang bagus di *device* diharapkan bisa bagus pula di jaringan.

Pada Tugas Akhir ini, permasalahan *error floor* diselesaikan dengan menggunakan *precodes* dalam *device*, disebut Kode Raptor. Di dalam desain Kode Raptor *rateless precodes* berfungsi melindungi informasi yang tidak terpilih oleh *encoder*. Tugas Akhir ini membatasi analisis untuk kode yang tidak *rateless*, meskipun analisis yang disampaikan disini, dengan sedikit tambahan bisa digunakan untuk analisis Kode Raptor *rateless*.

Tugas Akhir ini mengusulkan SC-IoT Kode Raptor karena kemampuannya dalam mengatasi *error-floor* dengan *encoder*, dan *decoder* yang sederhana dibandingkan dengan Kode Turbo, yang merupakan kandidat *error* koreksi pada NB-IoT.

Figure 1: Konfigurasi umum *transmitter* dan *receiver*.

2. Dasar Teori

Bab ini menjelaskan teori dasar dalam Tugas Akhir ini, berdasarkan struktur *transmitter* dan *receiver* dalam Figure 1. Teori ini menjadi pengantar dari desain yang diusulkan dalam Tugas Akhir ini. Semua notasi dan simbol yang digambar dijaga tetap dan konsisten meskipun dalam bab yang berbeda. Teori yang dibahas adalah teori utama meliputi: (i) algoritma *decoding*, (ii) kanal, dan (iii) *extrinsic information transfer* (EXIT) chart. *Binary information* dinyatakan dengan x , sedangkan hasil *encoding* dengan c . Model notasi menghasilkan d sebelum dikirimkan melalui kanal h . Pada penerima, AWGN noise n ditambahkan sehingga menghasilkan total *receive signal* y . Setelah proses demodulasi vektor $\bar{c}$ didapat untuk diteruskan ke proses *decoding* dan menghasilkan $\hat{x}$ yang merupakan estimasi dari *binary information* x .

2.1. Kode Raptor

Kode Raptor tersusun atas kode *forward error correcting* (FEC) dengan rate yang tinggi, yaitu *precode*, dan kode Luby Transform (LT). *Precode* berfungsi memproteksi informasi jika ada bit informasi yang tidak terpilih untuk dikirimkan. Tidak terpilihnya informasi ini berakibat pada terjadinya *error-floor*. *Precode* bisa menggunakan Kode Reed-solomon, Kode *Low Density Parity Matrix* (LDPC), dan Kode LDGM. Tugas Akhir ini menggunakan LDGM sebagai *precode*.

Struktur kode Raptor ditunjukkan oleh Figure 2 dengan *precode* diatas Kode LT. Kode Raptor ditulis dengan notasi $(k, c, \Omega(x))$. *Input* kode Raptor x sepanjang k -bit membentuk *codeword* $\tilde{x}$ dengan panjang n bits. Simbol keluaran c sepanjang m bits merupakan simbol yang dibangkitkan oleh kode LT dari n *intermediate symbol*. $\Omega(x)$ merupakan *degree distribution* dari kode LT [7] yang didesain untuk memiliki error sekecil mungkin.

2.2. Extrinsic Information Transfer (EXIT) Chart

Untuk *decoding* yang melibatkan dua buah iterasi, terdapat dua jenis *extrinsic mutual information*, yaitu *external extrinsic mutual information*, dan *internal extrinsic mutual information*. *External extrinsic mutual information* digunakan untuk iterasi antar dua kode, dalam Tugas Akhir ini berarti iterasi antar Kode LDGM, dan Kode LT. Sedangkan *internal extrinsic mutual information* digunakan untuk iterasi di dalam sebuah kode, dalam Tugas Akhir ini berarti iterasi *internal* di dalam Kode LDGM, dan iterasi *internal* di dalam Kode LT.

Figure 3 menunjukkan contoh EXIT chart, dengan sumbu x adalah *apriori mutual information* 1 dan *extrinsic mutual information* 2, dan sumbu y adalah *extrinsic mutual information* 1 dan *apriori mutual information* 2. Pada Figure 3 terdapat 2 kurva, yaitu kurva 1 dan kurva 2. Kurva 2 selalu berawal di titik 0, sedangkan kurva 1 tidak berawal dari titik 0. Target utama dari EXIT chart adalah menghindari titik perpotongan antara kurva 1 dan kurva 2 sebelum mencapai titik (1,1). Evaluasi performansi didapatkan berdasarkan gap antara kurva 1 dan kurva 2. Area di bawah kurva 1 merepresentasikan kapasitas Shannon. Semakin kecil gap antara kurva 1 dan kurva 2 maka performansi akan semakin mendekati Shannon limit.

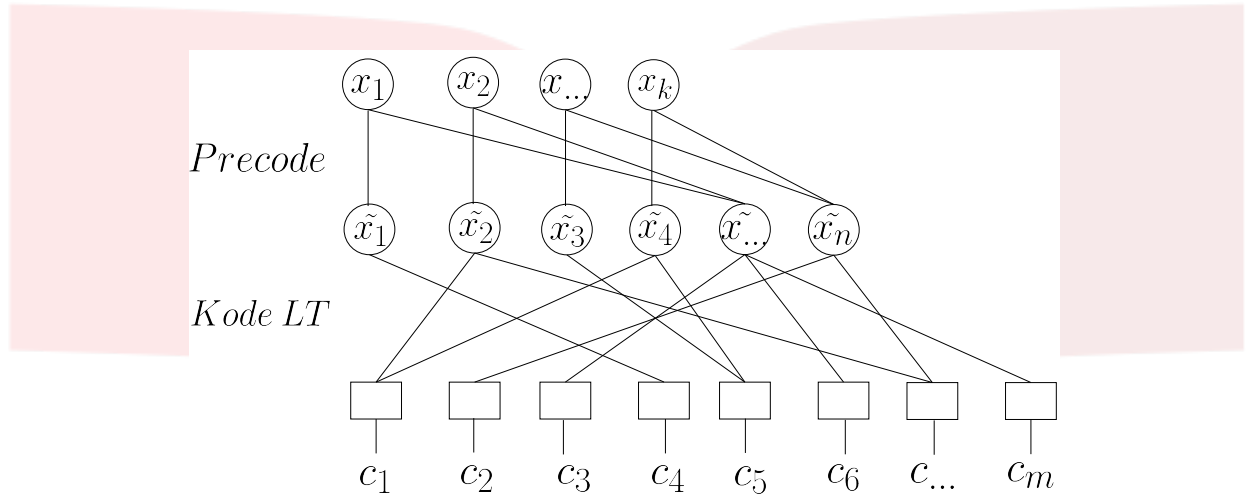


Figure 2: Bipartite graph Kode Raptor.

2.3. Log-Likelihood Ratio (LLR) untuk Soft Decoding

Untuk skema iteratif *decoding*, nilai *soft decoding* dari variabel acak biner paling mudah dinyatakan dalam *log-likelihood ratio* (LLR). *Aposteriori* LLR dari bit yang dikirim $\mathbf{c}$ terhadap bit yang diterima $\mathbf{y}$ dinyatakan dalam rasio probabilitas *a posteriori* $P[\mathbf{c} = \pm 1 | \mathbf{y}]$ [8]

$$L(c|y) = \frac{P[c = +1|y]}{P[c = -1|y]}. \quad (1)$$

Apriori LLR $L_A(\mathbf{c})$ adalah informasi sebelumnya pada $\mathbf{c}$, dan $L_{ch}(\mathbf{c}|\mathbf{y})$ adalah bit yang dikirim $\mathbf{c}$ berdasarkan pengamatan kanal pada $\mathbf{y}$. Untuk kanal AWGN, *conditional probability* untuk sinyal yang diterima setelah antenna adalah [8]

$$L_{ch}(y|c) = \ln \frac{\exp \left[-\frac{(y-c)^2}{2\sigma^2} \right]}{\exp \left[-\frac{(y+c)^2}{2\sigma^2} \right]}, \quad (2)$$

$$= \frac{2}{\sigma^2} \cdot y, \quad (3)$$

sedangkan untuk kanal *frequency-flat Rayleigh fading* adalah [8]

$$L_{ch}(c|y) = \frac{2}{\sigma^2} \cdot a \cdot y, \quad (4)$$

dimana a adalah atenuasi kanal.

Figure 4 menunjukkan *check node* dengan masukan informasi *apriori* LLR (L_A), keluaran informasi *extrinsic* LLR (L_E), dan LLR *channel* (L_{ch}). *Extrinsic* LLR untuk bit ke- i $L_{i,E}$ dapat dinyatakan dengan

$$L_{i,E} = \ln \frac{1 - \prod_{j \neq i} \frac{1 - e^{L_{j,in}}}{1 + e^{L_{j,in}}}}{1 + \prod_{j \neq i} \frac{1 - e^{L_{j,in}}}{1 + e^{L_{j,in}}}}, \quad (5)$$

$$= \ln \frac{1 - \left(\frac{1 - e^{L_{ch}}}{1 + e^{L_{ch}}} \cdot \frac{1 - e^{L_{1,A}}}{1 + e^{L_{1,A}}} \cdots \frac{1 - e^{L_{j,A}}}{1 + e^{L_{j,A}}} \right)}{1 + \left(\frac{1 - e^{L_{ch}}}{1 + e^{L_{ch}}} \cdot \frac{1 - e^{L_{1,A}}}{1 + e^{L_{1,A}}} \cdots \frac{1 - e^{L_{j,A}}}{1 + e^{L_{j,A}}} \right)}, \quad (6)$$

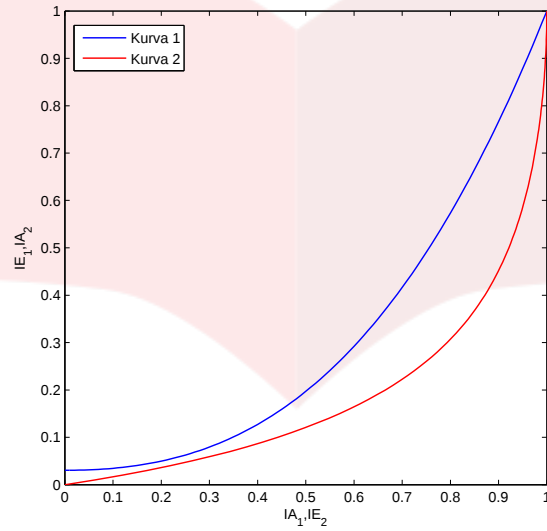


Figure 3: Contoh EXIT chart.

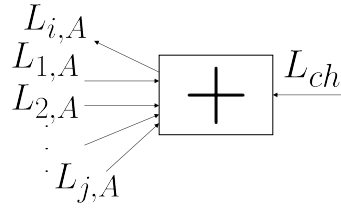


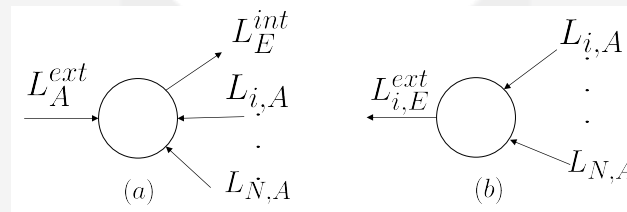
Figure 4: Operasi LLR pada check node.

dengan $L_{j,in}$ adalah LLR ke- j yang masuk pada *check node*. Pada Figure 4, $L_{j,in}$ adalah L_{ch} dan $L_{j,A}$.

Figure 5 (a) menunjukkan *variable node* dengan masukan informasi *a priori* LLR L_A^{ext} , $L_{i,A}$, sampai $L_{N,A}$, dan keluaran informasi *extrinsic* LLR L_E^{int} . $L_{i,E}^{int}$ dirumuskan dengan

$$L_{i,E}^{ext} = L_A^{ext} + \sum_{i \neq j} L_{i,A}. \quad (7)$$

Figure 5 (b) menunjukkan *variable node* dengan keluaran informasi *extrinsic* LLR L_E^{ext} , dan masukan

Figure 5: Operasi LLR pada *variable node*.

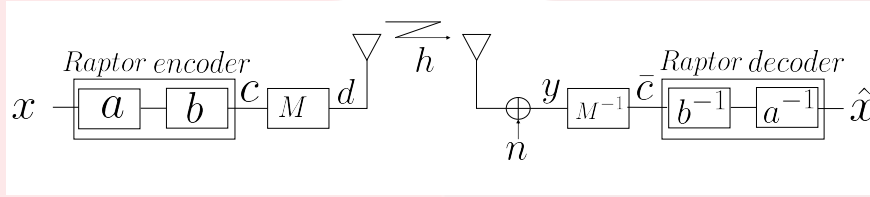


Figure 6: Struktur *transmitter* dan *receiver* antara tiap *device* 1 sampai *n*, dengan BS.

informasi *a priori* LLR adalah $L_{i,A}$, sampai $L_{N,A}$. Informasi *external extrinsic* LLR didefinisikan sebagai

$$L_E^{ext} = \sum_i L_{i,A}. \quad (8)$$

3. Model Sistem

Bab ini membahas perancangan dan pemodelan sistem teknologi yang diusulkan. Parameter yang dianalisis adalah analisis EXIT *chart*, *bit-error rate* (BER), *throughput*, dan *outage probability*.

Modulasi yang digunakan adalah BPSK pada kanal *additive white Gaussian noise* (AWGN) dan *frequency-flat Rayleigh fading*.

3.1. Konfigurasi Sistem

Figure 6 menunjukkan konfigurasi *transmitter* dan *receiver* yang dirancang untuk komunikasi antara *devices* dengan BS. Pada sisi *transmitter*, data biner x dibangkitkan secara acak sebanyak jumlah bit tertentu dengan probabilitas kemunculan bit '0' dan '1' sama (*equi-probable*). Setelah dibangkitkan, data dikodekan menggunakan LDGM *encoder*. LDGM *encoder* menjadi tahap *precode* dari skema Kode raptor seperti yang ditunjukkan a pada Figure 6. Luarannya dikodekan kembali menggunakan Kode LT b seperti yang ditunjukkan pada Figure 6. Kombinasi antara LDGM dan LT *encoder* disebut Kode Raptor, dan hasil keluarannya c adalah *encoded* bit, yang berarti informasi yang sudah ditambahkan dengan bit blackundansi oleh Kode Raptor. Kemudian c dipetakan ke modulasi BPSK sehingga menghasilkan d berupa simbol per-bit. Kemudian data dikirim melewati kanal h , kanal diasumsikan menggunakan transmisi *single carrier*. Data diterima oleh *receiver* berupa y yang sudah bercampur dengan *noise* adalah

$$y = h \cdot c + n, \quad (9)$$

dengan $h = 1$ untuk kanal AWGN dan $h = (randn + j \cdot randn)/\sqrt{2}$ untuk *frequency-flat Rayleigh fading*, dengan n adalah vektor *noise*. Lalu y didemodulasi menghasilkan $\bar{c}$, dan di-decode menggunakan Kode LT b^{-1} dan Kode LDGM c^{-1} sehingga menghasilkan data informasi kembali yaitu $\hat{x}$.

3.2. Usulan Teknologi

Figure 7 menunjukan struktur dari usulan Kode LDGM-Raptor, dengan Kode LT terhubung langsung dengan antenna dengan *erasure probability* ϵ . Performansi dari Kode LDGM-Raptor bergantung pada optimum *degree distribution* $A(x), B(x), \Lambda(x), \Omega(x)$. Contoh *degree distribution* pada Figure 7 adalah

$$A(x) = x^2, \quad (10)$$

$$B(x) = \frac{2}{3}x + \frac{1}{3}x^2, \quad (11)$$

$$\Lambda(x) = \frac{2}{3}x^2 + \frac{1}{3}x^3, \quad (12)$$

$$\Omega(x) = \frac{2}{4}x + \frac{1}{4}x^2 + \frac{1}{4}x^3. \quad (13)$$

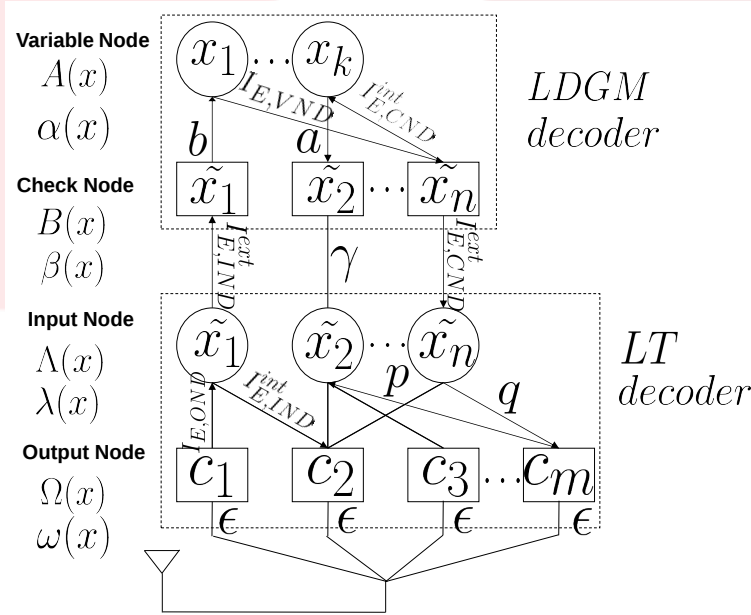


Figure 7: Usulan Kode Raptor.

Contoh *degree distribution* pada (10) – (13) belum menghasilkan performansi yang optimal. Untuk itu, diperlukan untuk mencari *degree distribution* yang optimum, dan cara paling mudah untuk mencari *degree distribution* yang optimum adalah dengan EXIT chart.

Pada Tugas Akhir ini, analisis EXIT dilakukan pada kanal *erasure*, dimana pendekatan kanal AWGN menggunakan kanal *erasure* sudah terbukti akurat [9]. Berdasarkan pada analisis *AND-OR tree* [10], *erasure probability* antara OND dan IND saling bertukar berdasarkan *edge perspective degree distribution* $\alpha(x), \beta(x), \lambda(x), \omega(x)$ dari *node perspective degree distribution* $A(x), B(x), \Lambda(x), \Omega(x)$. *Edge perspective* dari $A(x)$ didapatkan dengan cara:

$$\alpha(x) = \frac{A'(x)}{A'(1)}, \quad (14)$$

dengan $A'(x)$ adalah turunan pertama dari $A(x)$ terhadap x .

3.2.1. EXIT Equation

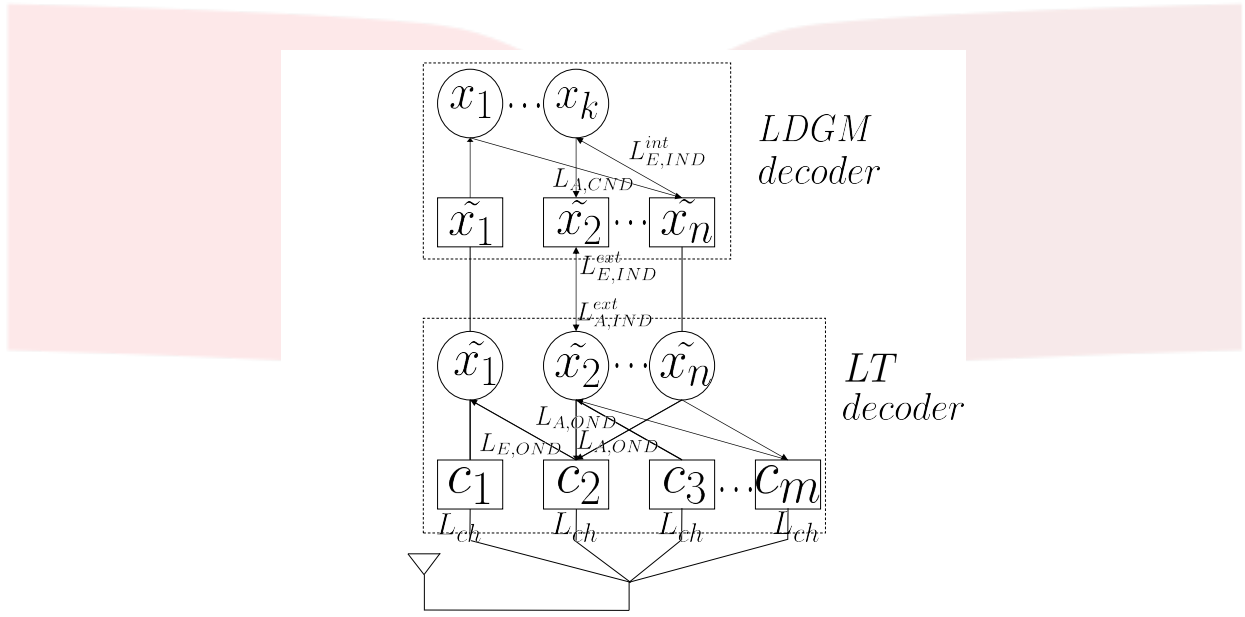
Tugas Akhir ini menggunakan model kanal BEC sehingga memudahkan dalam analisis EXIT chart. EXIT chart menggunakan fungsi *mutual information* yang didefinisikan sebagai

$$I_A = 1 - v, \quad (15)$$

dengan v adalah *erasure probability*, $v = \{\epsilon, p, q, \gamma, a, b\}$. Parameter ϵ merupakan *erasure probability* dari kanal, p , dan q adalah *erasure probability* yang masing-masing keluar dari OND dan IND, sedangkan γ adalah *erasure probability* yang keluar dari CND dan IND pada eksternal kode, dan a, b adalah *erasure probability* yang masing-masing keluar dari VND dan CND, seperti yang ditunjukkan oleh Figure 7. Berdasarkan pada analisis *AND-OR tree* [10], *extrinsic mutual information* dirumuskan dengan

$$I_{E,VND} = 1 - \alpha(b) \quad (16)$$

$$= 1 - \alpha(1 - I_{A,VND}). \quad (17)$$

Figure 8: Struktur Kode LDGM-Raptor untuk *soft decoding*.

CND memiliki dua *extrinsic mutual information*, yaitu *internal* $I_{E,CND}^{int}$, dan *external* yang terhubung pada Kode LT dilambangkan sebagai $I_{E,CND}^{ext}$. *Internal extrinsic mutual information* adalah

$$I_{E,CND}^{int} = (1 - \gamma) \cdot \beta(I_{A,CND}), \quad (18)$$

dan untuk *external extrinsic mutual information* yaitu

$$I_{E,CND}^{ext} = B(I_{A,CND}). \quad (19)$$

Untuk Kode LT, terdapat perbedaan antara Kode LT tanpa *precode* dan Kode LT dengan *precode*. Kode LT tanpa *precode* tidak dipengaruhi oleh γ , dituliskan sebagai

$$I_{E,IND}^{int} = 1 - \lambda(1 - I_{A,IND}). \quad (20)$$

Sedangkan *internal extrinsic mutual information* dengan *precode* adalah

$$I_{E,IND}^{int} = 1 - (\gamma \cdot \lambda(1 - I_{A,IND})), \quad (21)$$

dan *external extrinsic mutual information* dengan *precode* dirumuskan sebagai

$$I_{E,IND}^{ext} = 1 - \Lambda(1 - I_{A,IND}). \quad (22)$$

Berbeda dengan IND, OND untuk Kode LT tanpa *precode* dan Kode LT dengan *precode* memiliki persamaan yang sama, yaitu

$$I_{E,OND} = (1 - \epsilon) \cdot \omega(I_{A,OND}). \quad (23)$$

3.2.2. Soft Decoding Kode LDGM-Raptor

Pada *soft decoding* data asli hasil terima langsung diproses dalam *decoder*, dimana data yang diterima tidak bernilai 0 dan 1. Figure 8 menggambarkan struktur dari Kode LDGM-Raptor dengan menggunakan *log-likelihood ratio* (LLR). Dengan L_{ch} merupakan LLR *channels*, $L_{E,OND}$ adalah informasi LLR keluaran dari OND, $L_{A,OND}$ merupakan informasi LLR masukan untuk OND dan keluaran dari IND. Iterasi dapat dilakukan pada *internal* Kode LDGM, *internal* Kode LT, dan iterasi *global* Kode LDGM-Raptor. Untuk mendapatkan hasil keluaran *decoder* x_1 sampai x_n dilakukan penjumlahan pada semua $L_{E,CND}^{int}$.

Setelah didapat hasil *decoding*, maka perlu dilakukan beberapa analisis untuk menunjukkan performansi dari Kode LDGM-Raptor. Analisis tersebut dilakukan dalam beberapa parameter, yaitu

1. BER

Pada analisis BER, bit hasil *decoding* akan dibandingkan dengan bit awal, nilai BER didapat dengan cara,

$$BER = \frac{X}{k}, \quad (24)$$

dengan X adalah jumlah bit terdecode yang salah dibandingkan dengan jumlah bit awal k , dalam simulasi X didapat dengan $X = \sum(x \neq \bar{x})$, dengan x adalah bit awal yang akan dikirim, dan $\bar{x}$ adalah bit hasil decode.

2. Outage probability

Outage probability adalah probabilitas ketika *code rate* R lebih besar dari kapasitas kanal C yaitu

$$P_{outage} = P(R > C) \quad (25)$$

yang berdasarkan teori *coding*, seharusnya R lebih kecil atau sama dengan C ($C \leq R$), dengan kapasitas kanal adalah

$$C = \frac{1}{2} * \log_2(1 + \gamma * |h|^2) \quad (26)$$

untuk modulasi BPSK, dengan $\gamma = 10^{(SNR/10)}$, dan dalam MATLAB $h = (randn + \sqrt{-1} * randn) / (\sqrt{2})$ karena kanal *frequency-flat Rayleigh fading*.

3. Throughput

Throughput adalah perbandingan jumlah *frame* yang berhasil di-decode dengan benar dengan total jumlah *frame* yang dikirim. *Throughput* juga bisa didapatkan dari nilai *frame error rate* (FER). *Throughput* dirumuskan sebagai

$$T = 1 - FER, \quad (27)$$

dengan

$$FER = \frac{Z}{f}. \quad (28)$$

Parameter Z adalah jumlah *frame* yang terdeteksi salah, sedangkan f adalah jumlah total *frame*.

4. Analisis Performansi Sistem

Bab ini mengevaluasi performansi dari Kode LDGM-Raptor berdasarkan pada: (i) kontribusi dari Kode LDGM-Raptor, (ii) pengaruh jumlah iterasi pada Kode LDGM-Raptor dan pengaruh kanal *frequency-flat Rayleigh fading*, (iii) estimasi BER dengan EXIT chart, (iv) Hasil real simulasi BER, *outage performance*, dan *throughput*.

4.1. Analisis EXIT

Tugas Akhir ini membandingkan Kode LT (tanpa *precode*) dengan Kode LDGM-Raptor (Kode LT dengan *precode*) untuk mengevaluasi kontribusi dari *precode*. Tugas Akhir ini memakai kanal AWGN dengan *BEC-based Equivalent*, dengan mengasumsikan Shannon *capacity* dapat dicapai dengan

$$\begin{aligned} 1 - \epsilon &= C \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \end{aligned} \quad (29)$$

dimana S/N adalah *signal to noise power ratio* [10], [11].

Figure 9 memperlihatkan bahwa Kode LDGM-Raptor memiliki performansi yang lebih bagus dibandingkan dengan Kode LT, terlihat pada kurva dari IND dari Kode LDGM-Raptor yang berada lebih bawah dari IND Kode LT (tanpa *precode*). Kurva OND dipengaruhi oleh kondisi kanal, yaitu *erasure probability* ϵ . Kurva OND akan berada dibawah ketika nilai ϵ besar. Kode LDGM memiliki performansi *error* koreksi

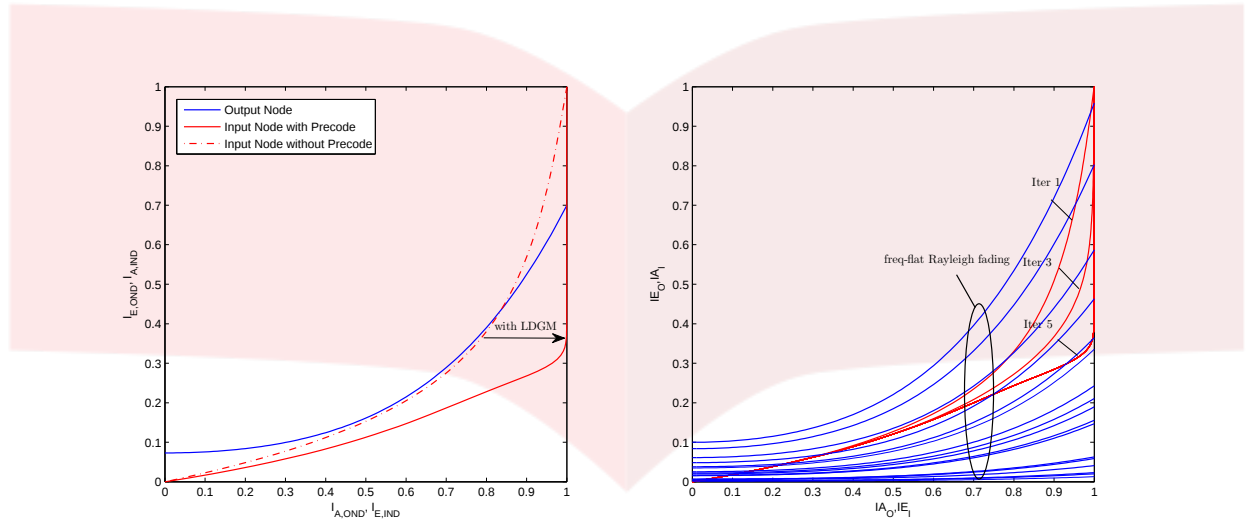


Figure 9: Analisis EXIT kontribusi Kode LDGM-Raptor dan pengaruh kanal *freq-flat Rayleigh fading*

yang rendah, terlihat pada titik akhir kurva EXIT yang memiliki nilai "*non*-(1,1)". Permasalahan tersebut diselesaikan oleh Kode LDGM-Raptor yang memiliki $I_{E,IND} = 1$ dan $I_{A,IND}$ sekitar 0.7.

Pada Tugas Akhir ini, *degree distribution* yang didapat adalah (*sub*)*optimal* karena δ didapat berdasarkan pada ketelitian mata, yaitu:

$$A(x) = x^7, \quad (30)$$

$$B(x) = \frac{5}{11}x + \frac{6}{11}x^5, \quad (31)$$

$$\Lambda(x) = \frac{4}{11}x^2 + \frac{4}{11}x^4 + \frac{3}{11}x^8, \quad (32)$$

$$\Omega(x) = \frac{5}{16}x + \frac{6}{16}x^3 + \frac{5}{16}x^5. \quad (33)$$

Pada kanal *frequency-flat Rayleigh fading*, Tugas Akhir ini membandingkan pengaruh jumlah iterasi pada performansi Kode LDGM-Raptor. Kurva IND EXIT dari Kode LDGM-Raptor dengan iterasi 5 berada lebih bawah dibandingkan dengan IND dengan iterasi 1 atau 3. Hal tersebut menunjukkan bahwa kurva IND EXIT dari Kode LDGM-Raptor dengan iterasi 5 memiliki probabilitas *error* yang lebih kecil. Tetapi, jumlah iterasi yang sangat besar tidak dapat diterapkan secara praktik. Jumlah iterasi mempengaruhi waktu proses *decoding*, sehingga jumlah iterasi yang sangat besar akan memakan waktu proses *decoding* yang lama.

Figure 9 menunjukkan pengaruh dari kanal *fading (one-path)* pada Kode LDGM-Raptor ketika rata-rata SNR sama dengan 0 dB. Nilai *random* pada kanal *fading* membuat kurva OND EXIT memiliki kurva dengan posisirandom. Hal tersebut dapat terlihat pada Figure 9 bahwa kurva OND EXIT dari Kode LDGM-Raptor berada pada posisi yang *random* tergantung pada kanal *fading*. Terdapat kemungkinan bahwa kurva OND EXIT dari Kode LDGM-Raptor berada lebih bawah dari kurva IND, maka akan memiliki performansi yang buruk. Hal tersebut mengharuskan kurva IND EXIT dari Kode LDGM-Raptor memiliki posisi yang lebih bawah dari kurva OND EXIT untuk titik perpotongan dari Kode LDGM-Raptor selalu mendekati titik (1,1) untuk meminimalkan probabilitas *error*.

4.2. Estimasi BER dengan EXIT chart

Tugas Akhir ini mengestimasi BER dari Kode LDGM-Raptor menggunakan EXIT *chart*, berdasarkan pada titik perpotongan pada kurva IND dan OND pada EXIT. Probabilitas *error* didapat dengan,

$$P_b = \frac{1}{2} \times \text{erfc} \left(\frac{\sqrt{J^{-1}(I_{A,OND})^2 + J^{-1}(I_{E,OND})^2}}{2\sqrt{2}} \right), \quad (34)$$

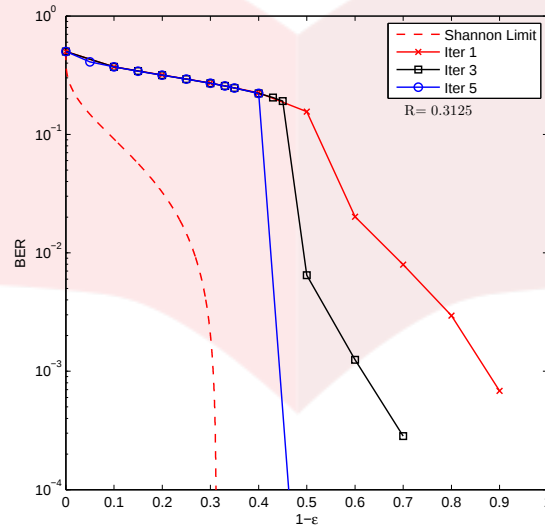


Figure 10: Estimate BER of the proposed LDGM-Raptor Codes.

Seperti yang ditunjukkan pada Figure 10, Kode LDGM-Raptor memiliki SNR 0,3755 dB pada iterasi 1, SNR 0,6245 dB pada iterasi 3, dan SNR 0,866 dB pada iterasi 5 saat BER sama dengan 10^{-4} . Untuk mencapai *Shannon limit*, diperlukan *degree distribution* yang optimal yang dapat menghasilkan titik perpotongan antara kurva OND dan IND pada EXIT chart yang mendekati titik (1,1). Titik perpotongan pada Kode LDGM-Raptor menunjukkan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan performansi BER pada sistem.

Figure 10 juga menunjukkan *BEC-based Shannon limit* untuk $C = 0.3125$, dimana limitnya didapat berdasarkan [12] :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{(1-H(P_e)) \cdot \eta_{max}} - 1}{\eta_{max}} \cdot (1 - H(P_e)), \quad (35)$$

dimana η_{max} menunjukkan efisiensi spektrum, dan $H(P_e)$ adalah *binary entropy* dari BER P_e , yang didefinisikan sebagai

$$H(P_e) = P_e \cdot \log_2 \frac{1}{P_e} + (1 - P_e) \cdot \log_2 \frac{1}{(1 - P_e)}. \quad (36)$$

Dari 35 didapat *limit* dari hubungan S/N dengan E_b/N_0 untuk mengamati *Shannon limit* dari Kode LDGM-Raptor yang diberikan sebagai

$$\frac{S}{N} = \eta_{max} \cdot \frac{E_b}{N_0}. \quad (37)$$

Terlihat pada Figure 10 bahwa *degree distribution* yang diusulkan memiliki performansi yang mendekati *Shannon limit*, dan menandakan bahwa *degree distribution* yang diusulkan cukup bagus untuk *wireless massive communications*.

4.3. Soft decoding Kode LDGM-Raptor

Tugas Akhir ini mengevaluasi performansi dari Kode LDGM-Raptor yang di-decod dengan *soft decoding*. Terdapat beberapa parameter yang dianalisis, diantaranya adalah BER, *throughput*, dan *outage performance*.

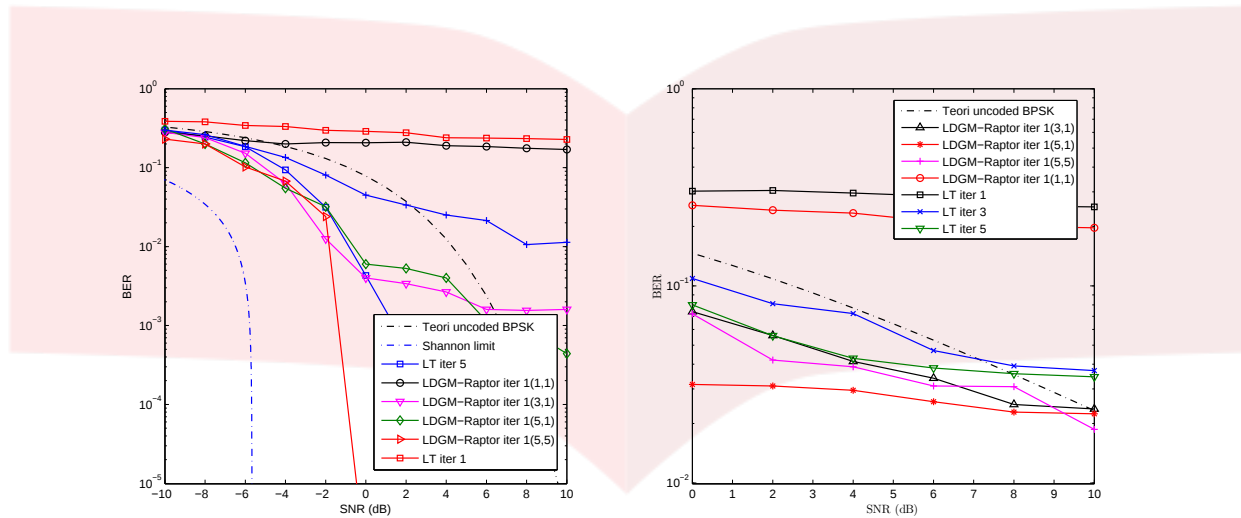


Figure 11: BER hasil simulasi pada kanal AWGN dan *freq-flat Rayleigh fading*

4.3.1. Analisis BER

Figure 11 juga membandingkan Kode LT dengan Kode LDGM-Raptor. Seperti yang terlihat pada gambar tersebut bahwa Kode LT memiliki nilai BER yang lebih tinggi daripada Kode LDGM-Raptor, hal tersebut menunjukkan kontribusi dari Kode LDGM. Berdasarkan gambar tersebut pula, performansi Kode LDGM pada Kode LDGM-Raptor dapat dikatakan bagus ketika iterasi pada Kode LT lebih besar dari 1. Hal tersebut dikarenakan Kode LT merupakan *decoder* tahap pertama dari Kode LDGM-Raptor.

Selain menampilkan performansi Kode LDGM-Raptor pada kanal AWGN, Tugas Akhir ini juga mengevaluasi BER pada kanal *frequency-flat Rayleigh fading*. Seperti yang terlihat pada Figure 12, Tugas Akhir ini membandingkan BER pada Kode LT, Kode LDGM-Raptor dan dengan *Shannon limit*, dan *BPSK uncoded*. Figure tersebut juga menunjukkan bahwa meskipun kurva BER pada Kode LDGM-Raptor jauh dengan *Shannon limit*, tetapi masih menunjukan kelebihanannya dibandingkan Kode LT dan *BPSK uncoded*.

Berdasarkan hasil simulasi dari Kode LDGM-Raptor pada kanal AWGN dan *frequency-flat Rayleigh fading*, Kode LDGM-Raptor memiliki performansi yang cukup bagus, sehingga *(sub)optimal degree distribution* didapat cukup bagus untuk komunikasi *massive wireless IoT*.

4.3.2. Analisis outage performance

Figure 12 membandingkan antara *outage probability* hasil simulasi dengan *outage probability* berdasarkan teori. Kurva teori *outage probability* didapat berdasarkan nilai probabilitas di titik kurva pada saat $R = C$, yang bermakna $R > C$, dimana seharusnya $R < C$. Maka terjadinya kondisi $R > C$ menyalahi teori yang sudah (*error*) maka disebut *outage*.

Figure 12 juga menunjukkan penurunan nilai *outage probability* terhadap kenaikan nilai S/N . Dalam Tugas Akhir ini, *outage performance* dari Kode LT dan Kode LDGM-Raptor kami bandingkan. Berdasarkan Figure 12 terlihat bahwa performansi dari Kode LDGM-Raptor memiliki performansi yang lebih bagus ditandai dengan kedekatannya terhadap kurva teori. Hal tersebut menandakan kurva *outage probability* hasil simulasi dekat dengan kurva *outage probability* berdasarkan teori. Hal tersebut menunjukkan bahwa Kode LDGM-Raptor yang diusulkan cukup baik untuk komunikasi *massive wireless IoT*.

4.3.3. Analisis Throughput

Figure 12 menunjukkan teori *throughput* dan hasil yang didapat dari simulasi Kode LDGM-Raptor. Kurva teori *throughput* didapatkan berdasarkan pada persamaan (27), dimana FER didapat berdasarkan *outage probability*. Sedangkan kurva ?? hasil simulasi didapat berdasarkan nilai $1 - FER$ dari simulasi dibandingkan dengan nilai S/N .

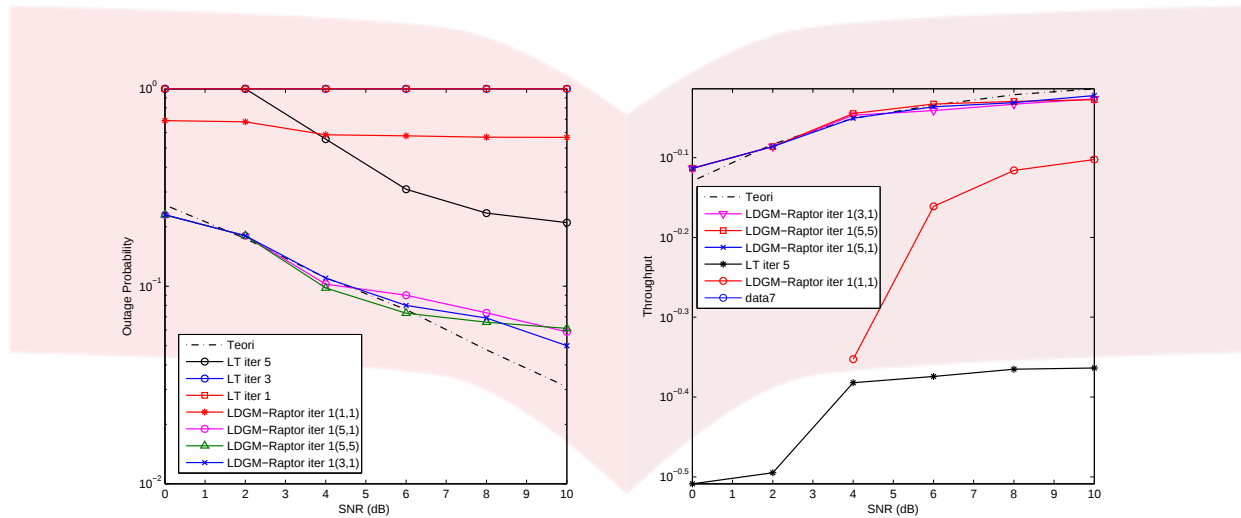
Figure 12: *Outage performance dan throughput hasil simulasi.*

Figure 12 juga menunjukkan bahwa untuk SNR 0 dB secara teori, sejumlah 74% paket dapat diterima tanpa *error*, namun secara praktis sejumlah 31% paket dapat diterima tanpa *error* pada Kode LDGM-Raptor pada iterasi 1(1,1), dan sejumlah 0% paket dapat diterima tanpa *error* untuk Kode LT pada iterasi 5. Hal tersebut menunjukkan performansi LDGM-Raptor yang lebih bagus dibandingkan dengan Kode LT. Meskipun terdapat perbedaan antara teori dan secara praktis (hasil simulasi), namun performansi secara praktis cukup dekat dengan teori, sehingga menandakan usulan Kode LDGM-Raptor cukup bagus untuk komunikasi *massive wireless IoT*.

5. Kesimpulan

Tugas Akhir ini mengusulkan Kode LDGM-Raptor untuk komunikasi *uplink* untuk aplikasi SC-IoT. Kode LDGM-Raptor didesain dengan menggunakan EXIT analisis untuk menghasilkan *(sub)optimal degree distribution* dan mencapai performansi yang optimal. Tugas Akhir ini mengestimasi performansi BER dari Kode LDGM-Raptor menggunakan EXIT *chart*, dan performansi menunjukkan bahwa BER Kode LDGM-Raptor cukup dekat dengan Shannon *limit*. Tugas Akhir ini juga mengevaluasi BER, *throughput*, dan *outage performance* dari hasil simulasi. Performansi BER menunjukkan hasil yang seragam dengan estimasi BER, dimana hasil tersebut cukup dengan Shannon *limit*, dan hasil simulasi *outage performance*, dan *throughput* menunjukkan dekatnya hasil dengan teori hal tersebut menandakan bahwa Kode LDGM-Raptor memiliki performansi yang cukup bagus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Kode LDGM-Raptor memiliki kontribusi yang signifikan pada kanal AWGN dan kanal *frequency-flat Rayleigh fading*, sehingga sesuai untuk jaringan *massive wireless IoT*.

References

- [1] A. Laya, C. Kalalas, F. Vazques-Galelo, L. Alonso, and J. Alonso-Zarate, "Goodbye, ALOHA," *IEEE Access*, vol. 4, 2016.
- [2] Y. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grövlén, Y. Sui, Y. W. Blankenship, J. Bergman, and H. Shokri-Razaghi, "A primer on 3GPP narrowband internet of things (NB-IoT)," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, March 2017.
- [3] A. A. Purwita and K. Anwar, "Massive multiway relay networks applying coded random access," *IEEE Transaction on Communications*, pp. 1–12, 2016.
- [4] G. Liva, "Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 59, no. 2, pp. 477–487, February 2011.
- [5] K. Anwar and M. N. Hasan, "Uncoordinated transmissions in multi-way relaying systems," in *ITG Conference on Systems, Communications and Coding (SCC)*, Hamburg, Germany, February 2015, pp. 1–5.
- [6] M. N. Hasan and K. Anwar, "Massive uncoordinated multiway relay networks with simultaneous detections," in *IEEE International Conf. on Comm. Workshop (ICCW)*, London, UK, June 2015, pp. 2175–2180.

- [7] A. Shokrollahi, "Raptor codes," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2551–2567, June 2006.
- [8] S. T. Brink, "Design of concatenated coding schemes based on iterative decoding convergence," Ph.D. dissertation, Institute of Telecommunications University of Stuttgart, April 2001.
- [9] A. Ashikhmin, G. Kramer, and S. ten Brink, "Extrinsic information transfer functions: Model and erasure channel properties," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 50, no. 11, Nov 2004.
- [10] M. G. Luby, M. Mitzenmacher, and M. A. Shokrollahi, "Analysis of random processes via AND-OR tree evaluation," in *In Proceedings of the 9th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 1998, pp. 364–373.
- [11] T. Cover, *Element of Information Theory*. Wiley, 2008.
- [12] L. C. P. Christian B. Schlegel, *Trellis and Turbo Coding*, S. V. Kartalopoulos, Ed. Wiley-Interscience, 2004.