

**STUDI *LOW DENSITY PARITY CHECK* (LDPC) CODES UNTUK
TELEVISI DIGITAL DVB-T2 INDONESIA**

***STUDY ON LOW DENSITY PARITY CHECK (LDPC) CODES FOR
INDONESIA DIGITAL TELEVISION DVB-T2***

Proposal Tugas Akhir

Disusun sebagai syarat mata kuliah Penyusunan Karya Ilmiah dan Proposal di
Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi

Disusun oleh

Citra Yasin Akbar Fadhlika

1101164109



**FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS TELKOM
BANDUNG
2019**

**LEMBAR PENGESAHAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR**

**STUDI *LOW DENSITY PARITY CHECK* (LDPC) *CODES* UNTUK
TELEVISI DIGITAL DVB-T2 INDONESIA
*STUDY ON LOW DENSITY PARITY CHECK (LDPC) CODES FOR
INDONESIA DIGITAL TELEVISION DVB-T2***

**Telah disetujui dan disahkan sebagai Proposal Tugas Akhir
Program S1 Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung**

Disusun oleh

**Citra Yasin Akbar Fadhlika
1101164109**

**Bandung, 7 Mei 2019
Menyetujui,**

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Eng. Khoirul Anwar, S.T., M.Eng.
16780069

Budi Prasetya, S.T., M.T.
01750049

ABSTRAK

Pertelevisian di Indonesia saat ini masih menggunakan penyiaran televisi (TV) digital yang masih berstandar *Digital Video Broadcasting-Terrestrial* (DVB-T), sedangkan standar penyiaran TV digital di dunia sudah mulai beralih ke *Digital Video Broadcasting-Second Generation Terrestrial* (DVB-T2) sejak tahun 2012. Migrasi dari DVB-T ke DVB-T2 di Indonesia memerlukan kesiapan banyak hal, salah satunya adalah penentuan standar untuk *Low-Density Parity Check* (LDPC) *codes* sebagai *inner coding* dari *Forward Error Correction* (FEC) DVB-T2 yang sesuai dengan kondisi alam (*channel model*) Indonesia.

Tugas Akhir ini melakukan studi LDPC *codes* DVB-T2 untuk mendapatkan struktur dan nilai *code rate* yang sesuai dengan *channel model* Indonesia. Langkah pertama adalah melakukan pengujian *code rate* LDPC *codes* dari standar DVB-T2 pada *channel model* Indonesia. Pengujian dilakukan dengan simulasi komputer menggunakan struktur LDPC *codes* dari standar DVB-T2 sehingga *code rate* yang terbaik akan diusulkan untuk menjadi standar TV digital Indonesia. Apabila hasil evaluasi ini menunjukkan bahwa semua *code rate* tidak sesuai dengan *channel model* Indonesia, maka langkah kedua Tugas Akhir ini mengusulkan modifikasi LDPC *codes* DVB-T2 untuk menjadi standar LDPC *codes* pada DVB-T2 Indonesia dengan menggunakan metode *Extrinsic Information Transfer* (EXIT) *chart*.

Hasil yang diharapkan dari Tugas Akhir ini adalah: (i) struktur LDPC *codes* dan nilai *code rate* yang sesuai dengan *channel model* Indonesia sehingga kinerja FEC DVB-T2 optimal dan (ii) kinerja LDPC *codes* DVB-T2 pada *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) dan *frequency-selective fading channel* menghasilkan nilai *Bit Error Rate* (BER) kurang dari 10^{-5} . Hasil Tugas Akhir diharapkan juga dapat membantu proses pembuatan standar DVB-T2 Indonesia sehingga dapat mempercepat migrasi DVB-T ke DVB-T2 di Indonesia.

Kata Kunci: ***Error correction coding, DVB-T2, LDPC codes, code rate***

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Jadwal Pelaksanaan	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
II KONSEP DASAR	6
2.1 <i>Low Density Parity Check (LDPC) Codes</i>	6
2.1.1 <i>Tanner Graph</i>	7
2.1.2 <i>Regular LDPC Codes</i>	9
2.1.3 <i>Irregular LDPC Codes</i>	9
2.1.4 <i>Quasi-Cyclic (QC) LDPC Codes</i>	9
2.1.5 <i>LDPC Staircase Codes</i>	10
2.2 <i>Standar LDPC Codes Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial (DVB-T2)</i>	11
2.3 <i>Pemodelan Kanal</i>	12
2.3.1 <i>Additive White Gaussian Noise (AWGN) Channel</i>	12
2.3.2 <i>Frequency Selective Fading Channel</i>	13
2.3.3 <i>Power Delay Profile (PDP)</i>	14
2.3.4 <i>Pemodelan Kanal Indonesia</i>	14
2.4 <i>Extrinsic Information Transfer (EXIT) Chart</i>	15

2.5	<i>Bit Error Rate (BER)</i>	16
III SKENARIO PENGUJIAN DAN MODEL SISTEM		18
3.1	Struktur LDPC Codes Standar DVB-T2	18
3.2	Pengaruh <i>Code Rate</i> LDPC Codes DVB-T2 terhadap Kinerja DVB-T2	18
3.3	Pengujian Kinerja LDPC Codes	18
3.3.1	<i>Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)</i>	19
3.3.2	<i>AWGN Channel</i>	20
3.3.3	<i>Frequency Selective Fading Channel</i>	21
3.4	<i>Soft Decoding</i>	21
3.5	Skenario Pengujian Kinerja LDPC Codes DVB-T2	21
3.6	Diagram Blok Sistem	22
DAFTAR PUSTAKA		24

DAFTAR GAMBAR

1.1	Klasifikasi standar TV digital dunia.	1
2.1	Matriks <i>parity check</i> dari <i>regular LDPC codes</i> (3,6).	7
2.2	Matriks <i>parity check</i> dari <i>irregular LDPC codes</i>	7
2.3	<i>Tanner Graph parity check</i> dari <i>regular LPDC codes</i> dengan $d_v = 3$ dan $d_c = 6$	8
2.4	<i>Tanner Graph parity check</i> dari <i>irregular LDPC codes</i>	8
2.5	<i>Tanner Graph</i> dari <i>LDPC Staircase codes</i> dengan $N = 10$, $K = 6$, dan $N_1 = 2$	11
2.6	Diagram blok <i>AWGN channel</i>	12
2.7	Sistem <i>frequency selective fading channel</i>	13
2.8	<i>Channel impulse response</i> di kanal <i>broadband</i>	14
2.9	EXIT chart <i>LDPC codes</i> $d_v = 3$ dan $d_c = 6$	15
2.10	Nilai <i>Uncoded BER</i> QPSK pada <i>AWGN channel</i>	16
3.1	Diagram alir sistem pengujian.	19
3.2	Diagram konstelasi QPSK.	20
3.3	Diagram blok sistem transmisi DVB-T2.	22

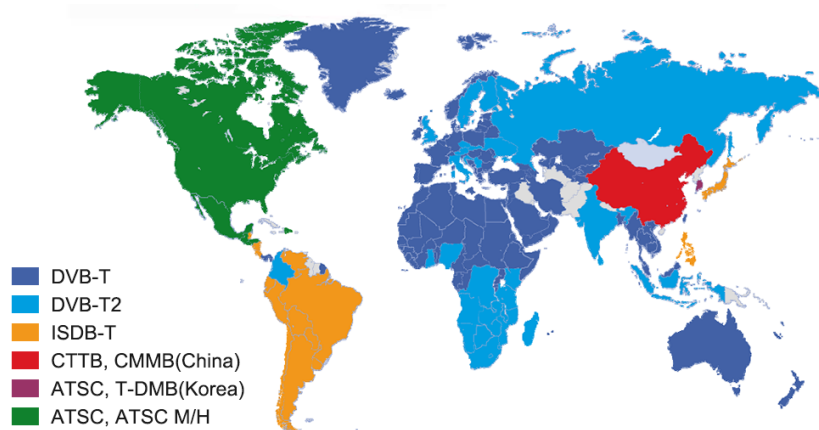
DAFTAR TABEL

1.1	Jadwal penelitian	4
3.1	Pemetaan simbol QPSK.	20

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah



Gambar 1.1 Klasifikasi standar TV digital dunia.

Indonesia telah melakukan migrasi dari penyiaran televisi (TV) analog ke TV digital dengan menggunakan standar *Digital Video Broadcasting-Terrestrial* (DVB-T) sejak tahun 2007 [1]. Saat ini, perkembangan TV digital di dunia sangat pesat. Berbagai negara telah menggunakan standar *Digital Video Broadcasting - Second Generation Terrestrial* (DVB-T2) menggantikan standar DVB-T dikarenakan DVB-T2 menggunakan besar spektrum yang sama, tetapi dapat mengirimkan lebih banyak program siaran TV atau dapat mengirimkan kualitas video/audio yang lebih baik daripada DVB-T [2]. Indonesia diharapkan di masa mendatang dapat melakukan transisi dari DVB-T ke DVB-T2 secara menyeluruh, sesuai dengan regulasi dari Menteri Komunikasi dan Infomatika (Menkominfo) DVB-T2 akan menggantikan standar DVB-T di Indonesia [3].

Transisi dari DVB-T ke DVB-T2 memerlukan banyak persiapan. Untuk memperoleh kinerja optimal standar DVB-T2 harus disesuaikan dengan kondisi alam (*channel model*) Indonesia. DVB-T2 menggunakan *Low Density Parity Check* (LDPC) codes sebagai *channel coding* di *inner coding* dari *Frame Error Correction* (FEC) [4]. Untuk melakukan migrasi dari DVB-T ke DVB-T2 di Indonesia struktur dan *code rate* LDPC codes DVB-T2 yang sesuai dengan *channel model* Indonesia diperlukan. Penyesuaian LDPC codes DVB-T2 diperlukan agar LDPC codes dapat

bekerja secara optimal, sehingga memiliki peluang *error* menjadi sangat kecil.

Tantangan utama untuk melakukan transisi dari DVB-T ke DVB-T2 adalah standar DVB-T2 yang diterbitkan oleh *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) merupakan standar untuk menerapkan DVB-T2 di Jerman [5]. Indonesia memiliki *channel model* yang sangat berbeda dari Jerman, oleh karena itu diperlukan standar DVB-T2 yang sesuai dengan *channel model* di Indonesia sehingga DVB-T2 dapat memperoleh kinerja yang optimal. Tugas Akhir ini bertujuan memperoleh standar FEC di bagian *inner coding* dari DVB-T2 yang sesuai dengan kondisi alam (*channel model*) Indonesia untuk penerapan DVB-T2 di Indonesia kedepannya.

Hasil yang diharapkan dari Tugas Akhir ini adalah struktur dan *code rate* optimal dari LDPC codes DVB-T2 yang sesuai dengan *channel model* Indonesia. Pengujian kinerja menggunakan metode *Extrinsic Information Transfer* (EXIT) chart serta simulasi pada *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) channel dan *frequency-selective fading channel* menggunakan aplikasi MATLAB, hasil divalidasi dengan teori dasar sehingga hasil kinerja *inner coding* dari FEC DVB-T2 ini optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Sejak tahun 2012 Menkominfo telah menetapkan DVB-T2 sebagai standar penyiaran TV digital di Indonesia [3], tapi sampai saat ini Indonesia belum memiliki standar spesifikasi DVB-T2 yang sesuai dengan *channel model* Indonesia. Salah satu spesifikasi DVB-T2 adalah *inner coding* dari FEC DVB-T2 yaitu LDPC codes. Tidak adanya struktur optimal ini menyebabkan sulitnya industri membuat produk yang distandarkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tugas Akhir ini bertujuan melakukan studi terhadap struktur dan nilai *code rate* LDPC codes DVB-T2. LDPC codes diharapkan dapat sesuai dengan *channel model* Indonesia, sehingga dapat bekerja secara optimal.

1.4 Batasan Masalah

Tugas Akhir ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Menguji kinerja LDPC codes DVB-T2 menggunakan *code rate* $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{4}{5}$, dan $\frac{5}{6}$.
2. Simulasi menggunakan AWGN channel dan *frequency selective fading channel*.
3. Untuk simplifikasi penelitian, maka penulis menggunakan modulasi *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK).

1.5 Metodologi Penelitian

Tugas Akhir ini menerapkan metodologi penelitian sebagai berikut:

a. Studi Literatur

Tahap ini melakukan pengumpulan informasi, menganalisis, dan mengidentifikasi tentang LDPC codes secara umum dan LDPC codes DVB-T2 dari berbagai literatur. Literatur yang menjadi rujukan adalah *text book*, *thesis*, buku disertasi, standar DVB-T2, dan jurnal atau *paper conference* internasional yang dipublikasikan *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

b. Simulasi pada AWGN Channel dan *Frequency Selective Fading Channel*

Tahap ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja LDPC codes DVB-T2 menggunakan *channel model* Indonesia.

c. Perancangan Struktur

Tahap ini melakukan perancangan struktur LDPC codes berdasarkan hasil yang didapat pada tahap (b), jika hasil sudah sesuai, maka perancangan struktur *code* yang baru menjadi minimal. Apabila hasil kurang bagus, maka perancangan struktur akan cukup banyak.

d. Analisis EXIT Chart

Tahap ini menganalisis struktur dan *code rate* dari LDPC codes DVB-T2 untuk menghasilkan kurva EXIT chart yang tidak berpotongan untuk mengetahui kinerja yang paling baik.

e. Studi Analisis

Tahap ini menganalisis hasil simulasi dari semua *code rate* LDPC codes DVB-T2 pada tahap sebelumnya. Analisis dilakukan terhadap EXIT chart, dan *Bit Error Rate* (BER) *performance* di AWGN channel dan *frequency-selective fading channel*

f. Penarikan Kesimpulan

Tahap ini menarik kesimpulan dari seluruh hasil evaluasi dan usulan untuk LDPC *codes* pada DVB-T2.

1.6 Jadwal Pelaksanaan

Rencana jadwal penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

Tabel 1.1 Jadwal penelitian

No.	Deskripsi Tahapan	Durasi	Tanggal Selesai	Milestone
1	Studi struktur LDPC <i>codes</i>	2 minggu	20-5-2019	Perbedaan LDPC <i>codes</i> umum dan LDPC <i>codes</i> DVB-T2 didapat.
2	Simulasi pada AWGN <i>channel</i> dan <i>frequency selective fading channel</i>	3 minggu	10-6-2019	Gap kurang dari 1 dB dengan <i>Shannon-Limit</i> .
3	Perancangan struktur	4 minggu	8-7-2019	Struktur LDPC <i>codes</i> DVB-T2.
4	Analisis EXIT <i>chart</i>	3 minggu	29-7-2019	Gap terkecil dan tidak saling berpotongan.
5	Analisis	6 minggu	9-9-2019	Menentukan perlunya modifikasi dan melakukan modifikasi.
6	Penyusunan buku TA	2 minggu	23-9-2019	Buku TA selesai.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk selanjutnya, Proposal Tugas Akhir ini ditulis dengan sistematika sebagai berikut:

- BAB 2 KONSEP DASAR

Bab ini menjelaskan teori dan dasar LDPC *codes*, DVB-T2, dan pendukung penelitian Tugas Akhir ini.

- **BAB 3 SKENARIO PENGUJIAN DAN MODEL SISTEM**

Bab ini menjelaskan model sistem mulai dari *transmitter*, model kanal, hingga *receiver*, juga posisi LDPC *codes* dalam sistem tersebut.

BAB II

KONSEP DASAR

Bab ini membahas tentang beberapa konsep dan teori yang mendasari penelitian Tugas Akhir yang meliputi tentang LDPC *codes*, standar LDPC *codes* DVB-T2, pemodelan kanal yang digunakan, EXIT *chart*, dan BER.

2.1 *Low Density Parity Check (LDPC) Codes*

LDPC *codes* atau dapat disebut juga *Gallager's codes* diusulkan pada tahun 1962 oleh Robert Gallager [6]. LDPC *codes* merupakan sebuah *channel coding* untuk melakukan *error correction* yang menggunakan pengkodean dengan menggunakan matriks generator berukuran besar yang jumlah elemen "1" lebih sedikit dibandingkan elemen "0", sehingga disebut *low-density codes* [7]. Elemen "1" menunjukkan hubungan antara bit masukan dengan bit keluaran dari LDPC *codes*. MacKay merupakan salah satu peneliti yang telah menunjukkan bahwa LDPC *codes* memiliki kinerja yang mendekati kapasitas Shannon [8–10].

Generator matriks LDPC *codes* (G) berfungsi sebagai pembentuk *codeword* dari bit informasi di sisi pengirim dan matriks *parity check* (H) untuk mengembalikan *codeword* menjadi bit informasi. Keduanya harus memiliki persamaan seperti berikut

$$GH^T = 0, \quad (2.1)$$

jika persamaan tersebut tidak terpenuhi, LDPC *codes* tidak dapat mendeteksi dan mengoreksi *error* pada *codeword*. Bentuk matriks *parity check* dari LDPC *codes* disesuaikan dengan panjang blok (N), dimensi (K), redundansi (M), *degree variable node* (d_v), dan *degree check node* (d_c) dengan rumus

$$M = N - K, \quad (2.2)$$

maka matriks dari *parity check* LDPC *codes* memiliki dimensi $M \times N$. *Variable node* digunakan untuk mendeskripsikan setiap kolom dan *check node* untuk setiap baris dari matriks LDPC *codes*.

Panjang Blok (N)

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad d_c = 6$$

$d_v = 3$

Gambar 2.1 Matriks *parity check* dari *regular LDPC codes* (3,6).

Panjang Blok (N)

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad d_c = 3$$

$d_v = 3 \quad d_v = 2 \quad d_v = 1$

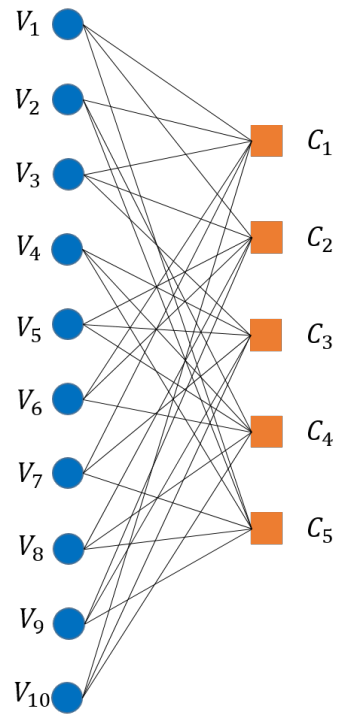
Gambar 2.2 Matriks *parity check* dari *irregular LDPC codes*.

2.1.1 Tanner Graph

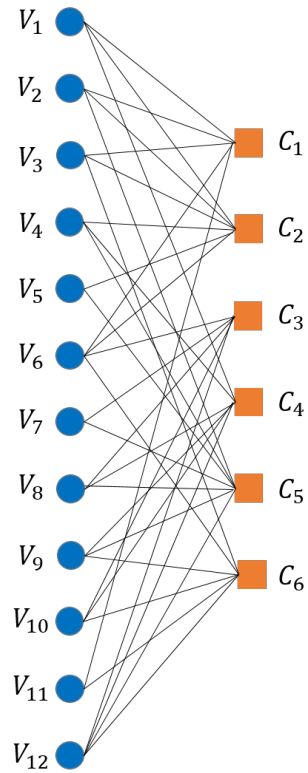
Tanner Graph merupakan grafik bipartit yang digunakan untuk menyatakan batasan atau persamaan dari sebuah *error corecting codes* [11]. Matriks *parity check* dari *LDPC codes* dapat direpresentasikan dalam bentuk graf yaitu *Tanner Graph* yang terdiri dari beberapa set *node*. *Tanner Graph* memiliki sebuah garis yang menghubungkan antara *variable node* dan *check node*, jika dan hanya jika *variable node* memiliki hubungan dengan *check node*. Gambar 2.3 merupakan *Tanner Graph* dari matriks *parity check* Gambar 2.1 dan Gambar 2.4 merupakan bentuk *Tanner Graph irregular LDPC codes* yang memiliki distribusi *variable node degree* (VND) ($\lambda(x)$) dan *check node degree* (CND) ($\rho(x)$) sebagai berikut:

$$\lambda(x) = \frac{3}{12}x^2 + \frac{7}{12}x^3 + \frac{1}{12}x^4 + \frac{1}{12}x^5, \quad (2.3)$$

$$\rho(x) = \frac{1}{6}x^4 + \frac{2}{6}x^5 + \frac{1}{6}x^6 + \frac{2}{6}x^7. \quad (2.4)$$



Gambar 2.3 *Tanner Graph parity check dari regular LPDC codes dengan $d_v = 3$ dan $d_c = 6$.*



Gambar 2.4 *Tanner Graph parity check dari irregular LDPC codes.*

2.1.2 Regular LDPC Codes

Regular LDPC codes merupakan struktur LDPC codes yang memiliki nilai *degree variable node* (d_v) atau banyaknya nilai "1" di setiap kolomnya sama dan nilai *degree check node* (d_c) atau banyaknya nilai "1" di setiap barisnya sama. Gambar 2.1 merupakan contoh matriks dari *regular LDPC codes* yang memiliki nilai N sama dengan 10, d_v sama dengan 3, dan d_c sama dengan 6. Nilai *code rate regular LDPC codes* dapat diketahui dengan

$$R = 1 - \frac{d_v}{d_c}. \quad (2.5)$$

2.1.3 Irregular LDPC Codes

Irregular LDPC codes merupakan jenis struktur dari LDPC codes yang memiliki nilai *degree variable node* dan *degree check node* yang tidak sama di setiap baris dan kolomnya, dari segi kinerja *irregular LDPC codes* dapat mengungguli *regular LDPC codes* [12]. Hal ini dikarenakan, nilai *girth* dari *irregular LDPC codes* cenderung lebih besar dari *regular LDPC codes*. *Irregular LDPC codes* memiliki persamaan untuk distribusi VND ($\lambda(x)$) dan distribusi CND ($\rho(x)$), sebagai berikut:

$$\lambda(x) = \sum_{i=2}^{d_v} \lambda_i x^{i-1}, \quad (2.6)$$

$$\rho(x) = \sum_{i=2}^{d_c} \rho_i x^{i-1}, \quad (2.7)$$

dengan asumsi semua persamaan $\lambda(x)$ dan $\rho(x)$ bersifat saling independen linier, maka *code rate* (R) dari *irregular LDPC codes* adalah

$$R(\lambda, \rho) = 1 - \frac{\int_0^1 \rho(x) dx}{\int_0^1 \lambda(x) dx}. \quad (2.8)$$

2.1.4 Quasi-Cyclic (QC) LDPC Codes

QC-LDPC codes adalah *channel coding* yang memiliki kompleksitas rendah dengan menggunakan struktur dari LDPC codes [13]. QC-LDPC codes memiliki struktur yang terbentuk dari pergeseran sirkular sehingga satu *codeword* yang akan menghasilkan *codeword* lain. Struktur tersebut membuat QC-LDPC codes memerlukan memori yang lebih sedikit dibandingkan dengan LDPC codes konvensional dan ini merupakan salah satu kelebihan QC-LDPC codes [14]. Susunan matriks generator dari QC-LDPC codes berbeda dengan LDPC codes karena QC-LDPC

codes memiliki matriks yang sirkular. QC-LDPC *codes* memiliki H_Q yang terdiri dari beberapa matriks *binary polinomial* yaitu

$$H_Q(\lambda_{I,J}) = \begin{bmatrix} \lambda_{0,0}(U) & \lambda_{0,1}(U) & \cdots & \lambda_{0,J-1}(U) \\ \lambda_{1,0}(U) & \lambda_{1,1}(U) & \cdots & \lambda_{1,J-1}(U) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{I-1,0}(U) & \lambda_{I-1,1}(U) & \cdots & \lambda_{I-1,J-1}(U) \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

dengan nilai $I = \{0, 1, 2, \dots, I-1\}$ adalah jumlah elemen baris dan $J = \{0, 1, 2, \dots, J-1\}$ adalah elemen kolom matriks H_Q . Setiap matriks *binary polinomial* $\lambda_{I,J}(U)$ terdiri atas $Z \times Z$ matriks *polinomial circular* yaitu

$$\lambda_{I,J}(U) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_{z-1} & a_z \\ a_z & a_1 & \cdots & a_{z-2} & a_{z-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_2 & a_3 & \cdots & a_z & a_1 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

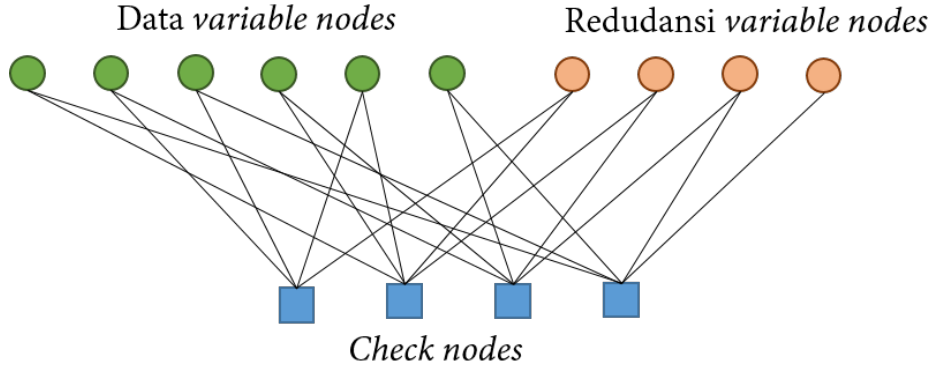
2.1.5 LDPC Staircase Codes

LDPC *Staircase codes* merupakan LDPC *codes* yang menggunakan struktur matriks *lower triangular*. Matriks LDPC *Staircase codes* memiliki bentuk seperti ”tangga” yang terbentuk oleh nilai matriks ”1”, sehingga setiap simbol yang *error* dapat dikoreksi dari nilai jumlah simbol sebelumnya di baris terkait [15].

Matriks *parity check* LDPC *Staircase codes* memiliki bentuk seperti berikut

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{1} & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

Matriks (2.11) dibagi menjadi dua bagian ($H_1 \mid H_2$). H_1 merupakan bagian sebelah kiri matriks H dari kolom 0 ke $K-1$ yang mendefinisikan penempatan simbol dari sumber informasi dalam sebuah persamaan linier. H_2 merupakan bagian sebelah kanan matriks H dari K ke $N-1$ yang mendefinisikan persamaan-persamaan simbol perbaikan pada baris yang berkaitan dan membentuk seperti ”tangga”. Operasi dasar dalam pembentukan matriks *parity check* LDPC *Staircase codes* menggunakan operasi *exclusive or* (XOR). LDPC *Staircase codes* yang memiliki nilai *code*



Gambar 2.5 Tanner Graph dari LDPC Staircase codes dengan $N = 10$, $K = 6$, dan $N_1 = 2$.

rate (R) setiap m baris dari matriks H_1 akan memiliki *degree*

$$d_{R_{H_1}} = \frac{N_1}{\frac{1}{R} - 1}, \quad (2.12)$$

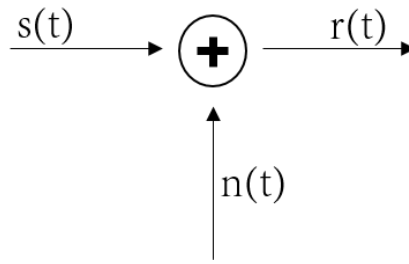
dengan N_1 merupakan jumlah banyaknya nilai elemen "1" di setiap kolom matriks H_1 Matriks (2.11). Akibat dari struktur *staircase* di matriks H_2 , satu baris m dari matriks H akan memiliki *degree*

$$d_r(m) = \begin{cases} d_{r_{H_1}} + 1 & \text{if } m = 1, \\ d_{r_{H_1}} + 2 & \text{if } m > 1. \end{cases} \quad (2.13)$$

Representasi LDPC-Staircase codes dalam bentuk *Tanner Graph* ditunjukkan oleh Gambar 2.5.

2.2 Standar LDPC Codes Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial (DVB-T2)

DVB-T2 merupakan standar untuk penyiaran televisi digital yang telah ditetapkan oleh ETSI. DVB-T2 memiliki kinerja lebih baik daripada generasi sebelumnya yaitu DVB-T. DVB-T2 memiliki banyak perbedaan dengan DVB-T salah satunya adalah FEC DVB-T2 yang menggunakan Bose Chaudhuri Hocquenghem (BCH) codes dan LDPC codes. Dampak penggunaan FEC ini, memberikan keunggulan pada DVB-T2 sehingga memiliki laju data yang lebih cepat 30% daripada DVB-T dan memungkinkan DVB-T2 untuk menggunakan 256-QAM, *Fast Fourier Transform* (FFT) size sebesar 16K dan 32K, serta diagram konstelasi yang berotasi. Akibatnya, memungkinkan untuk mengirimkan kualitas video *High Definition Television Video* (HDTV) [5].



Gambar 2.6 Diagram blok AWGN channel.

LDPC codes merupakan *inner coding* dari FEC DVB-T2, *code rate* dari LDPC codes yang telah ditentukan oleh standar dari ETSI, yaitu : $\frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}$, atau $\frac{5}{6}$ [5]. *Code rate* sebesar $\frac{1}{2}$ memiliki perlindungan proteksi maksimal dan laju data minimal, sedangkan untuk *code rate* sebesar $\frac{5}{6}$ memiliki perlindungan proteksi minimal dan laju data maksimal. Sesuai standar ETSI, LDPC codes dari DVB-T2 menggunakan struktur *cyclic* di bagian informasi dan struktur *staircase* di bagian *parity*. Untuk panjang blok di LDPC codes dapat menggunakan 16.200 blok (*short frame*) yang akan lebih baik untuk laju data rendah dan 64.800 blok (*long frame*) yang akan lebih baik untuk laju data yang lebih tinggi. Kinerja dari LDPC codes akan dipengaruhi oleh *code rate*, lebar spektrum frekuensi, *Guard Interval* (GI), panjang *frame*, dan parameter transmisi lainnya.

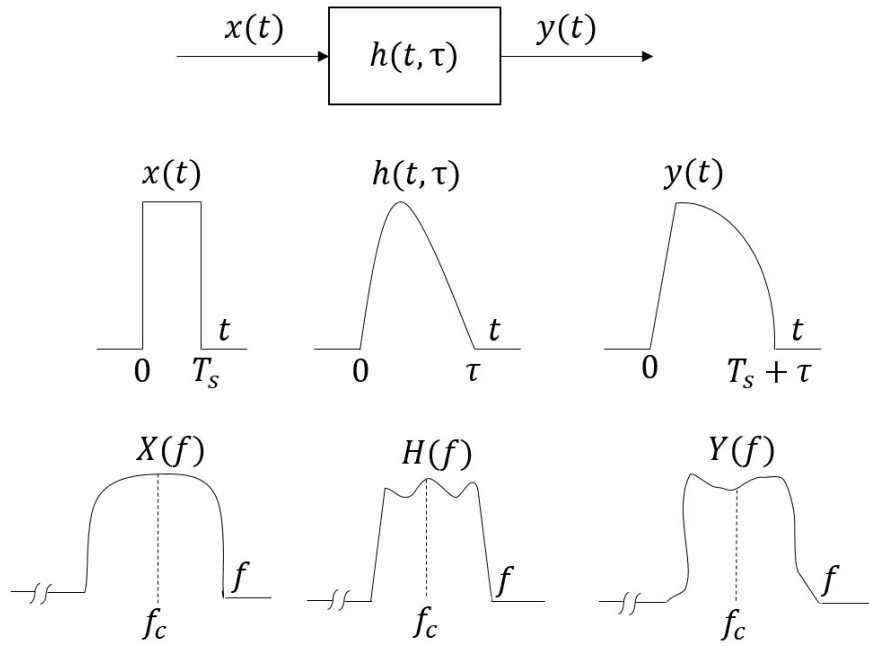
2.3 Pemodelan Kanal

Tugas Akhir ini menggunakan pemodelan kanal radio. Terdapat dua paramater utama dalam pemodelan kanal yang dirancang, yaitu adanya *noise* dan terjadinya *multipath fading*. Sub bab ini akan menjelaskan AWGN channel, *frequency selective fading channel*, *Power Delay Profile* (PDP), dan pemodelan kanal Indonesia.

2.3.1 Additive White Gaussian Noise (AWGN) Channel

AWGN channel adalah kanal paling populer karena dianggap sebagai model yang baik untuk banyak aplikasi. AWGN channel memiliki beberapa karakteristik, antara lain [16]:

1. *Additive*, karena *noise* ditambahkan ke simbol-simbolnya.
2. *White*, memiliki rapat daya yang konstan di setiap frekuensi.
3. *Gaussian*, karena *noise* dari AWGN channel terdistribusi *Gaussian*.



Gambar 2.7 Sistem *frequency selective fading channel*.

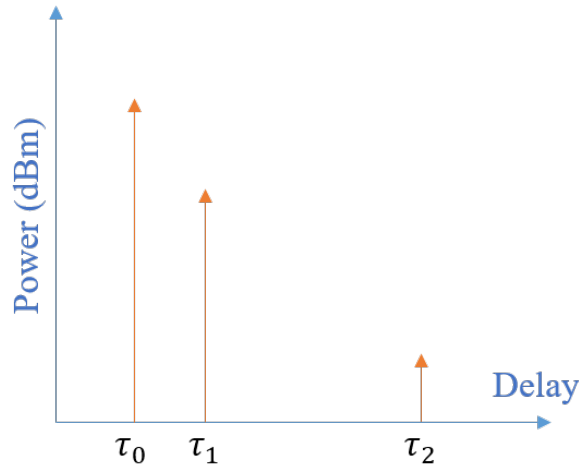
Pemodelan matematika untuk sinyal masukan di *receiver* pada *AWGN channel* berdasarkan Gambar 2.6 adalah

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad (2.14)$$

jika didefinisikan sinyal yang ditransmisikan ($s(t)$), *white Gaussian noise* ($n(t)$) yang disebabkan oleh *noise thermal*, dan sinyal yang diterima ($r(t)$).

2.3.2 *Frequency Selective Fading Channel*

Frequency selective fading channel terjadi ketika amplitudo konstan dan respon fasa linier pada *wireless channel* lebih sempit daripada *bandwidth* sinyal, sehingga amplitudo respon frekuensi dari sinyal yang ditransmisikan menjadi bervariasi terhadap frekuensi [17]. Gambar 2.7 menunjukkan karakteristik dari *frequency selective fading channel* dan ilustrasi di *domain* waktu dan frekuensi. *Frequency selective fading channel* merupakan sebuah *wideband channel* dengan kondisi kanal (τ) lebih besar dari pada periode simbol sinyal yang ditransmisikan (T_s) atau jika *maximum excess delay* (T_m) lebih besar daripada (T_s) [18]. Sehingga dapat disimpulkan



Gambar 2.8 Channel impulse response di kanal broadband.

sinyal dipengaruhi oleh *frequency selective fading channel* jika:

$$\begin{aligned} B_s &\geq B_c, \\ T_s &\leq \sigma_\tau, \\ T_s &\leq T_m. \end{aligned} \tag{2.15}$$

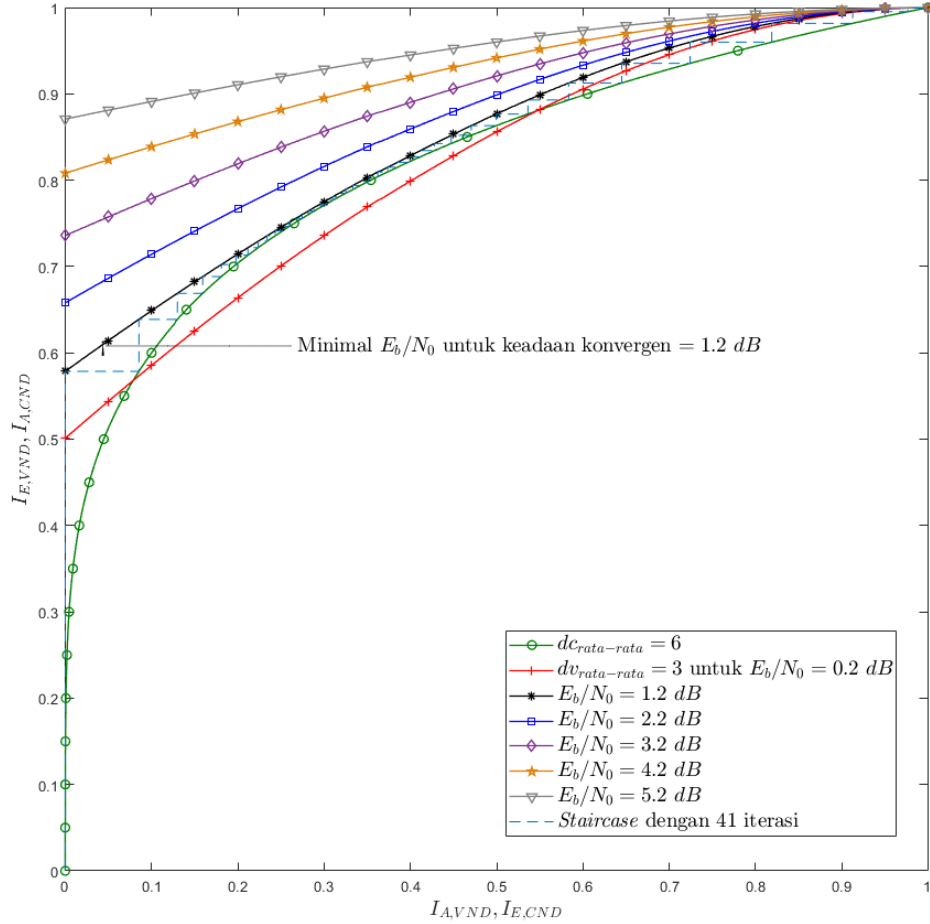
Oleh karena itu, sebuah kanal dianggap *frequency selective fading channel* ketika $\sigma_\tau = 0.1T_s$.

2.3.3 Power Delay Profile (PDP)

PDP atau *multipath intensity profile* ($A_c(\tau)$) adalah daya di *receiver* yang telah dipengaruhi oleh *delay* dan perubahan fasa akibat dari *multipath channel* [19]. *Multipath channel* menyebabkan adanya *Inter-Symbol Interference* (ISI) yang dihasilkan dari pengaruh lingkungan jalur rambat antara pemancar dan penerima. PDP digambarkan dalam grafik daya sinyal untuk setiap *multipath* tergantung dari setiap *propagation delays*-nya. Gambar 2.8 menunjukkan daya sinyal yang diterima di *receiver* memiliki nilai berbeda dalam sebuah *multipath channel* dengan *propagation delays* (τ_0, τ_1, τ_2).

2.3.4 Pemodelan Kanal Indonesia

Model kanal Indonesia didapatkan melalui pengujian kondisi parameter lingkungan Indonesia. Untuk studi awal, representasi dari Indonesia menggunakan parameter lingkungan dari Kota Bandung [20]. Keakuratan kanal model Indonesia bisa ditingkatkan dengan menambah sampel dari berbagai kota di Indonesia. Pa-

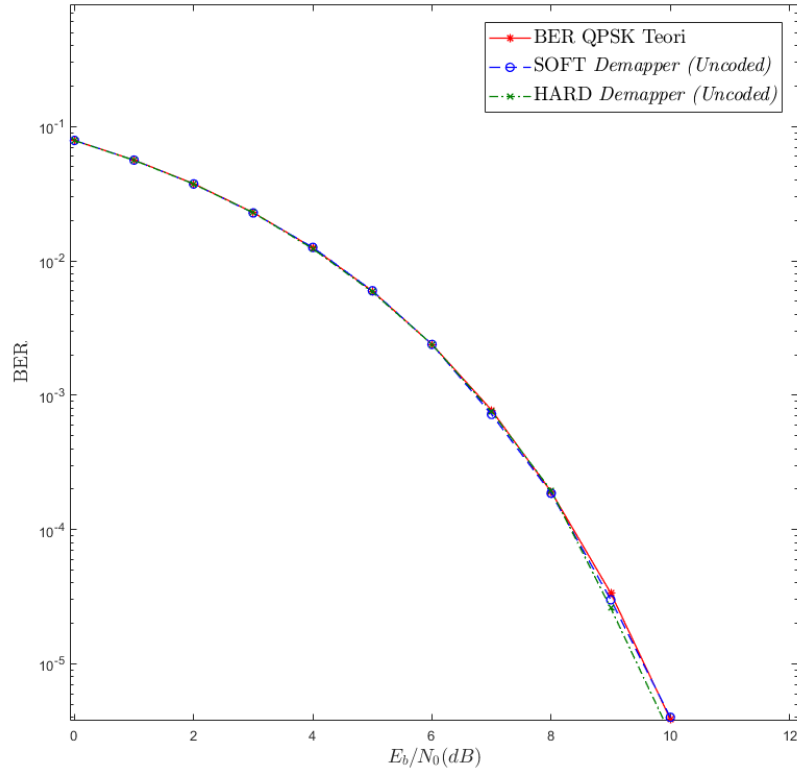


Gambar 2.9 EXIT chart LDPC codes $d_v = 3$ dan $d_c = 6$.

parameter lingkungan seperti tekanan udara, kelembapan, dan suhu yang didapat dari Badan Meteorologi Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Pemodelan kanal dapat menggunakan *software New York University Wireless Simulator (NYUSIM)* dengan parameter dari data rata-rata harian sehingga diharapkan dapat menghasilkan model kanal yang akurat. Kanal model di Kota Bandung dapat direpresentasikan sebagai *multipath fading channel* yang memiliki 18 *paths* dengan *delay interval* 10 ns dan *outage performance* Kota Bandung yang telah divalidasi secara teori. Hasil dari pemodelan kanal Indonesia yang terkhusus di Kota Bandung telah dibuktikan akan memiliki kinerja yang lebih baik dengan menggunakan *channel coding LDPC codes* atau *Polar codes* [20].

2.4 Extrinsic Information Transfer (EXIT) Chart

EXIT chart pertama diperkenalkan oleh Stephan ten Brink untuk menganalisis informasi timbal balik di *decoder* dengan menggunakan proses *iterative* dan untuk mengetahui jumlah iterasi yang diperlukan agar *decoding* sukses [21]. Proses dari



Gambar 2.10 Nilai *Uncoded* BER QPSK pada AWGN channel.

transfer informasi direpresentasikan dalam bentuk grafik. Informasi yang masuk *decoder* atau belum di-*decode* disebut *priori mutual information* (I_A), sedangkan informasi yang keluar dari *decoder* atau telah di-*decode* disebut *extrinsic mutual information* (I_E). EXIT chart menganalisis menggunakan dua *decoder* dan keluaran *decoder* pertama adalah masukan *decoder* kedua. Lalu di iterasi kedua, keluaran *decoder* kedua menjadi masukan *decoder* pertama dan begitu seterusnya. EXIT chart direpresentasikan menggunakan grafik dengan mem-*plot* kinerja kedua *decoder* dengan sumbu yang saling berlawanan. Kurva yang dihasilkan menggunakan fungsi *staircase* yang dimulai dari titik (0,0) ketika tidak ada informasi timbal balik dan *decoding* berhasil ketika mencapai titik (1,1).

2.5 Bit Error Rate (BER)

Saat ini, segala komunikasi telah beralih ke bentuk komunikasi digital. Salah satu parameter pengukuran kinerja dari komunikasi digital menggunakan BER. Nilai BER didapat dari membandingkan bit yang diterima dengan bit yang ditransmisikan di sebuah sistem elektronika, antenna, dan *signal path* [22]. Untuk di AWGN channel, BER adalah kinerja yang dipengaruhi langsung oleh *noise channel* dan untuk di *fading channel* BER akan menjadi lebih buruk [23]. Persamaan sederhana

BER adalah

$$BER = \frac{\text{jumlah error}}{\text{total bit yang dikirimkan}}. \quad (2.16)$$

Noise merupakan parameter yang mempengaruhi terjadinya BER, contoh penyebab terjadinya *noise* adalah *fading* dan pengaruh suhu alat. Pada AWGN *channel*, *noise* direpresentasikan dalam bentuk distribusi *Gaussian*, sedangkan pada *fading channel*, *noise* direpresentasikan dalam distribusi *Rayleigh* atau *Ricean*. Berdasarkan dari fasa dan frekuensi pembawa, BER dapat didefinisikan sebagai berikut

$$P_b = \frac{2(1 - \frac{1}{L})}{\log_2 L} Q \left[\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1} \right) \frac{2E_b}{N_o}} \right], \quad (2.17)$$

dengan nilai L adalah jumlah *level* di setiap dimensi dari M -ary sistem modulasi, E_b adalah energi setiap bit, dan $\frac{N_0}{2}$ adalah rapat daya *noise*.

BAB III

SKENARIO PENGUJIAN DAN MODEL SISTEM

Bab ini menjelaskan diagram alir dan model sistem mulai dari *transmitter*, model kanal, hingga *receiver*, juga posisi LDPC codes dalam sistem tersebut.

3.1 Struktur LDPC Codes Standar DVB-T2

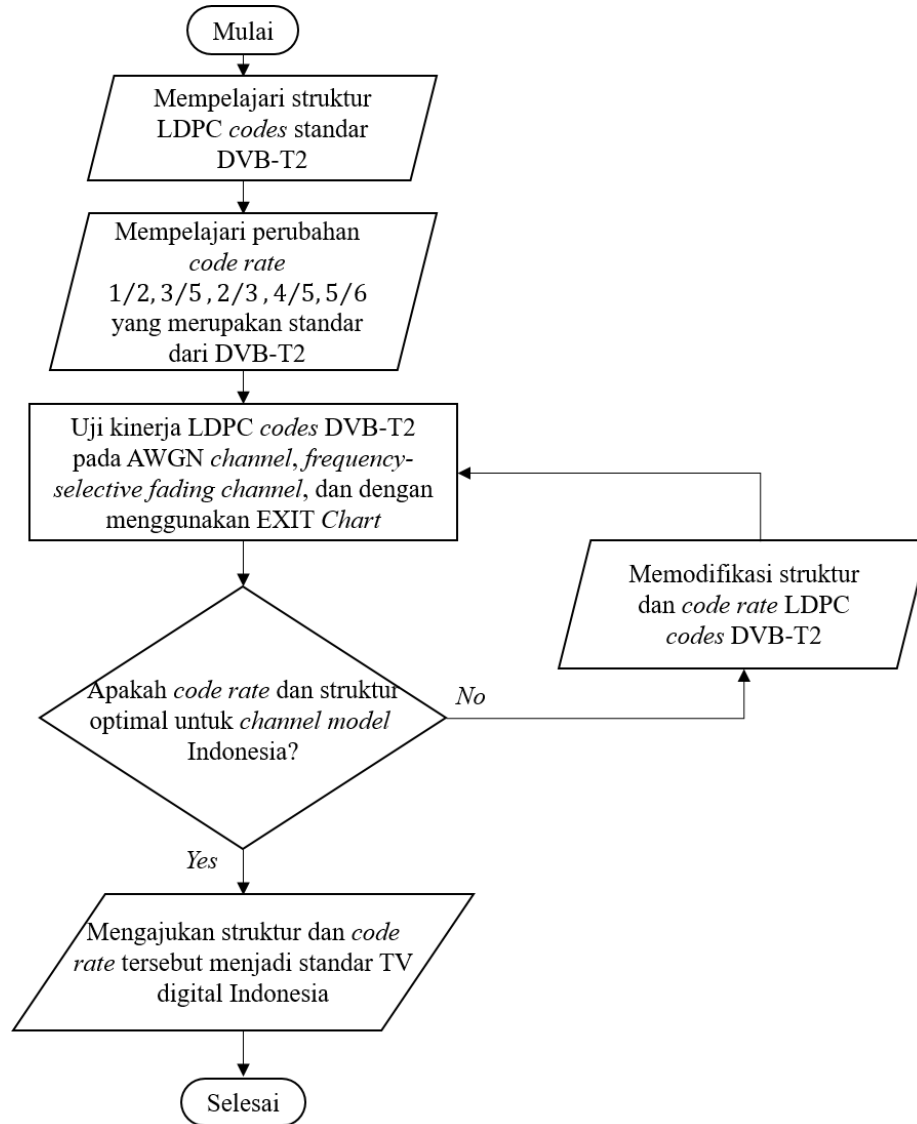
Sesuai standar, DVB-T2 memiliki dua *channel coding*. LDPC codes adalah salah satu *channel coding* yang digunakan sebagai *inner codes* dalam FEC DVB-T2. LDPC codes DVB-T2 merupakan *irregular LDPC codes*. DVB-T2 memiliki panjang blok 16200 dan 64800. DVB-T2 memiliki *parity check* yang pada bagian informasi menggunakan *cyclic structure* dan di bagian *parity*-nya menggunakan *staircase structure*.

3.2 Pengaruh Code Rate LDPC Codes DVB-T2 terhadap Kinerja DVB-T2

DVB-T2 dapat memiliki nilai *code rate*: $\frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}$, atau $\frac{5}{6}$. Nilai-nilai *code rate* tersebut telah ditetapkan oleh standar TS 102.831. Setiap nilai *code rate* akan mempengaruhi bentuk dari LDPC codes. Nilai *code rate* terkecil atau $\frac{1}{2}$ memiliki perlindungan proteksi maksimal dan laju data minimal, sedangkan untuk *code rate* terbesar atau $\frac{5}{6}$ memiliki perlindungan proteksi minimal dan laju data maksimal. Dapat diketahui bahwa jika kanal sempurna, maka semakin besar nilai *code rate* akan memiliki laju data yang semakin cepat. Nilai *code rate* sendiri didapatkan dari perbandingan matriks bagian informasi dengan total matriks, sehingga nilai *code rate* akan mempengaruhi matriks LDPC codes. Matriks LDPC codes terdiri dari bagian informasi dan *parity*, besar keduanya dipengaruhi oleh nilai *code rate* dari LDPC codes.

3.3 Pengujian Kinerja LDPC Codes

LDPC codes akan diuji pada AWGN channel dan *frequency selective fading channel* dengan menggunakan modulasi QPSK.



Gambar 3.1 Diagram alir sistem pengujian.

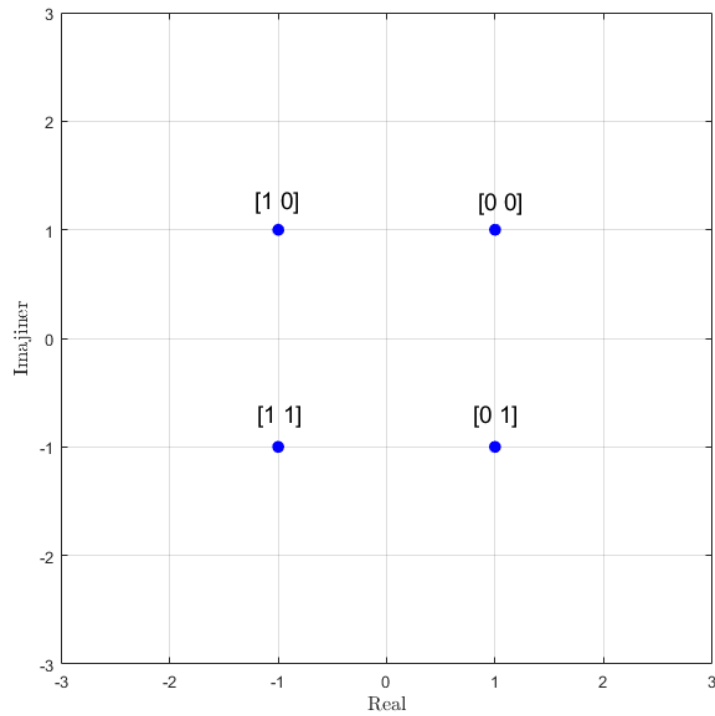
3.3.1 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

Dalam standar, DVB-T2 dapat menggunakan modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, ataupun 256-QAM. Dalam Tugas Akhir ini DVB-T2 menggunakan modulasi QPSK. QPSK memiliki empat kemungkinan simbol. Setiap simbolnya akan membawa dua bit. Setiap fasa dari QPSK memiliki empat kemungkinan dengan nilai

$$\varphi(t) = (2i - 1) \frac{\pi}{4} \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (3.1)$$

maka setiap simbolnya memiliki persamaan sebagai berikut:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[(2i - 1) \frac{\pi}{4} \right] \cos [2\pi f_c t] - \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin \left[(2i - 1) \frac{\pi}{4} \right] \sin [2\pi f_c t], \quad (3.2)$$



Gambar 3.2 Diagram konstelasi QPSK.

dengan $0 \leq t \leq T$ dan $i = \{1 \dots 4\}$. Setiap simbol memiliki nilai fasa yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Pemetaan simbol QPSK.

Bit informasi	Simbol QPSK
00	$\frac{\pi}{4}$
10	$\frac{3\pi}{4}$
11	$\frac{5\pi}{4}$
01	$\frac{7\pi}{4}$

3.3.2 AWGN Channel

Proses transmisi pada AWGN *channel* akan disimulasikan dengan menggunakan aplikasi MATLAB. Densitas spektral daya AWGN *channel* sama rata untuk semua frekuensi. Sumber *noise* pada AWGN *channel* berupa *noise thermal* yang diakibatkan oleh kondisi panas komponen elektronik di *receiver*. Sinyal yang diterima dalam aplikasi MATLAB didefinisikan sebagai

$$r_x = h \cdot t_x + n, \quad (3.3)$$

dengan r_x merupakan sinyal yang diterima oleh *receiver*, $h = 1$ untuk *AWGN channel*, t_x merupakan sinyal yang dikirimkan dari *transmitter*, dan n adalah vektor *noise* yang memiliki distribusi Gaussian dengan standar deviasi σ . Probabilitas fungsi densitasnya

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-m}{2\sigma^2}\right). \quad (3.4)$$

3.3.3 Frequency Selective Fading Channel

Tugas Akhir ini mengasumsikan komunikasi nirkabel TV digital dengan transmisi *broadband*, maka dari itu *frequency selective fading channel* diajukan sebagai pemodelan kanalnya. *Frequency selective fading channel* adalah kondisi saat *bandwidth* kanal lebih kecil daripada *bandwidth* sinyal transmisi, akibatnya kanal akan menghasilkan *multipath* dan ISI. Model matematika *frequency selective fading channel*

$$Y(f) = X(f)H(f) + N(f), \quad (3.5)$$

dengan $X(f)$ didefinisikan sebagai sinyal yang dikirimkan dalam *domain* frekuensi, $H(f)$ sebagai respon frekuensi dari kanal, $N(f)$ sebagai *noise thermal* yang terdistribusi Gaussian, dan $Y(f)$ sebagai sinyal diterima dalam *domain* frekuensi.

3.4 Soft Decoding

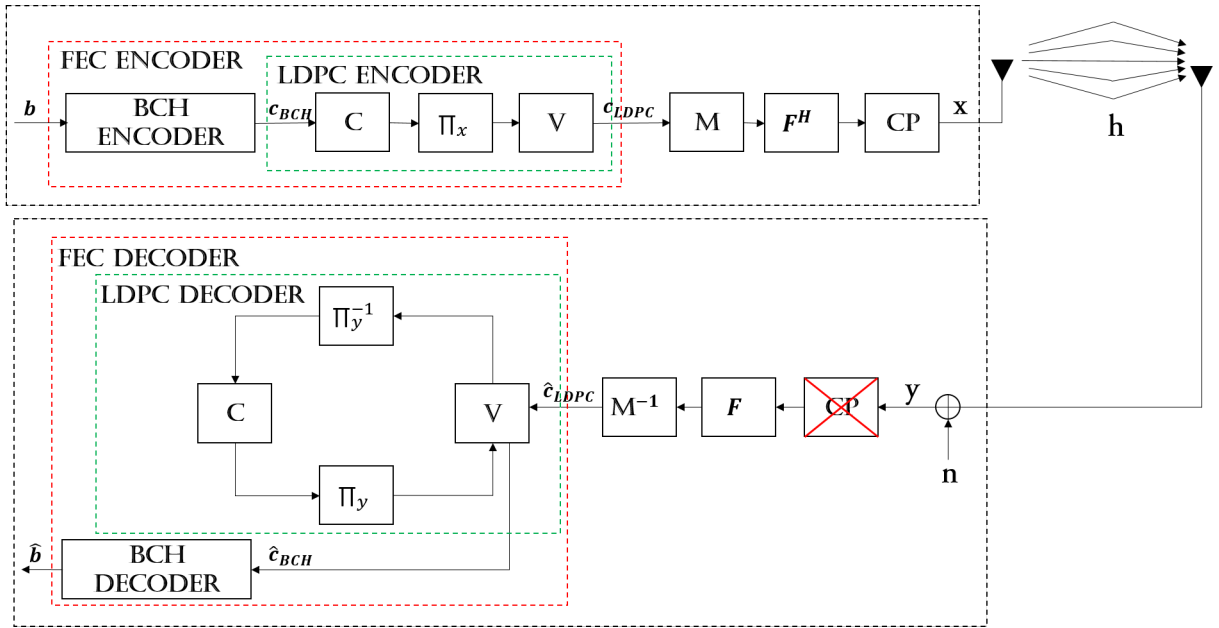
Soft decoding menggunakan *Log-Likelihood Ratio* (LLR), LLR merupakan pengukuran statistik untuk membandingkan dua model statistik. LLR membandingkan antar probabilitas pada $p(v) = 0$ dan $p(v) = 1$. LLR pada sinyal terima y dapat dihitung dengan

$$\begin{aligned} LLR &= \log \frac{P(y | x = +1)}{P(y | x = -1)}, \\ LLR &= \frac{2}{\sigma^2} \cdot y, \end{aligned} \quad (3.6)$$

dengan σ adalah variansi untuk *double-sided noise* dengan distribusi Gaussian.

3.5 Skenario Pengujian Kinerja LDPC Codes DVB-T2

Setiap LDPC *codes* yang terbentuk dari setiap nilai *code rate* akan diuji kinerja BER-nya dan akan dioptimalisasi dengan EXIT *chart* untuk mendapatkan *code rate* dan struktur LDPC *codes* sehingga dapat bekerja optimal di *channel model* Indonesia. Apabila kinerja LDPC *codes* dari standar DVB-T2 memiliki kinerja optimal di



Gambar 3.3 Diagram blok sistem transmisi DVB-T2.

channel model Indonesia, maka struktur dan *code rate* yang didapat akan diajukan menjadi standar TV digital Indonesia. Namun, apabila LDPC *codes* dari standar DVB-T2 memiliki kinerja yang tidak optimal di *channel model* Indonesia, maka langkah selanjutnya perlu memodifikasi struktur dan *code rate* LDPC *codes* DVB-T2 sehingga dapat bekerja dengan baik dan optimal di *channel model* Indonesia.

3.6 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem pada Gambar 3.3 menunjukkan sistem DVB-T2 dari pengirim (Tx) hingga ke penerima (Rx) yang berfungsi untuk mempermudah dalam menjelaskan alur komunikasi data DVB-T2. Dimulai dari sisi pengirim, bit informasi b dibangkitkan secara acak dengan probabilitas kemunculan bit 0 dan 1 sama. Bit yang telah dibangkitkan kemudian masuk ke FEC *encoder*, b yang masuk ke BCH *encoder* merupakan *outer code* FEC DVB-T2. Setelah itu dari proses BCH *encoder* menghasilkan *codeword* BCH (c_{BCH}) dan akan masuk ke LDPC *encoder* yang merupakan *inner code* FEC DVB-T2. Bit akan di-*encode* oleh Blok C ke Blok V dengan Blok Π_x sehingga menghasilkan *codeword* (c_{LDPC}). Blok C merupakan deretan CND dan Blok V merupakan deretan VND. Blok *Bit Interleaver* (Π_x) mengatur ulang bit sehingga hasil keluaran dapat dibaca dalam siklus bolak-balik. Kemudian, hasil keluaran dipetakan ke modulasi QPSK yang ditunjukkan dengan Blok M sehingga menghasilkan data berupa simbol per-bit. Simbol akan dikirimkan dengan mode transmisi *orthogonal multi-carrier* yang selanjutnya simbol akan di-

transformasikan dari *domain* frekuensi ke domain waktu pada Blok FFT (F^H). Blok F^H juga berfungsi sebagai *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) *baseband modulator* yang akan memodulasi frekuensi *subcarrier* untuk setiap simbol yang dibangkitkan pada blok ini. Simbol akan ditambahkan *Cyclic Prefix* (CP) untuk mempertahankan properti ortogonalitas sinyal dan mencegah terjadinya ISI dan *Inter Carrier Interference* (ICI). Berikutnya, data akan dikirimkan melalui antena dan melewati kanal *multipath*.

Sinyal terima berupa data yang telah terpengaruhi oleh *multipath channel* dan *noise*. Kemudian, CP pada sinyal OFDM yang diterima akan dihilangkan dan sinyal terima akan ditransformasikan kembali dari *domain* waktu ke *domain* frekuensi di Blok F . Lalu, sinyal terima dikembalikan menjadi bit-bit data pada Blok *Demodulator* (M^{-1}) menjadi bit \hat{c}_{LDPC} . Bit \hat{c}_{LDPC} akan di-*decode* oleh LDPC decoder di bagian FEC decoder. Proses *iterative decoding* di LDPC decoder dilakukan oleh Blok V , Blok Bit *Deinterleaver* (Π_y^{-1}), Blok C , dan Blok Π_y . Pada Blok V LLR diproses dengan persamaan

$$L_{E_{v_i}}(n) = L_{ch} + \sum_{j=1, j \neq i}^{d_{v_n}} L_{A_{v_j}}, \quad (3.7)$$

dan pada Blok C

$$L_{E_{c_j}}(k) = \sum_{i=1, i \neq j}^{d_{c_k}} \boxplus L_{A_{c_i}}, \quad (3.8)$$

dengan $\Lambda(\theta_1) \boxplus \Lambda(\theta_2)$ adalah

$$\Lambda(\theta_1) \boxplus \Lambda(\theta_2) = \ln \frac{e^{\Lambda(\theta_1)} + e^{\Lambda(\theta_2)}}{1 + e^{\Lambda(\theta_1)} e^{\Lambda(\theta_2)}}, \quad (3.9)$$

$$\approx (-1) \text{sgn} \{ \Lambda(\theta_1) \} \text{sgn} \{ \Lambda(\theta_2) \} \cdot \min \{ |\Lambda(\theta_1)|, |\Lambda(\theta_2)| \}. \quad (3.10)$$

Setelah proses LDPC *decoding* yang menghasilkan *codeword* BCH codes (\hat{c}_{BCH}), \hat{c}_{BCH} akan masuk ke BCH decoder untuk menghasilkan bit informasi (\hat{b}). Bit informasi yang diterima akan dibandingkan dengan bit kirim untuk dianalisis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Menteri Komunikasi dan Informatika, “Peraturan Menteri Kominfo Nomor: 07/P/M.KOMINFO/3/2007,” March 2007.
- [2] ITU-R, “Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2,” ITU-R, Geneva, Tech. Rep., March 2015.
- [3] Menteri Komunikasi dan Informatika, “Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Nomor: 05/PER/M.KOMINFO/2/2012,” Februari 2012.
- [4] ETSI, *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation Guidelines for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2)*, 1st ed., August 2012.
- [5] ETSI, *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame Structure Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2)*, 1st ed., ETSI, July 2015.
- [6] R. G. Gallager, “Low-Density Parity-Check Codes,” in *IRE Trans. on Info. Theory*, vol. IT-8, January 1962, pp. 21–28.
- [7] C. Zhang, Z. Wang, and X. You, “Efficient Decoder Architecture for Single Block-Row Quasi-Cyclic LDPC Codes,” *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 793–797, October 2014.
- [8] R. G. Gallager, “Good Error-Correcting Codes Based on Very Sparse Matrices,” in *IEEE Trans. Znfo. Theory*, vol. 45, no. 2, March 1999, pp. 399–431.
- [9] M. C. Davey and D. J. MacKay, “Low Density Parity Check Codes Over $GF(q)$,” in *ZEEE Com. Letters*, vol. 2, no. 6, June 1998.
- [10] R. G. Gallager, “Near Shannon Limit Performance of Low Density Parity Check Codes,” in *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 6, March 1997, pp. 457–458.
- [11] R. Tanner, “A Recursive Approach to Low Complexity Codes,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 27, no. 5, pp. 533–547, Sep. 1981.
- [12] M. Luby, M. Mitzenmacher, A. Shokrollahi, and D. Spielman, “Improved Low-Density Parity-Check Codes Using Irregular Graphs,” in *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, February 2001, pp. 585–598.

- [13] G. Tzimpragos, C. Kachris, D. Soudris, and I. Tomkos, "A Low-Complexity Implementation of QC-LDPC Encoder in Reconfigurable Logic," September 2013, pp. 1–4.
- [14] M. Mankar, G. Asutkar, and P. Dakhole, "Reduced Complexity Quasi-Cyclic LDPC Encoder for IEEE 802.11n," *International Journal of VLSI Design & Communication Systems*, vol. 7, pp. 33–47, December 2016.
- [15] F. Mattoussi, "Design and Optimization of AL-FEC Codes: The GLDPC-Staircase Codes," Ph.D. dissertation, February 2014.
- [16] H. Harada and R. Prasad, *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., January 2002.
- [17] B. Ahmed and M. Matin, *Coding for MIMO-OFDM in Future Wireless Systems*, May 2015.
- [18] R. Gustafsson and A. Mohammed, "Simulation of Wireless Fading Channels," Department of Telecommunications and Signal Processing Blekinge Institute of Technology, Tech. Rep., February 2003.
- [19] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, June 2005.
- [20] E. M. Alfaro, N. M. Adriansyah, and K. Anwar, "Study on Channel Model for Indonesia 5G Networks," in *2018 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, May 2018, pp. 125–130.
- [21] S. ten Brink, "Convergence Behavior of Iteratively Decoded Parallel Concatenated Codes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 10, pp. 1727–1737, Oct 2001.
- [22] G. Breed, "Bit Error Rate : Fundamental Concepts and Measurement Issues," *High Frequency Electronics*, pp. 46–48, January 2003.
- [23] L. Hanzo, W. Webb, and T. Keller, "Single- and Multi-Carrier Quadrature Amplitude Modulation: Principles and Applications for Personal Communications, WATM and Broadcasting," April 2000.