



PROPOSAL TESIS

ANALISA EFISIENSI SPEKTRUM SISTEM *MULTI USER MASSIVE MIMO* SEL TUNGGAL PADA KANAL *RAYLEIGH* DAN KANAL *RANDOM LINE OF SIGHT*

IKA ROHMATUL AINI
07111750030001

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Puji Handayani, MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN PROPOSAL TESIS

Judul : Analisa Efisiensi Spektrum Sistem *Massive* MIMO Sel Tunggal Pada
Kanal *Rayleigh* dan Kanal *Random Line of Sight*
Oleh : Ika Rohmatul Aini
NRP : 07111750030001

Telah diseminarkan pada

Hari : Selasa
Tanggal : 05 Juni 2018
Tempat : B305

Mengetahui/menyetujui

Dosen Penguji:



1. Dr. Ir. Endroyono, DEA
NIP:196504041991021001



2. Dr. Ir. Titiek Suryani, MT
NIP:196411301989032001



3. Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP:197210012003121002

Calon Dosen Pembimbing



1. Dr. Ir. Puji Handayani, MT.
NIP. 196605101992032002

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISA EFISIENSI SPEKTRUM SISTEM *MULTI USER MASSIVE MIMO* SEL TUNGGAL PADA KANAL *RAYLEIGH* DAN KANAL *RANDOM LINE OF SIGHT*

Nama mahasiswa : Ika Rohmatul AIni
NRP : 07111750030001
Pembimbing : 1. Dr. Ir. Puji Handayani, MT.

ABSTRAK

Teknologi 5G yang sekarang ini sedang dikembangkan bertujuan untuk memenuhi kebutuhan akan kecepatan data tinggi dan kualitas layanan yang lebih baik. Salah satu teknik yang dapat mendukung sistem komunikasi 5G adalah teknik *Massive MIMO*. Dengan menerapkan *Massive MIMO*, sistem komunikasi 5G dapat melayani *user* secara simultan dengan kecepatan data yang tinggi. Teknologi *Massive MIMO* merupakan pengembangan dari teknologi MIMO konvensional dimana sistem *Massive MIMO* menggunakan antena yang sangat banyak di sisi BTS. Dengan menerapkan *Massive MIMO* maka *efisiensi spektrum* dapat meningkat. Agar bisa melayani beberapa *user* pada waktu dan domain frekuensi yang sama, maka teknik ini dikembangkan menjadi *Multi User Massive MIMO*.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa sistem komunikasi *Massive MIMO* sel tunggal skema *downlink* pada model kanal *Rayleigh* dan kanal *random Line of Sight*. Untuk merepresentasikan kondisi kanal yang sesungguhnya, dilakukan proses estimasi *Channel State Information* (CSI) dengan cara mengirimkan *uplink* pilot training. Hasil dari estimasi CSI ini kemudian digunakan untuk membentuk *precoding* di sisi BTS dan *decoding* di sisi *user*. BTS akan mentransmisikan sinyal yang terlebih dahulu sudah dikalikan dengan matriks *precoding*. Kemudian sinyal ini ditransmisikan ke masing-masing *user*. Parameter yang diamanti dari sistem komunikasi *Massive MIMO* ini adalah efisiensi spektrum dengan variasi model kanal.

Kata kunci : *Massive MIMO*, CSI, efisiensi spektrum

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Kontribusi	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kajian Penelitian Terkait	7
2.2 Teori Dasar.....	8
2.2.1 Kebutuhan standar 5G.....	8
2.2.2 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)	9
2.2.3 <i>Orthogonal</i> Frequency Division Multiplexing (OFDM)	10
2.2.4 Multiple Input Multiple <i>Output</i> (MIMO).....	11
2.2.5 Multi <i>User</i> MIMO.....	13
2.2.6 <i>Massive</i> MIMO	13
2.2.7 Kanal Sistem Komunikasi Nirkabel.....	15
2.2.8 Gangguan Kanal Sistem Komunikasi Nirkabel	18
2.2.9 Estimasi <i>Channel State Information</i> (CSI)	19
2.2.10 <i>Zero forcing</i> Linier <i>Precoding</i>	21
2.2.11 <i>Zero forcing</i> Linier <i>Detector</i>	21
2.2.12 Efisiensi spektrum <i>Massive</i> MIMO	22
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Skema Penelitian.....	25
3.2 Model Sistem	27

3.2.1	Pemancar Sistem Komunikasi <i>Massive</i> MIMO	29
3.2.2	Kanal Sistem Komunikasi <i>Massive</i> MIMO.....	31
3.2.3	Penerima sistem Komunikasi <i>Massive</i> MIMO.....	33
3.2.4	Analisa Efisiensi Spektrum Sistem Komunikasi <i>Massive</i> MIMO ..	33
3.3	Parameter Sistem.....	34
BAB 4 RENCANA DAN JADWAL KEGIATAN.....		37
4.1	Kemajuan Penelitian.....	37
4.1.1	Menentukan kosep sistem.....	37
4.1.2	Perancangan parameter sistem	37
4.1.3	Estimasi CSI	38
4.1.4	Efisiensi spektrum <i>Massive</i> MIMO Secara Teori.....	41
4.2	Jadwal Penelitian.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....		45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram konstelasi 4-QAM	9
Gambar 2.2 Ilustrasi sistem komunikasi Multi User MIMO [5].....	11
Gambar 2.3 Konfigurasi <i>Downlink Massive</i> MIMO [15]	14
Gambar 2.4 Alokasi sample pada <i>coherence interval</i>	18
Gambar 3.1 Fishbone penelitian	25
Gambar 3.2 Diagram alur penelitian	26
Gambar 3.3 Diagram alur simulasi sistem	26
Gambar 3.4 Konfigurasi singel cell sistem <i>Massive</i> MIMO.....	27
Gambar 3.5 Diagram blok sistem komunikasi <i>Massive</i> MIMO	28
Gambar 3.6 Blok diagram sistem pemancar	29
Gambar 3.7 Time-frequency domain dari simbol OFDM dengan <i>cyclic prefix</i> ...	29
Gambar 3.8 (a) Struktur simbol OFDM domain waktu (b) Representasi jumlah slot ODFM pada domain waktu dan frekuensi	30
Gambar 3.9 Skenario model kanal <i>frequency selective Rayleigh</i>	31
Gambar 3.10 Skenario model kanal random <i>Line of Sight (LOS)</i>	32
Gambar 3.11 Estimasi CSI pada BTS	32
Gambar 3.12 Blok diagram penerima sistem <i>Massive</i> MIMO	33
Gambar 4.1 Kapasitas total <i>Massive</i> MIMO.....	41
Gambar 4.2 Kapasitas tiap user <i>Massive</i> MIMO	42
Gambar 4.3 Efisiensi spektrum total <i>Massive</i> MIMO	42
Gambar 4.4 Efisiensi spektrum tiap user <i>Massive</i> MIMO.....	43

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter sistem <i>Massive</i> MIMO	34
--	----

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan transmisi data berkecepatan tinggi untuk sistem komunikasi akan selalu meningkat seiring dengan semakin berkembangnya teknologi telekomunikasi dan multimedia. Generasi 5G saat ini sedang dikembangkan untuk bisa mencapai kualitas layanan yang lebih bagus dan kecepatan transfer data yang lebih tinggi dari generasi sebelumnya [1]. *The Next Generation Mobile Network* (NGMN) mendefinisikan sistem 5G harus memenuhi spesifikasi standar, diantaranya adalah dapat mendukung transmisi dengan kecepatan data hingga 100Mb/s untuk area metropolitan, memiliki efisiensi spektrum yang lebih tinggi dibandingkan dengan 4G, dan dapat meningkatkan area pelayanan [1]. Untuk mendukung perkembangan 5G, *Massive MIMO* adalah salah satu teknik yang menjanjikan untuk dikembangkan. Dengan menerapkan *Massive MIMO*, maka teknologi 5G mampu melayani *user* secara simultan dengan gain yang tinggi, sehingga bisa meningkatkan efisiensi spektrum, efisiensi energy dan kehandalan [2].

Beberapa tahun terakhir telah dikembangkan teknologi MIMO, yang mana teknologi ini memiliki performa yang lebih baik dari teknologi SISO. Konsep ini menjadi latar belakang dikembangkannya sistem *Massive MIMO*, yang memungkinkan penggunaan jumlah antena yang lebih banyak sehingga diharapkan dapat menghasilkan performa yang lebih baik. Agar dapat melayani beberapa *user* secara simultan maka digunakan sistem *Multi User Massive MIMO*. *Multi User MIMO* sendiri merupakan sistem yang menggunakan antena array di BTS yang mampu melayani beberapa *user* yang menggunakan antena tunggal atau antena jamak [3]. Sedangkan sistem *Massive MIMO* merupakan sistem yang menggunakan jumlah antena yang sangat banyak di sisi BTS, antena yang digunakan bisa berjumlah ratusan atau bahkan lebih [4].

Beberapa keunggulan dari sistem *Massive MIMO* dibandingkan dengan MIMO konvensional diantaranya adalah, pertama, hanya BTS yang perlu mengestimasi kanal, kedua, jumlah antena BTS jauh lebih banyak daripada

jumlah *user*, dan ketiga, teknik linier *precoding* yang sederhana bisa diterapkan baik di sisi *uplink* dan *downlink* [5]. Untuk menerapkan skema *downlink Massive MIMO* diperlukan estimasi *Channel State Information* (CSI) di sisi BTS dan di sisi *user*. Akan tetapi, estimasi CSI akan sangat kompleks karena sebanding dengan jumlah antena BTS yang sangat banyak, maka beberapa penelitian sebelumnya mengasumsikan *perfect* CSI di sisi BTS maupun *user* [6] [7]. Padahal, untuk kondisi yang sesungguhnya CSI dapat berubah sewaktu-waktu sesuai dengan kondisi lingkungan propagasi, sehingga perlu dilakukan estimasi CSI untuk kanal yang berubah terhadap waktu.

Penelitian lain menganalisa tentang perbandingan kinerja *zero forcing* dan *conjugate beamforming* pada sistem komunikasi *Massive MIMO* menggunakan skenario jumlah antena BTS sebanyak 100 dan 400 antena. Dimana untuk konfigurasi multi *user* dengan kondisi SNR tinggi, *zero forcing* bekerja lebih baik dari *conjugate beamforming*, sedangkan untuk single *user conjugate beamforming* bekerja lebih baik daripada *zero forcing* [8].

Selain itu, kelebihan lain dari sistem *Massive MIMO* adalah memiliki efisiensi spektrum yang tinggi dibandingkan dengan sistem komunikasi MIMO konvensional [2]. Beberapa penelitian sebelumnya telah meneliti tentang efisiensi spektrum dari *Massive MIMO*, diantaranya adalah penelitian efisiensi spektrum *Massive MIMO* dengan skema *uplink* [4] dan juga penelitian tentang efisiensi spektrum *Massive MIMO* skema *downlink*, untuk skema *downlink* ini, sinyal yang dikirim berupa pilot untuk mengestimasi CSI di sisi *user*, sehingga tidak diperlukan teknik khusus untuk proses *decoding* di sisi *user* [9]. Dengan meningkatnya efisiensi spektrum dari *Massive MIMO* untuk multi *user* dengan antena tunggal, maka dikembangkan pula sistem *multi user Massive MIMO* dengan N antena [10]. Dengan memperbanyak jumlah antena di sisi *user* dapat meningkatkan Efisiensi spektrum sistem [10]

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa untuk sel tunggal sistem komunikasi *multi User Massive MIMO* untuk transmisi *downlink*. Dimana sel tunggal ini terdiri dari satu BTS dan beberapa *user*. Analisa didasarkan pada

kondisi yang merepresentasikan adanya perubahan kanal. Pada sistem *Massive MIMO* ini setiap *user* mengirimkan pilot pada kanal *uplink*, kemudian BTS akan mengestimasi CSI untuk setiap *user*. Estimasi CSI ini nantinya akan digunakan untuk proses *precoding* di sisi BTS. Pada sistem ini BTS mentransmisikan data ke masing-masing *user* dengan menggunakan teknik digital beamforming dengan linier *precoding*. Kemudian *user* akan melakukan *decoding* dengan menggunakan teknik *Zero forcing*.

Parameter *output* yang diamati dari sistem ini adalah efisiensi spektrum untuk kanal *Rayleigh* dan kanal random *Line of Sight* (LOS). Efisiensi spektrum merupakan jumlah bit yang dapat ditransmisikan per detik per satuan bandwidth dengan *Bit Error Rate* (BER) sesuai dengan standar yang ditentukan. Pada penelitian ini, standard BER yang digunakan adalah standar untuk transmisi video streaming yaitu BER kurang dari 10^{-4} [11]. Efisiensi spektrum dihitung dengan mencari *trace* maksimum dari *covariance* bit-bit hasil estimasi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tahapan membangun sistem komunikasi *Massive MIMO* dengan menggunakan blok-blok dasar sistem komunikasi pada kanal Rayleigh dan kanal Random Line of Sight.
2. Metode untuk estimasi *Channel State Information* (CSI) pada sistem komunikasi *Massive MIMO*.
3. Teknik deteksi yang digunakan pada masing-masing *user* untuk untuk multi *user Massive MIMO*.
4. Kinerja sistem *Massive MIMO* yang akan dibangun dengan parameter *output* efisiensi spektrum pada kanal Rayleigh dan kanal Random Line of Sight.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini diantaranya adalah untuk membangun sistem komunikasi *Multi User Massive MIMO* berdasarkan literatur yang ada, dan menganalisa kinerjanya berdasarkan parameter efisiensi spektrum.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem komunikasi ini akan dianalisa untuk sel tunggal transmisi *downlink* yang terdiri dari satu BTS dan beberapa *user* dimana tidak ada interferensi dari cell lain.
2. Jumlah antenna di BTS lebih banyak daripada jumlah user yang dilayani. Masing-masing *user* menggunakan antena tunggal.
3. Model kanal yang digunakan adalah *frequency selective Rayleigh* dan *Line of Sight (LOS)* pada satu interval frekuensi tertentu (*coherence interval*).
4. Untuk kanal *Line of Sight (LOS)* posisi masing-masing *user* sudah diketahui oleh BTS.
5. Pembagian daya untuk masing-masing *user* sama.

1.5 Kontribusi

Hasil dari penelitian ini kedepannya dapat digunakan sebagai acuan untuk merancang sistem komunikasi *Massive MIMO* dalam rangka mendukung pengembangan teknologi 5G. Hasil simulasi yang berupa efisiensi spektrum dapat dijadikan tolak ukur untuk memberikan rekomendasi pada sistem *Massive MIMO* agar bisa menghasilkan kapasitas sistem sesuai dengan kebutuhan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam Tesis ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, kontribusi, dan sistematika penulisan.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tinjauan pustaka yang akan menunjang perancangan dan pembuatan pada bab selanjutnya. Tinjauan pustaka yang digunakan meliputi : penelitian sebelumnya, Sistem komunikasi Multi *User Massive MIMO*, model kanal MIMO, estimasi kanal, teknik beamforming, dsb.

BAB 3 : METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan mengenai bagaimana penelitian ini akan dilakukan. Tahapan-tahapan dalam penelitian, Teknik-teknik dan asumsi-asumsi yang digunakan

dalam mengembangkan sistem dan bagaimana teknik untuk menguji kinerja sistem. Selain itu juga akan dijelaskan mengenai jadwal penelitian

BAB 4 : KEMAJUAN PENELITIAN

Bab ini berisi tentang kemajuan dari penelitian yang sudah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Kajian pustaka yang akan diuraikan pada bab ini meliputi penjelasan mengenai teori yang menunjang penelitian diantaranya adalah teori dasar antena array, sistem komunikasi MIMO konvensional atau Point to Point MIMO, Multi User MIMO, dan sistem komunikasi *Massive* MIMO. Selanjutnya juga akan dijelaskan mengenai teknik untuk membangun sistem komunikasi *Massive* MIMO skema *downlink*, yaitu mengenai sistem modulasi, teknik *precoding*, metode estimasi kanal yang digunakan, dan metode deteksi di sisi *user*. Selain itu, juga dijelaskan tentang parameter untuk mengukur kinerja sistem komunikasi *Massive* MIMO yaitu efisiensi spektrum.

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Fokus dari penelitian ini adalah tentang membangun sistem komunikasi Multi User *Massive* MIMO skema *downlink* dengan estimasi CSI dan mentransmisikan data ke masing-masing *user* pada model kanal yang berbeda. Adapun penelitian terkait yang menjadi acuan dari penelitian ini adalah:

Penelitian yang dilakukan oleh Hong Yang dan Thomas L. Marzetta pada tahun 2013. Penelitian ini membahas mengenai perbandingan dua metode linier *precoding* untuk sistem komunikasi *Massive* MIMO, yaitu metode *zero forcing* dan *conjugate beamforming* serta membandingkan tingkat kompleksitas dari dua metode ini. Berdasarkan penelitian ini, *zero forcing* memiliki performa yang lebih bagus daripada *conjugate beamforming* untuk kondisi efisiensi spektrum yang tinggi, selain itu metode *zero forcing* juga memiliki tingkat kompleksitas yang lebih rendah daripada *conjugate beamforming*. Berdasarkan kesimpulan dari penelitian ini, maka metode *precoding* yang bisa dijadikan acuan untuk membangun sistem komunikasi MIMO adalah metode *zero forcing* [8].

Penelitian lain terkait dengan sistem komunikasi *Massive* MIMO adalah penelitian yang dilakukan oleh Hien Quoc Ngo dan Thomas L. Marzetta pada tahun 2013. Penelitian ini membahas mengenai teknik linier *precoding* dan metode estimasi Channel State Information (CSI). Berdasarkan penelitian ini, estimasi CSI di sisi BTS dapat dilakukan dengan mengirimkan pilot dari *user* ke

BTS, metode ini disebut uplink training. Sedangkan untuk memperoleh estimasi CSI di sisi *user* dapat dilakukan dengan mengirimkan pilot dari BTS ke *user*, yang disebut sebagai *downlink* training [9]. Akan tetapi penelitian ini hanya mentransmisikan sinyal pilot, sehingga tidak diperlukan proses *decoding* di sisi *user*.

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya sesuai dengan penjelasan di atas, maka pada penelitian ini akan dirancang dan disimulasikan sistem komunikasi Multi *User Massive* MIMO skema *downlink* dengan menerapkan estimasi CSI. Selain itu, penelitian ini juga akan membandingkan efisiensi spektrum pada dua model kanal yang berbeda.

2.2 Teori Dasar

2.2.1 Kebutuhan standar 5G

Sistem 5G untuk sekarang ini masih belum ada standar yang baku, pada September tahun 2015, ITU mendefinisikan standar untuk 5G yang dijelaskan sebagai berikut [1]:

- *Peak data rate* : Ekspektasi peak data rate dari 5G bisa mencapai 10Gbit/s dibandingkan dengan 1Gbit/s pada 4G. Pada kondisi tertentu, kecepatan data 5G dapat mencapai 20Gbit/s.
- *User experienced data rate* : 5G diharapkan bisa mendukung data rate yang berbeda untuk tiap *user* berdasarkan kondisi lingkungan.
- *Spektrum Efficiency* : Ekspektasi spektrum efficiency untuk 5G dapat mencapai tiga kali lipat lebih tinggi daripada 4G. Kenaikan efficiency untuk 5G jika dibandingkan dengan 4G bisa bervariasi tergantung dari skenario, bisa jadi efisiensinya lebih tinggi untuk beberapa skenario.
- *Mobility* : 5G diharapkan mampu melayani tingkat mobilitas yang tinggi, mencapai 500km/h dengan Quality of Service (QoS) yang bisa diterima, dimana pada sistem 4G hanya mampu mendukung mobilitas sebesar 350km/h.

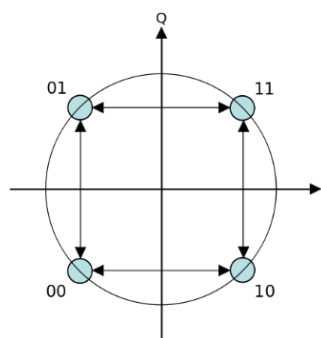
Spesifikasi standar dari sistem 5G belum resmi ditetapkan, namun ada beberapa lembaga yang sudah mendefinisikan standar untuk sistem 5G. 5G didesain untuk dapat bekerja pada range frekuensi yang berbeda menyesuaikan

dengan kebutuhan (misalnya kecepatan transfer data dan kapasitas) dan kepadatan populasi. Secara sederhana, band frekuensi tersebut dibagi menjadi low, mid, dan high band [12]:

- Low Bands: Spektrum dibawah 1GHz efektif untuk mensupport area yang luas. Misalnya band 800MHz digunakan oleh sistem 4G untuk melayani cakupan wilayah yang sangat luas. Band 700 MHz masih tersedia dan bisa dijadikan kandidat untuk sistem 5G.
- Mid Bands: Spektrum frekuensi 1-6 GHz dapat mensupport urban dan suburban area. Seperti misalnya LTE 1800 MHz untuk melayani area urban dan suburban. Dan LTE 2600 MHz untuk melayani area dense urban. Spektrum 3.4 GHz pada band frekuensi antara 3400-3800 Mhz masih tersedia dan bisa digunakan untuk sistem 5G.
- High Bands: Spektrum diatas 6GHz seperti 26GHz (24.25-27.50 GHz) telah dirancang untuk sistem 5G agar bisa menghasilkan kapasitas yang sangat tinggi untuk daerah urban dan suburban baik untuk sistem indoor maupun outdoor.

2.2.2 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) merupakan teknik modulasi digital dengan cara menggabungkan antara teknik modulasi fase dan modulasi amplitude. Sehingga sejumlah bit dibawa oleh sinyal pembawa dalam bentuk perubahan fase dan perubahan amplitude. Modulasi QAM terdiri dari beberapa jenis, diantaranya 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM.



Gambar 2.1 Diagram konstelasi 4-QAM

Diagram konstelasi 4-QAM ditunjukkan pada Gambar 2.1 Pada modulasi 4-QAM terdapat 2^2 atau 4 kombinasi. Teknik modulasi 4-QAM artinya digunakan

4 variasi simbol dalam menterjemahkan bit-bit data, dimana tiap simbol terdiri dari dua bit. Ada beberapa tahapan pada pemancar sistem modulasi 4-QAM. Tahapan pertama adalah input berupa bit data dibuat dari bentuk serial menjadi paralel untuk menghasilkan pasangan dua bit kanal I dan kanal Q. Selanjutnya pasangan dua bit paralel dikodekan dengan metode *mapping*, bisa dengan menggunakan *gray code*. Pada sisi penerima juga ada proses de-mapping, proses de-mapping dilakukan dengan menggunakan teknik coding yang sesuai dengan teknik coding di pemancar, misalnya teknik *gray code*.

2.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Sistem OFDM dapat mengatasi adanya *Inter Symbol Interference* (ISI) pada respon frekuensi *selective*. Sistem OFDM membagi bandwidth kanal menjadi bagian-bagian frekuensi dengan lebar pita sempit $\Delta f = W/N$. Dimana W merupakan bandwidth kanal dan N merupakan jumlah subband. Masing-masing subband bersifat *orthogonal*. Dimana tiap subband dikaitkan dengan sinyal pembawa sinusoida [13]:

$$s_k(t) = \cos 2\pi f_k t \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2.1)$$

Dimana f_k merupakan frekuensi tengah dari subband ke- k . Jika *subcarrier* termodulasi M-ary QAM. Maka sinyal pada *subcarrier* ke- k adalah [13]:

$$u_k(t) = \text{Re} \left[\sqrt{\frac{2}{T}} X_k e^{j2\pi f_k t} \right] \quad (2.2)$$

Dimana X_k adalah $A_k e^{j\theta_k}$ adalah sinyal dari konstelasi QAM yang ditransmisikan oleh *subcarrier* ke- k , $A_k = \sqrt{A_{ki}^2 + A_{kq}^2}$, dan $\theta_k = \tan^{-1}(A_{kq}/A_{ki})$. Masing-masing sub-kanal memiliki frekuensi respon $C(f_k)$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$, secara umum $C(f_k)$ bernilai complex dan diekspresikan sebagai berikut:

$$C(f_k) = C_k = |C_k| e^{j\varphi_k} \quad (2.3)$$

Maka sinyal yang diterima oleh sub-kanal ke- k adalah [13] :

$$r_k(t) = \text{Re} \left[\sqrt{\frac{2}{T}} C_k X_k e^{j2\pi f_k t} \right] + n_k(t) \quad (2.4)$$

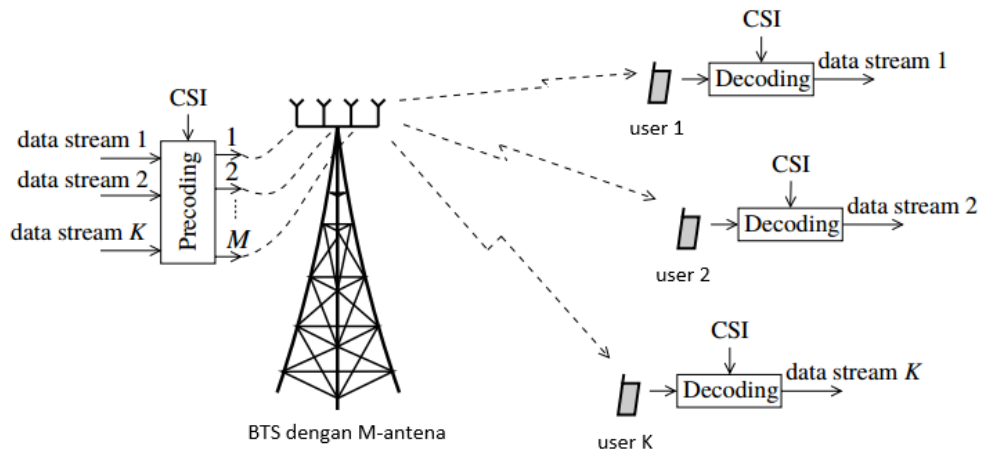
Dimana $n_k(t)$ merupakan *noise* AWGN. Jumlah *subcarrier* yang mengalami respon kanal konstan (B_c) dinotasikan sebagai N_{smooth} . Sehingga [5]:

$$B_c = N_{smooth} B_s \quad (2.5)$$

Dengan (B_s) adalah bandwidth dari masing-masing *subcarrier*. Struktur simbol OFDM pada domain waktu ditunjukkan pada Gambar 3.8 (a), sedangkan representasi jumlah slot OFDM domain waktu dan frekuensi ditunjukkan pada Gambar 3.8 (b)

2.2.4 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Sistem komunikasi terdiri dari beberapa macam, yaitu *Single Input Single Output* (SISO), *Single Input Multiple Output* (SIMO), *Multiple Input Single Output* (MISO), *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), *Multiple Input Multiple Output-Multi User* (MIMO-MU). Sistem komunikasi yang menggunakan banyak antenna disebut sistem komunikasi MIMO. Pada sistem ini, BTS menggunakan antenna array dan melayani *user* yang menggunakan antenna array juga [5]. Tidak seperti sistem antenna konvensional yang sangat rentan terhadap multipath, sistem MIMO justru bekerja sangat baik pada komponen multipath. Komponen multipath dieksploitasi untuk meningkatkan diversitas dan efisiensi bandwidth (bps/Hz).



Gambar 2.2 Ilustrasi sistem komunikasi Multi User MIMO [5]

Gambar 2.2 menunjukkan sistem komunikasi komunikasi Multi User MIMO skema *downlink* dimana BTS mentransmisikan sinyal ke banyak *user*, pada skema *downlink* CSI hanya dibutuhkan di sisi BTS saja dimana CSI ini nantinya digunakan untuk memproses sinyal yang diterima. BTS melakukan

proses precoding sebelum mentransmisikan sinyal ke user. Setiap user kemudian melakukan proses decoding pada sinyal yang diterima.

Pada sistem MIMO, kapasitas sistem dapat ditingkatkan tanpa perlu memperlebar bandwidth atau memperbesar daya pancar, cukup dengan memperbanyak jumlah antena di pemancar dan penerima. Dengan jumlah antena pemancar sebanyak N dan jumlah antena penerima sebanyak M , sinyal yang diterima dirumuskan sebagai berikut [14]:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.6)$$

Dengan mengasumsikan alokasi daya yang seragam dan kanal yang terdistribusi *Rayleigh*, kapasitas dari sistem komunikasi MIMO dideskripsikan sebagai berikut [14]:

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^M B_i \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I}_N + \frac{P_{t_i}}{M\sigma_n^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right] \right) \\ &= \sum_{i=1}^M B_i \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right] \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dimana B_i , \det , \mathbf{I}_N merupakan bandwidth untuk tiap *user*, determinan dari matrix, dan matrix identitas berukuran $M \times N$. Dan dalam hal ini ρ adalah SNR rata-rata tiap kanal, \mathbf{H}^H merupakan conjugate transpose dari matrix \mathbf{H} . Matrix kanal (\mathbf{H}) dijabarkan sebagai berikut [14]:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,N} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ h_{M,1} & h_{M,2} & \dots & h_{M,N} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Masing-masing komponen dari matriks kanal yang terdistribusi *Rayleigh* dapat dinyatakan sebagai [14]:

$$h_{i,j} = \alpha + j\beta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{j \arctan \frac{\beta}{\alpha}} = |h_{i,j}| e^{j\Phi_{i,j}} \quad (2.9)$$

Dimana α dan β adalah random distributed variable dan $|h_{i,j}|$ adalah random variable terdistribusi *Rayleigh*.

2.2.5 Multi User MIMO

Multi User MIMO (MU-MIMO) merupakan suatu sistem yang menggunakan antena array di BTS yang mampu melayani beberapa *user* yang menggunakan antena tunggal atau antena jamak [3]. *Multi User MIMO* memungkinkan suatu BTS melayani beberapa *user* dalam frekuensi yang sama. *Multi user MIMO* adalah pengembangan dari sistem MIMO konvensional dengan menambah jumlah penerima [5].

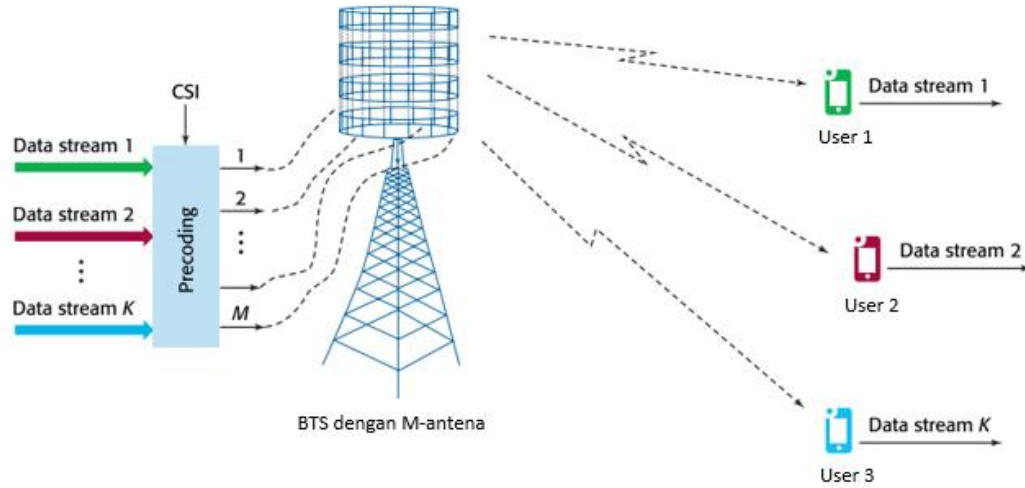
Jika banyaknya *user* dinotasikan sebagai K , maka pada transmisi uplink dan *downlink* akan ada link komunikasi aktif sebanyak K . Perbedaan penting antara point-to-point MIMO dengan MU-MIMO adalah *cooperation*. Pada point-to-point MIMO antena array bekerja secara bersamaan dengan fase yang koheren memproses semua sinyal, baik di sisi BTS maupun *user*. Sedangkan pada MU-MIMO, saat antena BTS bekerja Bersama-sama, masing-masing *user* melakukan *coding* dan *decoding* secara independen, tidak terkait dengan terminal lain.

2.2.6 Massive MIMO

Massive MIMO merupakan pengembangan dari MIMO konvensional, yaitu dengan menambah jumlah antena yang banyak di sisi BTS. Massive MIMO adalah yang menggunakan jumlah antena yang sangat banyak di sisi BTS, antena yang digunakan bisa berjumlah ratusan atau bahkan lebih [4]. Penambahan jumlah antena ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas sistem. Ada beberapa kelebihan mendasar dari *Massive MIMO* dibandingkan dengan MIMO konvensional. Yang pertama adalah hanya BTS yang perlu mengestimasi kanal. Kedua, jumlah antena di BTS (M) jauh lebih banyak daripada jumlah *user*, sehingga ini tidak akan menjadi persoalan bagi pengguna dari sisi hardware. Ketiga, metode linear signal processing sederhana dapat digunakan baik di sisi uplink maupun downlink.

Gambar 2.3 menunjukkan ilustrasi sistem komunikasi MIMO skema *downlink*. Antena array yang secara fisik berukuran kecil dan non-directive melayani beberapa *user* secara simultan. Perangkat *user* bisa terdiri dari multi antena atau single antena. Pada transmisi *downlink*, BTS harus memastikan bahwa

masing-masing *user* menerima data yang memang ditujukan untuknya dengan interferensi sekecil mungkin dari data untuk *user* lain.



Gambar 2.3 Konfigurasi *Downlink Massive* MIMO [15]

Jumlah antenna di BTS adalah sebanyak M antenna. Dimana M dapat berjumlah ratusan antenna atau lebih, sedangkan jumlah *user* (K) yang dapat dilayani dirumuskan sebagai berikut:

$$K < \tau_p < \tau_c \quad \text{dan} \quad K \ll M \quad (2.10)$$

Dimana τ_p adalah jumlah pilot dan τ_c adalah *coherence interval*. Dengan memperbanyak jumlah antenna, maka performa dari sistem dapat ditingkatkan, baik dalam hal mengurangi daya transmisi maupun meningkatkan jumlah *user* yang dapat dilayani secara bersamaan. Penggunaan jumlah antenna yang sangat banyak di BTS tidak hanya bisa meningkatkan efisiensi spektrum dalam suatu cell, tetapi juga dapat meningkatkan kualitas layanan yang sama baiknya ke masing-masing *user* secara simultan. Selain itu dengan menggunakan jumlah antenna yang sangat banyak maka kebutuhan akan pemrosesan sinyal dan alokasi sumber daya dapat disederhanakan, karena fenomena yang dikenal sebagai *channel hardening*. Arti penting dari channel hardening adalah efek dari *small-scale fading* akan hilang, ketika M sangat banyak [5].

Pada kondisi propagasi *Line of Sight* (LOS), data stream dibawa oleh beam yang terfokus ke arah *user*. Sedangkan pada kondisi propagasi dengan banyak penghambur, data stream dapat berasal dari banyak arah secara bersama-sama.

Data stream yang cenderung menguatkan satu sama lainlah yang diinginkan, bukan yang saling mengganggu secara destruktif.

Agar dapat melakukan proses multiplexing, maka respon frekuensi dari kanal perlu diketahui, hal ini bisa didapatkan dengan cara mengirim pilot training dari *user* ke BTS, kemudian BTS melakukan proses estimasi kanal. Suatu sistem komunikasi *Massive MIMO* yang terdiri dari M antena pada BTS dan melayani sejumlah K *user* secara bersama-sama, maka secara umum, respon kanal dari sistem komunikasi *Massive MIMO* dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$\mathbf{g}_k^m = \sqrt{\beta_k} \mathbf{h}_k^m, \quad \mathbf{k} = 1, \dots, K, \quad \mathbf{m} = 1, \dots, M, \quad (2.11)$$

Dimana β_k adalah koefisien *large-scale fading* dan \mathbf{h}_k^m merepresentasikan efek dari *small-scale fading*. Maka, matriks kanal \mathbf{G} antara *user* dan BTS adalah [5]:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1^1 & g_2^1 & \dots & g_K^1 \\ g_1^2 & g_2^2 & \dots & g_K^2 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ g_1^M & g_2^M & \dots & g_K^M \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Pada sistem komunikasi *downlink Massive MIMO*, sejumlah M antena pada BTS mentransmisikan M vector \mathbf{x} . Sinyal yang ditransmisikan oleh BTS dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{D}_\eta^{1/2} \mathbf{q} \quad (2.13)$$

Dimana \mathbf{A} merupakan *precoding* matrix, η merupakan *power control* dan \mathbf{q} merupakan simbol yang sudah dimapping untuk masing-masing *user*. Sehingga masing-masing *user* akan menerima sinyal [5]:

$$y_k = \sqrt{\rho_{dl}} \mathbf{g}_k^T \mathbf{x} + w_k \quad (2.14)$$

Dimana w_k adalah *noise*. Maka sinyal yang diterima dalam bentuk vector adalah [5] :

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho_{dl}} \mathbf{G}^T \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (2.15)$$

Dimana $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_K]^T$ dan $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_K]^T$. *Noise* sample adalah CN (0,1).

2.2.7 Kanal Sistem Komunikasi Nirkabel

Pada sistem komunikasi nirkabel terdapat beberapa model kanal. Diantaranya adalah *Rayleigh* dan *Line of Sight* (LOS).

- Model kanal *Rayleigh*

Model kanal *Rayleigh* merupakan model kanal dimana kondisi lingkungan propagasi terdapat banyak pantulan dan hamburan dengan amplitud random. Respon kanal *Rayleigh* merupakan zero mean Gaussian random variable. Model kanal *Rayleigh* banyak digunakan pada lingkungan propagasi padat penduduk (dense urban).

- Model kanal *Line of Sight* (LOS).

Pada kanal LOS hanya ada ruang bebas, tidak ada penghalang, pemantul dan penghambur. Sehingga respon kanal masing-masing *user* terhadap BTS didefinisikan pada persamaan (2.16), dimana θ_k adalah pergeseran fase yang bernilai acak yang terdistribusi uniform antara $-\pi$ sampai π . Dan θ_k sudut *user* ke BTS yang diukur relative terhadap *array boresight* [5]

$$g_k = \sqrt{\beta_k} e^{j\Phi_k} [1 \quad e^{-j\pi \sin(\theta_k)} \quad \dots \quad e^{-j(M-1)\pi \sin(\theta_k)}]^T \quad (2.16)$$

Oleh karena itu, ketika menggunakan scenario propagasi *Line of Sight*, diasumsikan bahwa lokasi dari user dalam satu sel adalah random, sedangkan pergeseran fase terdistribusi uniform. Berdasarkan asumsi inilah maka digunakan istilah *Uniformly Random Line of Sight* [5]. Model kanal Random Line of Sight pada lingkungan dense urban terjadi pada saat kondisi ekstrem, yaitu ketika posisi user berada sangat dekat dengan BTS, sehingga sinyal dari BTS langsung diterima oleh user tanpa melalui pantulan.

Untuk model kanal Line of Sight, tidak ada penghalang antara pemancar dan penerima. Sedangkan untuk model *Rayleigh* terdapat banyak sekali penghambur, tidak ada lintasan langsung antara pemancar dan penerima. Gain pada model kanal *Rayleigh* adalah complex Gaussian random variable. Karena jarak penghalang dan penghambur relative jauh terhadap panjang gelombang frekuensi pembawa, maka dapat diasumsikan bahwa fase dari tiap lintasan terdistribusi uniform antara 0 sampai 2π dan fase dari lintasan berbeda bersifat independent.

- Delay spread

Parameter penting dalam sistem komunikasi wireless adalah multipath delay spread, T_d , yang didefinisikan sebagai perbedaan waktu propagasi antara lintasan terpanjang dan terpendek, yang dihitung hanya pada lintasan yang memiliki energi signifikan.

- Coherence Time

Merupakan durasi waktu dimana kanal bersifat *time-invariant*. Coherence Time dinotasikan dengan T_c (seconds). Jika penerima bergerak dengan kecepatan v meters/second, maka Coherence Time T_c dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$T_c = \frac{\lambda}{2v} \quad (2.17)$$

- Coherence Bandwidth

Secara umum, magnitude dari respon frekuensi kanal bervariasi terhadap frekuensi pembawa. Panjang dari interval frekuensi dimana respon frekuensi kanal bersifat konstan dinamakan Coherence Bandwidth dan dinotasikan sebagai B_c (Hz). Coherence bandwidth dirumuskan sebagai berikut [5]:

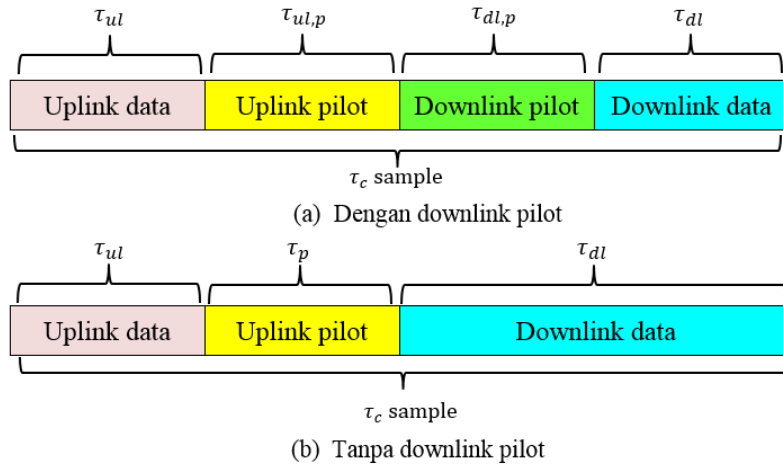
$$B_c = \frac{c}{|d_1 - d_2|} \quad (2.18)$$

- Coherence interval

Jarak *time-frequency* dari durasi T_c seconds dan bandwidth B_c (Hz) dinamakan coherence interval. Berdasarkan teorema sampling, coherence interval dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$\tau_c = B_c T_c \quad \text{samples} \quad (2.19)$$

Alokasi coherence interval pada mode Time Division Duplex (TDD) ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Alokasi sample pada *coherence interval*

2.2.8 Gangguan Kanal Sistem Komunikasi Nirkabel

Sebelum mendesain suatu sistem telekomunikasi, ada beberapa aspek yang harus diperhatikan agar sinyal yang ditransmisikan bisa sampai di penerima dan dapat diproses dengan benar. Faktor yang akan menurunkan kualitas sinyal dalam komunikasi nirkabel diantaranya adalah interferensi berupa *noise*, ataupun *fading*. *Fading* didefinisikan sebagai perubahan secara cepat dari amplitudo, fase atau multipath dari suatu sinyal radio pada periode waktu atau jarak tempuh yang singkat. *Fading* disebabkan oleh interferensi antara dua atau lebih versi sinyal yang dikirimkan yang tiba pada penerima pada waktu yang sedikit berbeda. Ada dua tipe *fading* dalam sistem komunikasi nirkabel, yaitu:

- *Large-scale fading*: disebabkan karena rugi-rugi lintasan dari sinyal sebagai fungsi jarak dan halangan oleh benda-benda berukuran besar seperti bangunan dan bukit. *Fading* ini secara tipikal tidak bergantung pada frekuensi [16].
- *Small-scale fading*: disebabkan oleh interferensi yang bersifat konstruktif dan destruktif dari beberapa lintasan sinyal antara pemancar dan penerima. *Fading* ini bergantung pada frekuensi [16].
- *Frequency-nonselective fading*: Terjadi apabila kanal mempunyai penguatan yang konstan dan tanggapan fase linier dengan bandwidth yang lebih besar dibandingkan dengan bandwidth sinyal yang ditransmisikan. Pada kondisi ini, level sinyal yang diterima berubah terhadap waktu yang disebabkan oleh multipath [17].

- *Frequency selective fading*: Suatu sinyal dikatakan melalui *Frequency Selective Fading*, jika sinyal yang ditransmisikan itu memiliki lebar pita (bandwidth) lebih besar dari bandwidth kanal radio dan tanggapan impuls kanal yang memiliki delay spread lebih besar dari periode simbol [17]. Hubungan antara delay spread (T_d) dan coherence bandwidth (W_c) dirumuskan sebagai berikut [16]:

$$W_c = \frac{1}{2T_d} \quad (2.20)$$

Model matematika untuk respon impuls dari kanal *frequency selective Rayleigh* adalah sebagai berikut [18]:

$$c(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)\delta(t - lT_p) \quad (2.21)$$

Dimana $h(l)$ adalah zero-mean complex Gaussian yang merepresentasikan koefisien Rayleigh fading untuk lintasan ke- l , T_p adalah resolusi multipath minimal. L adalah jumlah komponen multipath dan $\delta(t)$ adalah fungsi delta.

Sedangkan termal *noise* pada kanal komunikasi diasumsikan sebagai berikut [19]

- *Additive* artinya sinyal yang diterima merupakan hasil penjumlahan antara sinyal yang dikirim dengan *noise*, dimana *noise* secara statistik bersifat independen dengan sinyal.
- *White* artinya Power Spectral Density (PSD) dari *noise* datar, sehingga auto korelasi dari *noise* pada domain waktu bernilai nol untuk semua non-zero time offset.
- *Gaussian* artinya sample *noise* terdistribusi *Gaussian*.

2.2.9 Estimasi Channel State Information (CSI)

Proses estimasi kanal atau estimasi *Channel State Information* (CSI) dilakukan dengan cara *user* mengirimkan sinyal pilot ke BTS. Pada setiap *coherence interval*, *user* menggunakan pilot sejumlah τ_p dimana $\tau_c \geq \tau_p \geq K$. Agar tidak terjadi interferensi, maka setiap pilot harus *orthogonal*. Maka pilot yang ditransmisikan dirumuskan pada persamaan (2.22). Dimana Φ adalah unitary matrix [5].

$$Xp = \sqrt{\tau_p}\Phi^H \quad (2.22)$$

BTS menerima sinyal pilot yang ditransmisikan *user* melalui uplink channel. Sinyal pilot yang diterima oleh BTS dirumuskan pada persamaan (2.23). Dimana \mathbf{W}_p adalah sinyal *noise* CN (0,1) [5].

$$\begin{aligned} y_p &= \sqrt{\rho_{ul}} \mathbf{G} \mathbf{X}_p + \mathbf{W}_p \\ &= \sqrt{\tau_p \rho_{ul}} \mathbf{G} \Phi^H + \mathbf{W}_p \end{aligned} \quad (2.23)$$

Kemudian BTS melakukan proses *de-spreading* pilot, yaitu mengalikan sinyal pilot dengan unitary matrix. Sinyal hasil *de-spreading* ini dirumuskan pada persamaan (2.24) [5].

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}'_p &= \mathbf{Y}_p \Phi \\ &= \sqrt{\tau_p \rho_{ul}} \mathbf{G} \Phi^H \Phi + \mathbf{W}_p \Phi \\ &= \sqrt{\tau_p \rho_{ul}} \mathbf{G} + \mathbf{W}'_p \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dimana $\mathbf{W}'_p = \mathbf{W}_p \Phi$ merupakan perkalian antara gaussian *noise* matrix dan matrix unitary. Sehingga komponen (m, k) dari *de-spreading* sinyal pilot adalah [5]:

$$[\mathbf{Y}'_p]_{mk} = \sqrt{\tau_p \rho_{ul}} g_k^m + [\mathbf{W}'_p]_{mk} \quad (2.25)$$

Setelah proses *de-spreading*, kemudian BTS melakukan MMSE *Channel Estimation*. Dengan asumsi bahwa koefisien *large-scale fading* diketahui, maka distribusi dari g_k^m , CN(0, β_k) juga diketahui. Maka MMSE *estimator* dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$\begin{aligned} \hat{g}_k^m &= E\{g_k^m | \mathbf{Y}_p\} \\ &= E\{g_k^m | \mathbf{Y}'_p\} \\ &= \frac{\sqrt{\tau_p \rho_{ul}} \beta_k}{1 + \tau_p \rho_{ul} \beta_k} [\mathbf{Y}'_p]_{mk} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Mean-squares dari estimasi kanal dinyatakan sebagai γ_k dan dinyatakan sebagai berikut [5]:

$$\begin{aligned} \gamma_k &= \{|\hat{g}_k^m|^2\} \\ &= \frac{\tau_p \rho_{ul} \beta_k}{1 + \tau_p \rho_{ul} \beta_k} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Error estimasi kanal dinyatakan sebagai [5]:

$$\tilde{g}_k^m = \hat{g}_k^m - g_k^m \quad (2.28)$$

Mean-square error dari estimasi kanal dinyatakan sebagai [5]:

$$\begin{aligned} E\{|\tilde{g}_k^m|^2\} &= \frac{\beta_k}{1 + \tau_p \rho_{ul} \beta_k} \\ &= \beta_k - \gamma_k \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.2.10 Zero forcing Linier Precoding

Precoding berfungsi untuk memperkecil efek *Multiple Acces Inteference* (MAI) pada sistem komunikasi *downlink* dimana BTS menggunakan antena jamak dan mentransmisikan sinyal ke beberapa *user* secara simultan. Sinyal *precoding* pada transmitter dapat dibuat dengan beberapa cara, tergantung dari kriteria atau metode yang digunakan untuk membentuk *precoding*. Metode *precoding* yang paling sederhana adalah linier *precoding* dengan *zero forcing* atau *Mean Square Error* (MSE). Tetapi ada juga metode non-linier *precoding* yang bisa bekerja lebih baik untuk meningkatkan performa sistem. Berikut ini akan dijelaskan mengenai metode zero-forcing linier *precoding*. *Zero-forcing precoding* matrix dinyatakan sebagai berikut [13]:

$$\mathbf{A}_T = \alpha \mathbf{H}^+ \quad (2.30)$$

$$\mathbf{H}^+ = \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \quad (2.31)$$

Dimana \mathbf{A}_T merupakan *precoding* matrix, \mathbf{H} merupakan respon kanal, dan α merupakan factor skala yang dipilih untuk memenuhi total alokasi power transmisi. Maka vektor sinyal yang dipancarkan (\mathbf{x}) adalah [5]:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}_T \mathbf{D}_\eta^{1/2} \mathbf{q} \quad (2.32)$$

Sinyal yang dipancarkan oleh BTS merupakan perkalian antara *precoding* matrix \mathbf{A}_T , diagonal matrix pembagian daya untuk masing-masing *user* ($\mathbf{D}_\eta^{1/2}$) dan vector simbol QAM (\mathbf{q}).

2.2.11 Zero forcing Linier Detector

Pada sistem komunikasi anatena jamak, data yang ditransmisikan melalui kanal seringkali dimodelkan sebagai linier dan *time-invariant*. Sinyal yang diterima oleh penerima merupakan kombinasi dari simbol data yang ditransmisikan, dan dipengaruhi oleh *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) [20].

$$\mathbf{x} = \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (2.33)$$

Dimana \mathbf{H} adalah matrix kanal, \mathbf{s} adalah sinyal yang diterima dan \mathbf{v} adalah *noise*. Pada sisi penerima, *detector* mengestimasi simbol yang dikirimkan, estimasi simbol dinotasikan dengan $\hat{\mathbf{s}}$. Detektor yang bekerja secara optimal dapat mengurangi probabilitas error rata-rata. Salah satu *detector* yang biasa digunakan karena memiliki tingkat kompleksitas yang rendah adalah *zero forcing detector*.

Zero forcing melakukan proses estimasi simbol dengan cara mengalikan *pseudo-inverse* kanal dengan sinyal yang diterima [20].

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{H}^+ \mathbf{x} \quad (2.34)$$

Karena nilai estimasi $\hat{\mathbf{s}}$ tidak selalu berupa nilai integer, maka diperlukan proses pembulatan ke integer terdekat, proses ini disebut *slicing* dan dinyatakan sebagai berikut [20]:

$$\hat{\mathbf{s}}_B = [\mathbf{H}^+ \mathbf{x}]_z \quad (2.35)$$

Dimana \mathbf{H}^+ merupakan *pseudo-inverse* dari matriks kanal dan \mathbf{x} adalah sinyal yang diterima.

2.2.12 Efisiensi spektrum *Massive MIMO*

Efisiensi spektrum merupakan jumlah bit yang dapat ditransmisikan per detik per satuan bandwidth. Efisiensi spektrum sistem dikalkulasi saat *Bit Error Rate* bernilai minimum atau sesuai dengan standar yang ditentukan. Secara teori kapasitas tiap *user* untuk sistem komunikasi *Massive MIMO* dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$C_{inst,k} = \log_2(1 + SINR_k) \quad (2.36)$$

Untuk *zero forcing* linier processing, SINR tiap *user* dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$SINR_k = (M - K)\rho_{dl}\beta_k\eta_k \quad (2.37)$$

Dimana $C_{inst,k}$ merupakan Capacity instantaneous tiap *user* atau kapasitas sesaat tiap *user*, dikatakan kapasitas sesaat karena rugi-rugi efektif dari sample akibat transmisi pilot untuk tiap *coherence interval* diabaikan. Sedangkan ρ_{dl} merupakan SNR *downlink*, β_k merupakan koefisien *large-scale fading*, dan η_k merupakan *power control* untuk masing-masing *user*.

Untuk menghitung kapasitas total dari sistem, maka harus dikalikan dengan jumlah *user*. Sehingga kapasitas total sistem *Massive MIMO* dengan

asumsi perfect CSI dan menggunakan Zero-Forcing dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$C_{inst,sum}^{ZF,dl}|_{perfect\ CSI} = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + (M - K)\rho_{dl}\beta_k\eta_k) \quad (2.38)$$

Setelah kapasitas sistem diketahui, selanjutnya adalah perhitungan efisiensi spektrum. Efisiensi spektrum didapatkan dengan cara mengalikan kapasitas sesaat dengan pembagian sample di tiap *coherence interval* yang digunakan untuk payload data. Secara teori, efisiensi spektrum tiap *user* untuk sistem *Massive MIMO* dengan menggunakan Zero-Forcing linier processing dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$\begin{aligned} C_{net,sum} &= \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) C_{inst,k} \\ C_{net,sum} &= \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) \log_2(1 + (M - K)\rho_{dl}\beta_k\eta_k) \end{aligned} \quad (2.39)$$

Kapasitas total sistem dengan menggunakan Maximum Ratio processing adalah [5]:

$$C_{inst,sum}^{MR,dl}|_{perfect\ CSI} = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{M\rho_{dl}\beta_k\eta_k}{1 + \rho_{dl}\beta_k \sum_{k'=1}^K \eta_{k'}}\right) \quad (2.40)$$

Efisiensi spektrum total sistem *Massive MIMO* dengan Zero-forcing dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$C_{net,sum} = \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) \sum_{k=1}^K \log_2(1 + (M - K)\rho_{dl}\beta_k\eta_k) \quad (2.41)$$

Efisiensi spektrum total sistem *Massive MIMO* dengan Maximum Ratio dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$C_{net,sum} = \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) \log_2 \left(1 + \frac{M\rho_{dl}\beta_k\eta_k}{1 + \rho_{dl}\beta_k \sum_{k'=1}^K \eta_{k'}}\right) \quad (2.42)$$

Dimana:

τ_p = panjang pilot

ρ_{dl} = SNR *downlink*

$\tau_c = \text{coherence interval}$

$\beta_k = \text{koefisien large-scale fading tiap user}$

M = jumlah antena BTS

$\eta_k = \text{power control tiap user}$

K = jumlah user

Persamaan (2.38) dan persamaan (2.41) merupakan persamaan untuk menghitung kapasitas total dan efisiensi spektrum total dari sistem komunikasi *Massive* MIMO secara teori. Persamaan ini nantinya digunakan sebagai pembandingan kapasitas total dan efisiensi spektrum total hasil simulasi. Perhitungan efisiensi spektrum untuk simulasi dirumuskan pada persamaan (2.43). Dimana $\text{tr}(\mathbf{R}_{\hat{x}\hat{x}})$ merupakan *trace* dari *covariance* bit yang diestimasi, \mathbf{G} adalah kanal estimasi kanal, dan ε_x adalah energi bit [13].

$$C = \max_{\text{tr}(\mathbf{R}_{\hat{x}\hat{x}}) = \varepsilon_x} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{1}{N_0} \hat{\mathbf{G}} \mathbf{R}_{\hat{x}\hat{x}} \hat{\mathbf{G}}^H \right) \quad (2.43)$$

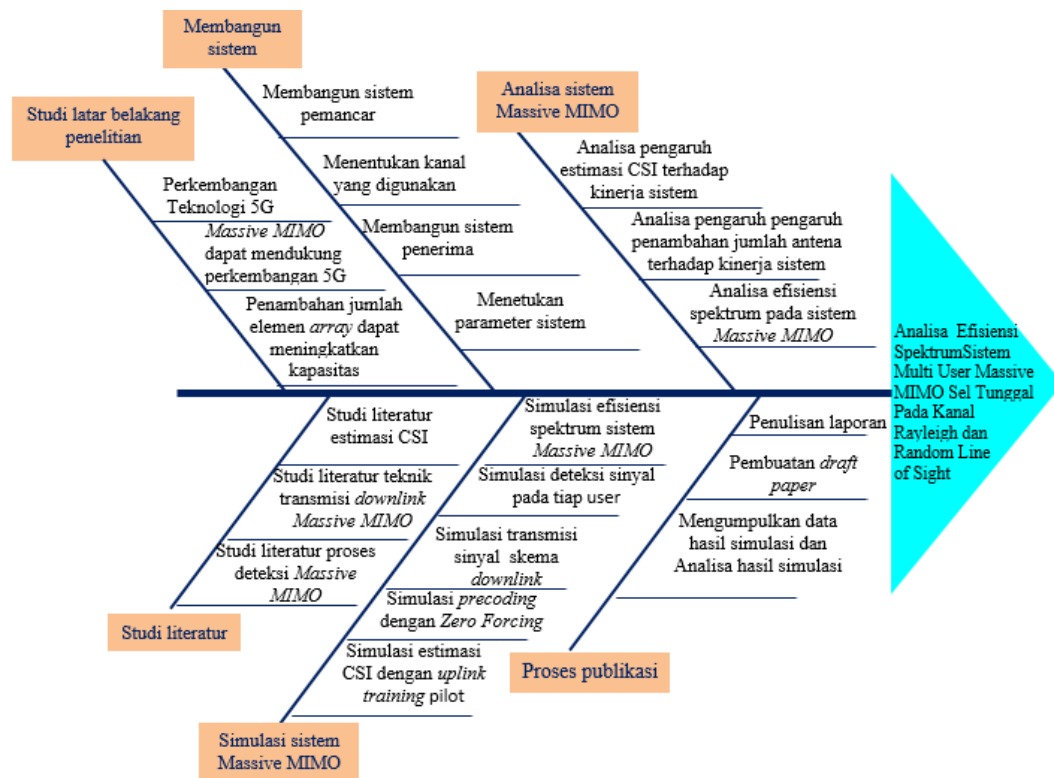
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Penelitian

Fishbone sistem ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan. Tahapan awal yang dilakukan adalah studi latar belakang penelitian, studi literature. Selanjutnya adalah menentukan parameter sistem *Massive MIMO*, dan menghitung parameter sistem *Massive MIMO*. Kemudian melakukan simulasi sistem *Massive MIMO*.

Setelah proses simulasi selesai tahapan berikutnya adalah analisa hasil simulasi. Parameter yang dianalisa pada penelitian ini adalah efisiensi spektrum untuk sistem *Massive MIMO* pada kanal *Rayleigh* dan pada kanal random *Line of Sight* (LOS). Efisiensi spektrum ini dipengaruhi oleh penambahan jumlah antena array di BTS, jumlah *user* yang dilayani, dan nilai SNR *downlink*.



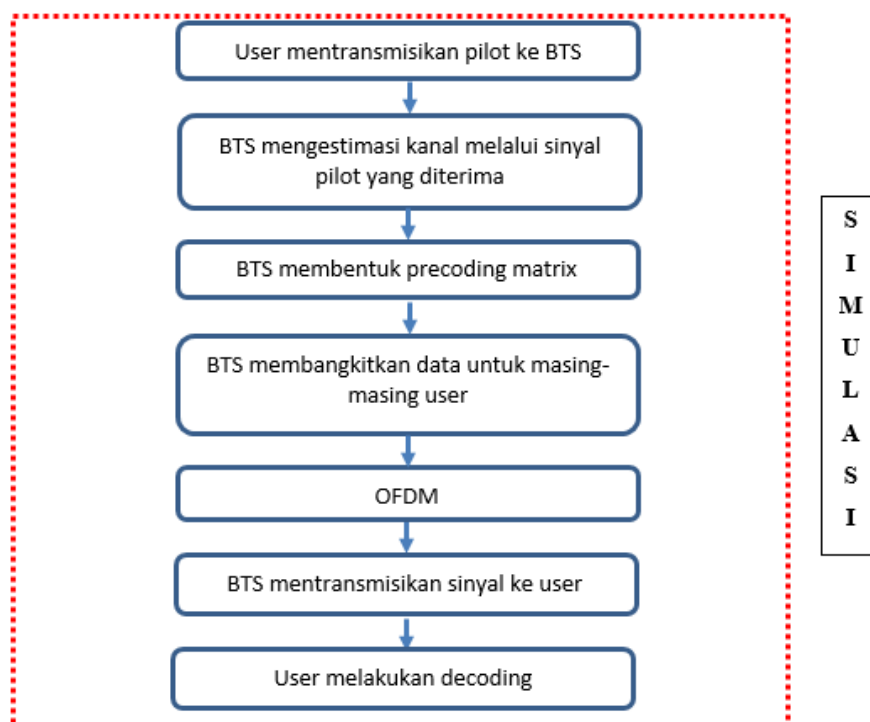
Gambar 3.1 Fishbone penelitian

Berangkat dari fishbone, maka diagram alur penelitian diuraikan sebagai berikut:



Gambar 3.2 Diagram alur penelitian

Diagram alur ini dimulai dengan studi latar belakang dan literature sistem *Massive* MIMO. Kemudian membangun sistem komunikasi *Massive* MIMO. Setelah itu, mensimulasikan sistem *Massive* MIMO. Menganalisa efisiensi spektrum sistem *Massive* MIMO. Dan terakhir adalah publikasi dan laporan.

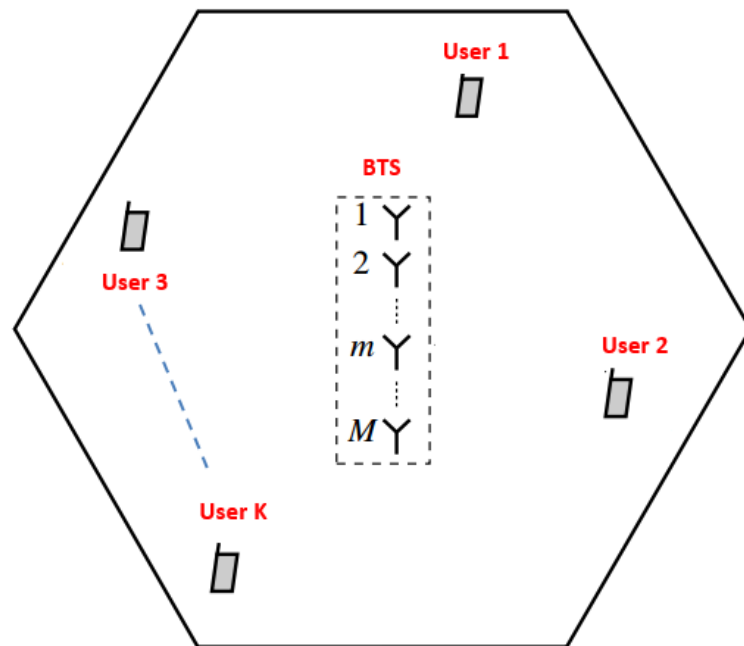


Gambar 3.3 Diagram alur simulasi sistem

Diagram alur proses simulasi secara lebih rinci ditunjukkan pada Gambar 3.3. Proses simulasi ini dimulai dengan *user* mentransmisikan pilot ke BTS. Kemudian BTS mengestimasi kanal dari sinyal pilot yang diterima pada interval waktu tertentu. Hasil estimasi kanal ini digunakan untuk membentuk *precoding*. Setelah itu, BTS membangkitkan data untuk masing-masing *user*, data ini kemudian dimodulasi menggunakan sistem modulasi 4-QAM. Kemudian data ini masuk ke blok OFDM. BTS kemudian mentransmisikan data ke *user*. Proses transmisi data ini disimulasikan untuk dua model kanal yang berbeda, yaitu model kanal *Rayleigh* dan random *Line of Sight* (LOS). Selanjutnya, *user* akan menerima sinyal dan melakukan proses *decoding*. Setelah simulasi sistem selesai dilakukan dan *Bit Error Rate* (BER) dari sistem sudah memenuhi spesifikasi standar, tahap terakhir adalah analisa sistem berdasarkan efisiensi spektrum.

3.2 Model Sistem

Konfigurasi dari sistem *Massive* MIMO yang akan dianalisa ditunjukkan pada Gambar 3.4.

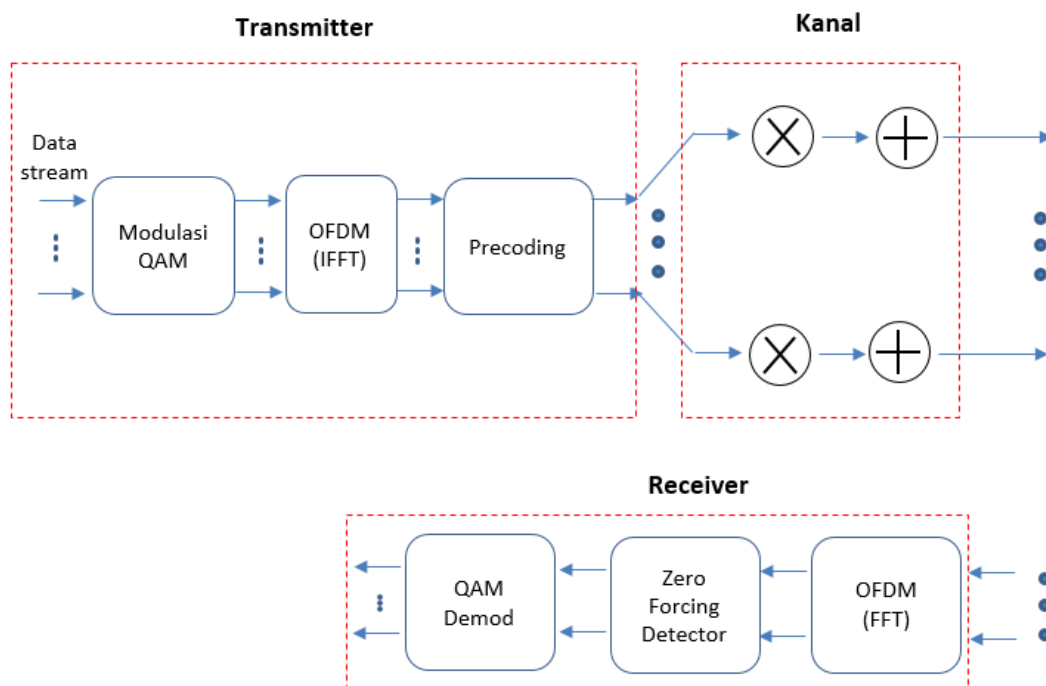


Gambar 3.4 Konfigurasi singel cell sistem *Massive* MIMO

Sistem sel tunggal terdiri dari sebuah BTS yang dilengkapi dengan antenna sejumlah M , dan melayani *user* sebanyak K , dimana masing-masing *user* memiliki satu antenna. Jumlah antenna di pemancar jauh lebih banyak daripada jumlah *user*

($M \gg K$). Pada sistem sel tunggal ini diasumsikan tidak ada interferensi dari sel lain. Proses transmisi uplink dan *downlink* menggunakan skema TDD. Pemilihan mode TDD ini karena estimasi kanal hanya dibutuhkan di sisi BTS. Respon kanal pada mode TDD bersifat resiprokal selama kanal dalam interval waktu tertentu (*coherence interval*) belum berubah.

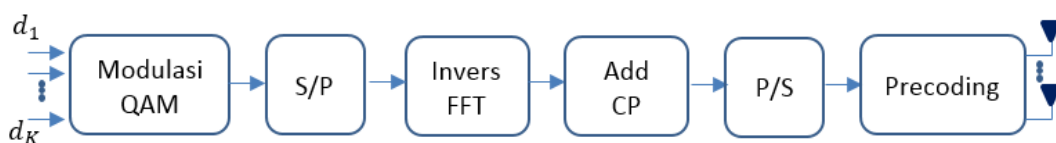
Ketika BTS telah mendapatkan estimasi CSI, BTS menggunakan hasil estimasi CSI untuk membentuk linier *precoding* dan mentransmisikan sinyal ke *user*. Skenario pada sistem ini menggunakan kanal frequency selective *Rayleigh* dan Random Line of Sight. Pada saat transmisi sinyal melewati kanal, maka sinyal tersebut akan dikalikan dengan respon kanal dan mengalami penjumlahan dengan AWGN *noise* yang bernilai random CN (0,1). Karena adanya *precoding* di sisi BTS, maka *user* akan menerima jumlahan dari sinyal untuk *user* lain. Sehingga untuk bisa memperoleh kembali sinyal yang memang ditujukan untuk *user* tersebut, maka dilakukan proses *detection* dengan menggunakan metode *Zero forcing*. Blok diagram sistem komunikasi *Massive MIMO* ditunjukkan pada Gambar 3.5. Sedangkan penjelasan yang lebih rinci mengenai cara kerja masing-masing blok akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.



Gambar 3.5 Diagram blok sistem komunikasi *Massive MIMO*

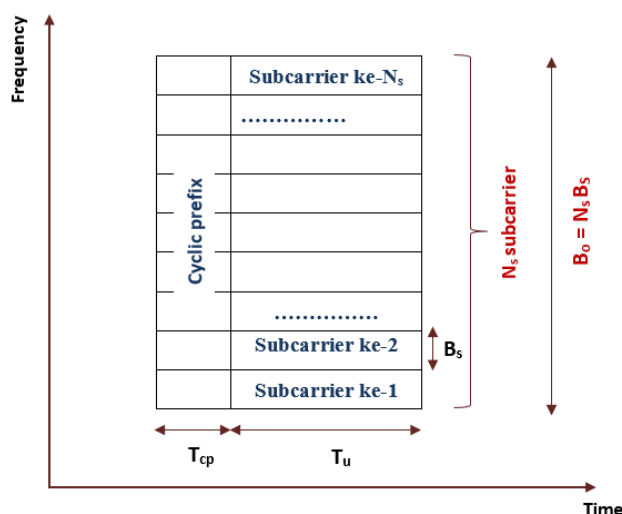
3.2.1 Pemancar Sistem Komunikasi *Massive* MIMO

Pada penelitian ini, pemancar adalah BTS yang melayani beberapa *user* dalam satu sel secara simultan. BTS menggunakan antenna array sebanyak M antenna. Spasi antar elemen antenna adalah $\lambda/2$ dengan tujuan agar masing-masing elemen antenna tidak berkorelasi satu sama lain, dan untuk menghindari *mutual coupling*. Blok diagram dari sistem pemancar ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Blok diagram sistem pemancar

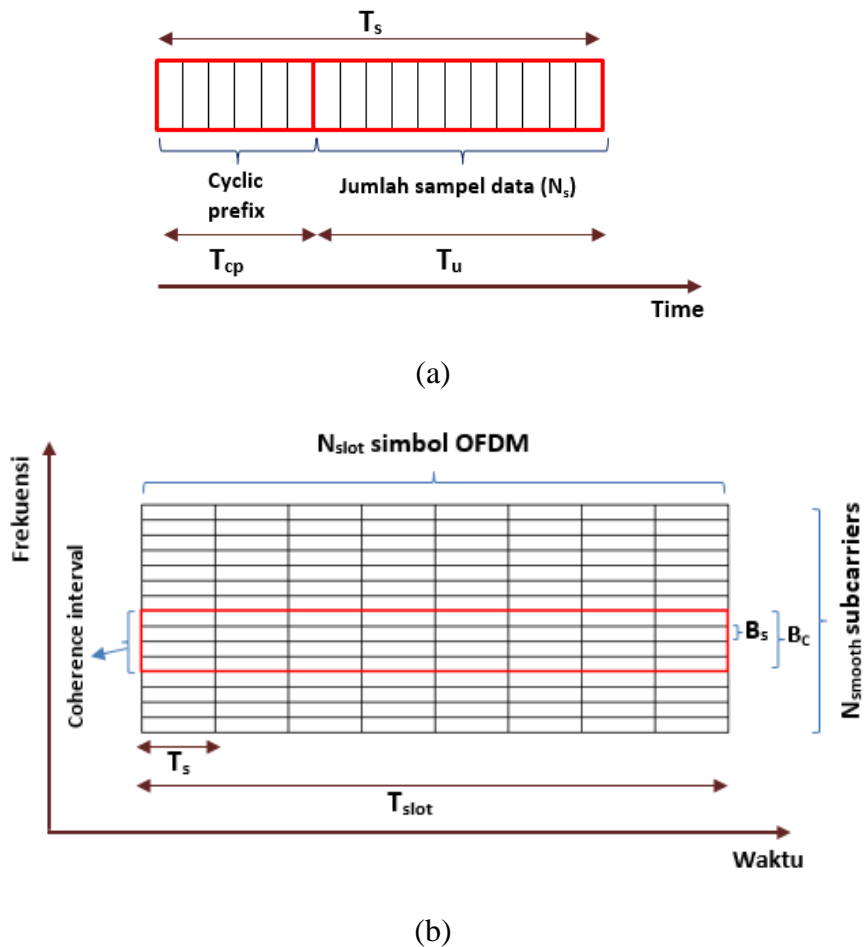
Deretan data dibangkitkan untuk tiap *user*, kemudian dimodulasi dengan sistem modulasi 4-QAM. Masing-masing deretan data untuk tiap *user* ini kemudian masuk ke sistem modulator OFDM. Proses pertama adalah deretan data serial dikonversikan ke paralel. Kemudian dilakukan proses *Invers Discrete Fourier Transform* (DFT) untuk memodulasi N subcarrier oleh sinyal informasi (q). Setelah itu dilakukan penambahan *cyclic prefix*. Data paralel ini lalu diubah menjadi bentuk serial dan dikalikan dengan *precoding* matrix yang diperoleh dari estimasi kanal. Proses untuk mendapatkan *precoding* matrix ini seperti yang sudah dijelaskan pada bab 2. Setelah dikalikan dengan *precoding* matrix, kemudian data ditransmisikan melalui M antenna array pada BTS.



Gambar 3.7 Time-frequency domain dari simbol OFDM dengan *cyclic prefix*

Pada penelitian ini, diasumsikan pembagian daya untuk masing-masing *user* adalah sama. Berikut ini akan dijelaskan lebih lanjut tentang sistem OFDM yang akan digunakan. Seperti yang dibahas pada bab 2, Sistem OFDM membentuk banyak *subcarrier* untuk mengatasi *frequency-selective* channel. Pembagian *subcarrier* ditunjukkan pada Gambar 3.7.

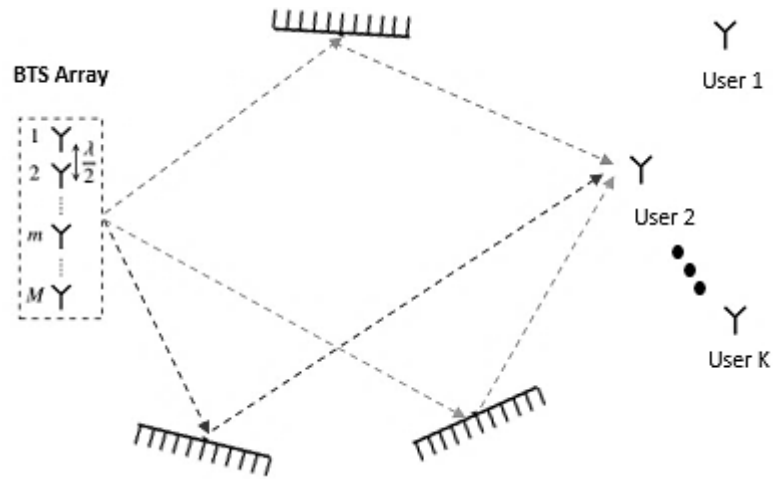
Diasumsikan bahwa $T_{\text{slot}} \leq T_c$, yang mana kanal bersifat *time-invariant* selama satu slot, pembagian timeslot ditunjukkan pada Gambar 3.8. Total bandwidth dari simbol OFDM (B_o) lebih besar daripada *Coherence Bandwidth* (B_c), sedangkan bandwidth dari masing-masing *subcarrier* (B_s) lebih kecil daripada B_c . Sehingga dalam satu *Coherence Bandwidth* bisa terdiri dari beberapa *subcarrier*, seperti dirumuskan pada persamaan (2.5) Berdasarkan asumsi ini maka setiap *Coherence Bandwidth* mengalami respon frekuensi flat-fading.



Gambar 3.8 (a) Struktur simbol OFDM domain waktu (b) Representasi jumlah slot ODFM pada domain waktu dan frekuensi

3.2.2 Kanal Sistem Komunikasi *Massive MIMO*

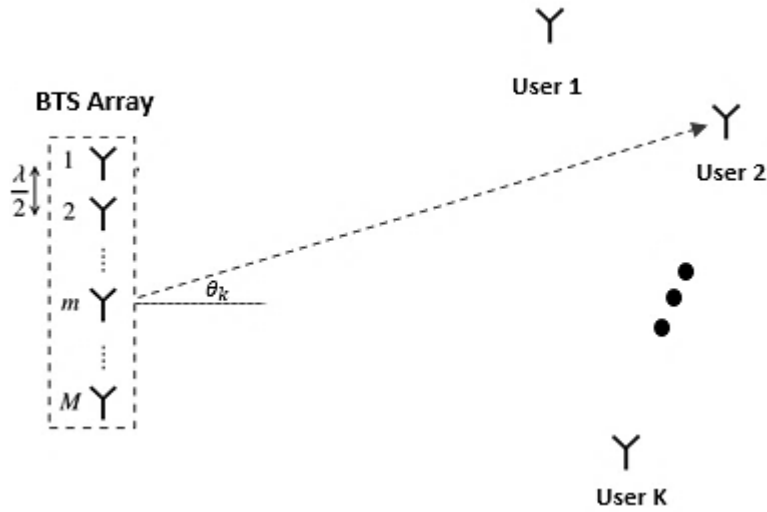
Model kanal yang digunakan pada penelitian ini adalah *frequency selective Rayleigh* dan *Line of Sight*. Skenario model kanal *frequency selective Rayleigh* ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Skenario model kanal *frequency selective Rayleigh*

Pada model kanal *frequency selective Rayleigh* terdapat banyak penghambur dan tidak ada lintasan *Line of Sight* (LOS), sinyal yang diterima BTS maupun *user* adalah jumlahan dari sinyal yang telah mengalami hamburan. Respon impuls kanal pada kanal ini seperti dirumuskan pada persamaan (2.21).

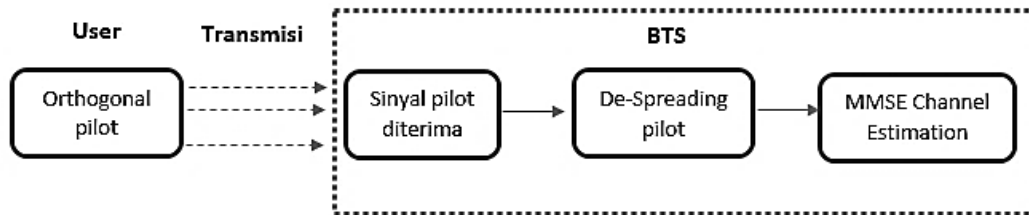
Skenario yang kedua adalah kondisi random *Line of Sight* (LOS), dimana tidak ada penghambur dan penghalang antara BTS dan *user*. Diasumsikan bahwa posisi masing-masing *user* berada pada sudut θ_k yang diukur relative terhadap *array boresight*. Pada skenario ini diasumsikan bahwa BTS sudah mengetahui posisi masing-masing *user*. Skenario model kanal LOS ditunjukkan pada Gambar 3.10. Respon kanal untuk skenario LOS seperti yang dirumuskan pada persamaan (2.16).



Gambar 3.10 Skenario model kanal random *Line of Sight* (LOS)

Karakteristik kanal pada kedua skenario tersebut adalah slow dan flat *fading*. Dikatakan mengalami slow *fading* karena untuk setiap *coherence interval* tidak mengalami perubahan kanal.

Pada penelitian ini proses transmisi sinyal dari BTS ke *user* dan dari *user* ke BTS menggunakan skema *Time Division Duplex* (TDD). Pada mode TDD, untuk memperoleh estimasi CSI di sisi BTS dapat dilakukan dengan cara *user* mengirimkan pilot training ke BTS. Blok diagram proses estimasi CSI ditunjukkan pada Gambar 3.11.



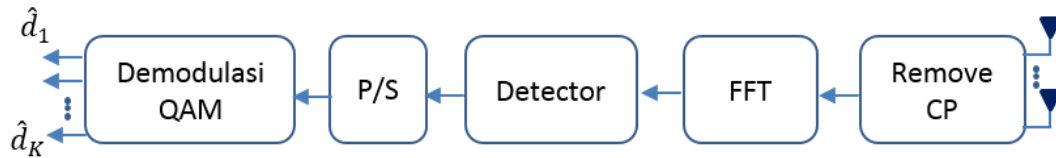
Gambar 3.11 Estimasi CSI pada BTS

Masing-masing *user* membangkitkan *orthogonal* pilot sequence dengan cara membangkitkan unitary matrix Φ terlebih dahulu. Unitary matrix Φ ini yang menjadikan sinyal pilot bersifat *orthogonal*. Panjang sinyal pilot yang dibangkitkan lebih kecil daripada *coherence interval* ($\tau_p < \tau_c$). Kemudian semua *user* mentransmisikan sinyal pilot ke BTS melalui kanal uplink. BTS akan menerima sinyal pilot dan melakukan proses *de-spreading*. Proses *de-spreading*

adalah proses mengalikan sinyal yang diterima dengan unitary matrix Φ . Setelah itu, BTS melakukan proses estimasi kanal menggunakan metode *Minimum Mean Square Error* (MMSE) seperti yang sudah dijelaskan di bab 2.

3.2.3 Penerima sistem Komunikasi *Massive MIMO*

Pada penelitian ini, penerima adalah *user* yang berada di dalam satu sel dengan posisi random. Jumlah *user* dalam satu sel dinotasikan sebagai K , dimana $K \ll M$ dan $K < \tau_p < \tau_c$. Masing-masing *user* menggunakan antenna tunggal. Asumsi bahwa semua *user* dalam kondisi aktif, sehingga secara simultan semua *user* akan menerima sinyal dari BTS. Blok diagram penerima sistem komunikasi *Massive MIMO* ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Blok diagram penerima sistem *Massive MIMO*

Penerima akan menerima sinyal dari BTS yang sudah melewati kanal dan mengalami interferensi dengan *noise*. Karena pemancar menggunakan sistem modulator OFDM, maka pada penerima juga digunakan sistem demodulator OFDM. Proses pertama adalah menghilangkan *cyclic prefix* dari sinyal yang diterima, kemudian masuk ke blok DFT. Setelah itu masuk ke proses *detector*. Dalam penelitian ini digunakan *zero forcing detector*. Sebagaimana yang sudah dibahas di bab 2, *detector* ini bekerja dengan cara mengalikan sinyal yang diterima dengan *pseudo-inverse* dari matriks kanal yang sudah diestimasi. Setelah itu sinyal keluaran dari *detector* masuk ke blok *parallel to serial*. Kemudian dilakukan proses demodulasi QAM untuk mendapatkan kembali bit estimasi.

3.2.4 Analisa Efisiensi Spektrum Sistem Komunikasi *Massive MIMO*

Parameter *output* yang diamati dari sistem ini adalah efisiensi spektrum. Efisiensi spektrum merupakan jumlah bit yang dapat ditransmisikan per detik per satuan bandwidth dengan *Bit Error Rate* (BER) sesuai dengan standard yang ditentukan. Pada penelitian ini, standard BER yang digunakan adalah standar untuk transmisi video *streaming* yaitu BER kurang dari 10^{-4} . Metode untuk

memperoleh efisiensi spektrum dari hasil simulasi sistem adalah dengan menentukan *covariance* dari hasil estimasi bit seperti pada persamaan (2.43).

Berdasarkan persamaan efisiensi spektrum secara teori yang dijelaskan pada persamaan (2.38), kenaikan efisiensi spektrum akan sebanding dengan kenaikan jumlah antenna dan kenaikan SNR. Oleh karena itu, pada penelitian ini efisiensi spektrum dianalisa untuk model kanal *Rayleigh* dan random *Line of Sight*, dimana nilai SNR untuk kedua model kanal ini berbeda. Untuk kondisi random *Line of Sight*, BTS dapat melakukan beamforming ke masing-masing *user*, sehingga SNR nya akan lebih tinggi. Selain itu, parameter lain yang akan divariasikan adalah jumlah antenna BTS dan jumlah *user* yang dilayani.

3.3 Parameter Sistem

Parameter sistem *Massive MIMO* yang akan dibangun harus memenuhi spesifikasi teknologi 5G. Spesifikasi parameter sistem *Massive MIMO* ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter sistem *Massive MIMO*

Parameter	Suburban area
<i>Frekuensi carrier</i> (f_c)	3.4GHz
<i>Spectral bandwidth</i> (B)	20MHz
Jumlah Antena BTS (M)	100 antenna
Jumlah <i>user</i> (N)	30user
Gain antenna BTS (G_T)	27dBi
Gain antenna terminal (G_R)	2.2dBi
<i>Noise figure</i> BTS (F_T)	7dB
<i>Noise figure</i> perangkat <i>user</i> (F_R)	7dB
Temperatur <i>noise</i> (T)	290K
Kecepatan mobitilas <i>user</i> (v)	71km/h
Daya radias BTS (P_{ul})	1W
Daya radiasi perangkat <i>user</i> (P_{dl})	200mw
Delay spread urban macro	0.65 μ s
<i>Coherence Bandwidth</i> (B_c)	770 kHz

Skenario penelitian ini menggunakan kondisi lingkungan dense urban atau area padat penduduk dengan mengacu spesifikasi standar dari sistem 5G. Spesifikasi standar dari sistem 5G belum resmi ditetapkan, namun ada beberapa lembaga yang sudah mendefinisikan standar untuk sistem 5G, seperti yang sudah dijelaskan di Bab 2. Pada penelitian ini digunakan frekuensi carrier 3.4GHz pada mid band. Lebar bandwidth (*spectral bandwidth*) diasumsikan sebesar 20Mhz. Jenis antena yang digunakan di BTS adalah antena array dengan jumlah elemen sebanyak 100 elemen, jumlah ini dipilih karena sistem *Massive MIMO* adalah sistem yang menggunakan antena yang sangat banyak di sisi BTS, jumlahnya bisa mencapai ratusan atau lebih sesuai yang sudah dijelaskan di bab 2. Akan tetapi jumlah antena ini kemungkinan dapat berubah mengikuti kemampuan computer untuk mensimulasikan. Sedangkan jumlah *user* yang dapat dilayani secara simultan adalah sebanyak 4 *user*, sesuai dengan persamaan (2.10).

Gain antena BTS merupakan gain dari antena array, dalam hal ini gain yang BTS yang digunakan adalah 64dBi, hal ini didasarkan pada penelitian desain antena array BTS untuk *Massive MIMO* [21]. Sedangkan gain untuk *user* diasumsikan sebesar 2.2 dBi, hal ini berdasarkan gain standar untuk *portable phone* adalah 0dBd atau setara dengan 2.2dBi. *Noise figure* untuk BTS dan *user* sama yaitu sebesar 7dB, nilai ini mengacu pada spesifikasi *downlink* budget 5G [22].

Temperatur *noise* diasumsikan nilainya sama dengan temperature ruang yaitu 290 Kelvin. Kecepatan mobilitas *user* didasarkan pada kecepatan maksimum untuk daerah dense urban yaitu 142km/jam [5]. Power transmit dari BTS dan *user* adalah 1 W dan 200mW didasarkan pada referensi [5]. Delay spread untuk lingkungan urban macro adalah $0,65 \mu s$ [23]. Dari nilai delay spread ini berdasarkan persamaan (2.20), maka diperoleh coherence bandwidth sebesar 770kHz.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

RENCANA DAN JADWAL KEGIATAN

Pada bagian ini dibahas mengenai rencana dan jadwal kegiatan penelitian serta kemajuan penelitian yang telah dicapai hingga saat ini. Topik dari penelitian ini yaitu Spektral Efficiency Sistem *Massive* MIMO. Selanjutnya didapatkan hasil penelitian sementara dari metode penelitian yang dilakukan

4.1 Kemajuan Penelitian

Pada bagian ini akan dibahas mengenai kemajuan penelitian yaitu mulai dari penentuan parameter, perhitungan link budget, pembangkitan *orthogonal* pilot, simulasi mentransmisikan pilot dari *user* ke BTS dan estimasi CSI untuk dengan jumlah antena array berukuran kecil.

4.1.1 Menentukan konsep sistem

Konsep sistem *Massive* MIMO ditentukan seperti yang telah dibahas di bab 3, mulai dari sistem pemancar, kanal, penerima, hingga metode analisa efisiensi spektrum. Konsep sistem ini nanti akan menjadi acuan untuk membangun sistem komunikasi *Massive* MIMO

4.1.2 Perancangan parameter sistem

Parameter sistem ini dirancang untuk beroperasi di daerah padat penduduk (*dense urban*) dan mengikuti standar 5G. Sesuai dengan parameter pada Tabel 3.1, perhitungan parameter sistem *Massive* MIMO dijabarkan sebagai berikut:

- Perhitungan jumlah pilot

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3.5 \times 10^9} = 0.086\text{m} = 8.6\text{cm}$$

$$\text{Coherence time } (T_c) = \frac{\lambda}{2 \times v} = \frac{0.086}{2 \times 71 \times \frac{1000}{3600}} = 2.18\text{ms}$$

$$\begin{aligned} \text{Coherence interval } (\tau_c) &= B_c \times T_c = 210 \times 10^3 \times 2.18 \times 10^{-3} \\ &= 458 \text{ sample} \end{aligned}$$

Asumsi jumlah pilot = 20% dari *coherence interval*, maka jumlah pilot :

$$\tau_p = 0.2 \times 458 = 91 \text{ sample}$$

4.1.3 Estimasi CSI

Simulasi tahap awal yang dilakukan adalah dengan menggunakan jumlah antena array skala kecil terlebih dahulu. Jumlah antena BTS (M) sebanyak 10 dan jumlah *user* (K) yang dilayani sebanyak 3. Berdasarkan perhitungan parameter sistem. Maka simulasi estimasi CSI diuraikan sebagai berikut:

- Transmisi pilot dari *user* ke BTS.

Jumlah pilot τ_p yang ditransmisikan sebanyak 5 sample. Pilot yang ditransmisikan harus *orthogonal*. Oleh karena itu terlebih dahulu *user* harus membangkitkan *orthogonal* pilot sequence. Maka *user* akan mentransmisikan sinyal pilot (\mathbf{X}_p) yang berukuran $K \times \tau_p$. Matrix Φ merupakan unitary matrix yang berukuran $[\tau_p \times K]$. Berikut ini merupakan hasil pembangkitan matrix Φ :

```
fi =
-0.3199 - 0.2911i    0.3944 - 0.1722i   -0.0668 - 0.5220i
-0.4859 - 0.2113i   -0.4799 + 0.3773i    0.3956 - 0.0661i
-0.3040 - 0.2052i   -0.1808 + 0.3333i   -0.4204 + 0.2680i
-0.1851 - 0.3521i    0.4644 + 0.1179i   -0.2546 + 0.4615i
-0.4353 - 0.2235i   -0.0113 - 0.2621i   -0.0122 - 0.1890i
```

Matrix Φ bersifat unitary, yang artinya jika dikalikan dengan matrix hermitiannya akan menghasilkan matrix identitas berukuran $[K \times K]$.

$$\Phi^H \Phi = I_K \quad (4.1)$$

Pembuktian unitary matrix Φ :

```
verify =
1.0000 + 0.0000i    0.0000 + 0.0000i   -0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i    1.0000 - 0.0000i   -0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i   -0.0000 + 0.0000i    1.0000 + 0.0000i
```

Maka pilot yang ditransmisikan oleh *user* adalah:

```
Xp =
-0.7077 + 0.8256i   -1.0869 + 0.3746i   -0.6794 + 0.3966i   -0.5658 + 0.4188i   -1.0584 + 0.5111i
1.2105 - 0.5943i   -0.9476 + 0.1198i   -0.8933 - 0.8122i   -0.0609 - 0.5014i    0.1935 + 0.7203i
0.4115 + 0.5678i    0.8294 + 0.2358i   -0.0980 + 0.2981i   -1.2039 - 1.4486i   -0.3431 + 0.0255i
```

- Pembangkitan kanal *Rayleigh*.

Untuk sementara, koefisien *large-scale fading* untuk setiap *user* diasumsikan sama yaitu bernilai 1. Sedangkan koefisien *small-scale fading*

dibangkitkan secara random CN (0,1). Maka berdasarkan persamaan (2.11), respon kanal *Rayleigh* yang dibangkitkan adalah:

G =

```
0.2855 + 0.2298i  0.1626 + 0.8596i  0.6602 + 0.3450i
0.2636 + 0.7991i  0.4173 + 0.0138i  0.1789 + 0.6218i
0.6048 + 0.9571i  0.3233 + 0.7265i  0.0787 + 0.3308i
0.2773 + 0.6982i  0.7207 + 0.7183i  0.0864 + 0.1101i
0.8381 + 0.9058i  0.2677 + 0.4223i  0.2705 + 0.3250i
0.2843 + 0.6921i  0.7972 + 0.6720i  0.4034 + 0.5209i
0.5087 + 0.2582i  0.6311 + 0.5335i  0.5112 + 0.1087i
0.3258 + 0.8081i  0.7511 + 0.8412i  0.4764 + 0.7119i
0.5710 + 0.0505i  0.4934 + 0.5025i  0.2430 + 0.8868i
0.2937 + 0.9133i  0.6477 + 0.3953i  0.9543 + 0.1926i
```

- *De-spreading* sinyal di BTS

Setelah *user* mentransmisikan sinyal pilot, BTS akan menerima sinyal pilot tersebut yang sudah dikalikan dengan gain kanal dan ditambah *noise*, sesuai persamaan (2.23). Sinyal yang diterima di BTS adalah:

Yp =

```
5.1005 +18.2839i -2.0231 - 5.2703i  1.8562 - 8.2107i -0.5159 -16.2552i -13.8660 + 1.6943i
-6.5202 - 1.6914i -10.2729 - 1.0157i -11.7403 - 8.9820i  2.6778 -16.8674i -7.0745 - 6.2211i
-5.4623 + 8.4661i -15.3183 -13.2378i -5.9088 -14.3688i  0.0777 -11.3294i -18.2448 - 4.5876i
5.9927 + 3.7675i -13.6946 -12.1142i -6.2421 -17.8007i  0.0837 -10.2785i -11.2287 + 1.1818i
-8.6330 + 8.4601i -14.9585 - 7.0668i -9.8080 - 8.3960i -5.5499 -11.6774i -18.5351 - 3.9471i
5.5238 + 6.0890i -12.7185 - 6.5386i -9.2183 -17.3084i  1.7365 -21.7670i -12.8302 + 0.0654i
7.7351 +10.2849i -10.1621 - 2.6766i -6.5686 - 9.2729i -6.6850 -12.3368i -11.5932 + 6.5114i
4.2631 + 9.6316i -13.2044 - 7.8697i -8.2648 -18.8263i  4.0996 -25.4899i -15.3639 - 1.7319i
1.0384 +14.7801i -12.5630 + 6.2183i -7.9021 - 7.1429i  10.2808 -16.7852i -10.6964 + 4.5003i
4.2569 + 4.2288i -5.5956 - 8.0779i -10.4692 -12.3457i -14.2069 -25.8101i -13.4158 - 3.4711i
```

Kemudian BTS akan melakukan proses *de-spreading* sinyal pilot sesuai persamaan (2.25). Sinyal hasil *de-spreading* ini digunakan untuk MMSE estimator. Sesuai dengan persamaan (2.26), maka hasil estimasi kanal adalah:

est_g =

```
0.2863 + 0.1568i  0.1469 + 0.8876i  0.6337 + 0.3456i
0.2497 + 0.7221i  0.4051 + 0.0180i  0.1686 + 0.6260i
0.5831 + 0.9056i  0.3014 + 0.7484i  0.0969 + 0.3209i
0.2565 + 0.6269i  0.7131 + 0.7247i  0.0771 + 0.1290i
0.8099 + 0.8225i  0.2329 + 0.4174i  0.2735 + 0.3114i
0.2719 + 0.6441i  0.7943 + 0.6671i  0.4100 + 0.5368i
0.4952 + 0.1901i  0.6177 + 0.5429i  0.4926 + 0.1079i
0.2977 + 0.7346i  0.7411 + 0.8415i  0.4736 + 0.7069i
0.5430 + 0.0090i  0.4756 + 0.5090i  0.2513 + 0.8913i
0.2719 + 0.8471i  0.6189 + 0.3872i  0.9524 + 0.1818i
```

Mean square error dari estimasi kanal dengan kanal yang sesungguhnya sebesar 0.0016

- Pembangkitan data untuk tiap *user*

Data tiap *user* yang dibangkitkan secara acak, kemudian dimodulasi menggunakan sistem modulasi 4-QAM. Pada simulasi awal ini, jumlah simbol untuk masing-masing *user* sebanyak 5 simbol. Jika jumlah simbol untuk masing-masing *user* dinotasikan sebagai (l), maka matriks simbol untuk semua *user* berukuran $[K \times l]$. Berikut ini merupakan hasil mapping simbol untuk tiap-tiap *user*:

	1	2	3	4	5	
1	$0.7071 + 0.7071i$	$-0.7071 - 0.7071i$	$-0.7071 + 0.7071i$	$0.7071 - 0.7071i$	$0.7071 - 0.7071i$	User 1
2	$-0.7071 - 0.7071i$	$0.7071 - 0.7071i$	$-0.7071 - 0.7071i$	$-0.7071 + 0.7071i$	$-0.7071 - 0.7071i$...
3	$-0.7071 - 0.7071i$	$-0.7071 + 0.7071i$	$-0.7071 + 0.7071i$	$0.7071 + 0.7071i$	$0.7071 + 0.7071i$	User K

- Membuat *zero forcing precoding* matrix

Hasil estimasi kanal digunakan untuk membuat *Zero forcing precoding* matrix. Berdasarkan persamaan (2.30), maka *zero forcing precoding* matrix adalah:

	1	2	3
1	$0.8373 - 0.3109i$	$0.8703 - 0.4761i$	$0.8695 - 0.3619i$
2	$0.9912 - 0.6020i$	$0.9696 - 0.8160i$	$1.0131 - 0.7023i$
3	$0.3528 - 0.5847i$	$0.3209 - 0.7240i$	$0.3365 - 0.6296i$
4	$0.7597 - 0.2194i$	$0.8028 - 0.3455i$	$0.7690 - 0.2819i$
5	$0.6047 - 0.6573i$	$0.6131 - 0.7867i$	$0.5667 - 0.6967i$
6	$0.7608 - 0.8343i$	$0.6867 - 1.0715i$	$0.7695 - 0.9205i$
7	$0.5607 - 0.5268i$	$0.4531 - 0.7017i$	$0.5912 - 0.6336i$
8	$0.2344 - 0.8098i$	$0.1509 - 0.9380i$	$0.2045 - 0.8448i$
9	$0.6389 - 0.6746i$	$0.5214 - 0.8515i$	$0.6560 - 0.7986i$
10	$0.1416 - 0.8042i$	$0.0421 - 0.9241i$	$0.1150 - 0.8420i$

- Menentukan pembagian daya untuk tiap *user*

Pembagian daya untuk masing-masing *user* diasumsikan sama. Karena ada tiga *user*, maka daya untuk masing-masing *user* adalah sebesar 0.333.

- Transmisi sinyal *downlink*

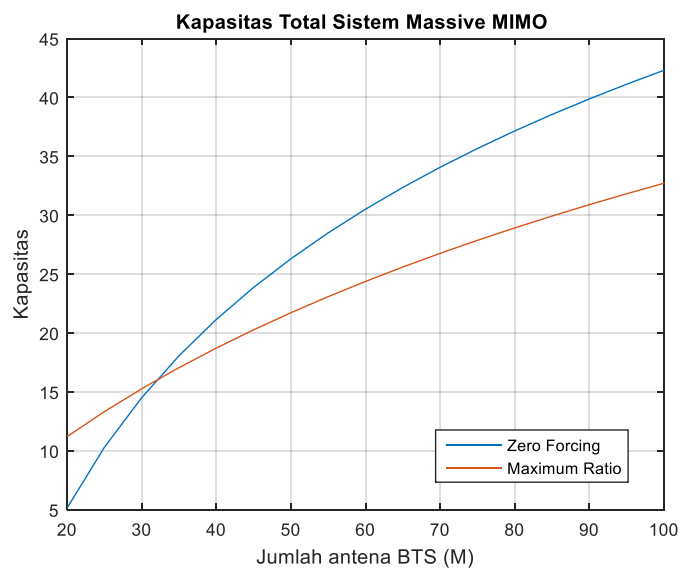
Untuk kondisi kanal *Rayleigh*, BTS tidak mengetahui posisi masing-masing *user*, karena banyak penghambur di lingkungan propagasi. Oleh

karena itu BTS mentransmisikan sinyal *downlink* ke segala arah, dan *user* nantinya harus mampu memisahkan antara sinyal yang memang ditujukan untuknya dan sinyal untuk *user* lain. Berdasarkan persamaan (2.13), sinyal yang ditransmisikan oleh BTS adalah:

	1	2	3	4	5
1	$-0.2510 + 0.6843i$	$-0.0450 - 1.3388i$	$-0.2994 - 0.1720i$	$0.3151 + 0.1232i$	$-1.0585 + 0.7484i$
2	$0.2748 + 0.6161i$	$-0.9077 - 0.8466i$	$-0.2897 + 0.1595i$	$0.2526 - 0.1647i$	$-0.1766 + 1.1435i$
3	$0.3733 + 0.8236i$	$-1.2310 - 1.1105i$	$-0.4215 + 0.1868i$	$0.3767 - 0.2424i$	$-0.2079 + 1.5735i$
4	$-0.1207 + 0.6706i$	$-0.2621 - 1.2081i$	$-0.2961 - 0.0462i$	$0.2790 + 0.0169i$	$-0.8082 + 0.8289i$
5	$0.3711 + 0.4726i$	$-0.9316 - 0.5529i$	$-0.2678 + 0.2021i$	$0.1714 - 0.2054i$	$0.1039 + 1.0152i$
6	$-0.1301 + 0.7674i$	$-0.2989 - 1.4429i$	$-0.3997 - 0.1056i$	$0.3630 + 0.0798i$	$-0.9772 + 1.0002i$
7	$0.1587 + 0.7463i$	$-0.7711 - 1.1554i$	$-0.3536 + 0.0356i$	$0.3189 - 0.0792i$	$-0.5084 + 1.2239i$
8	$0.4184 + 1.0096i$	$-1.4533 - 1.4495i$	$-0.5593 + 0.2053i$	$0.4979 - 0.2379i$	$-0.3532 + 1.9259i$
9	$0.3259 + 0.7440i$	$-1.0331 - 1.0175i$	$-0.3819 + 0.0683i$	$0.3290 - 0.1607i$	$-0.2574 + 1.3990i$
10	$0.2527 + 0.9619i$	$-1.0637 - 1.3957i$	$-0.5038 + 0.0984i$	$0.4065 - 0.2219i$	$-0.4873 + 1.6210i$

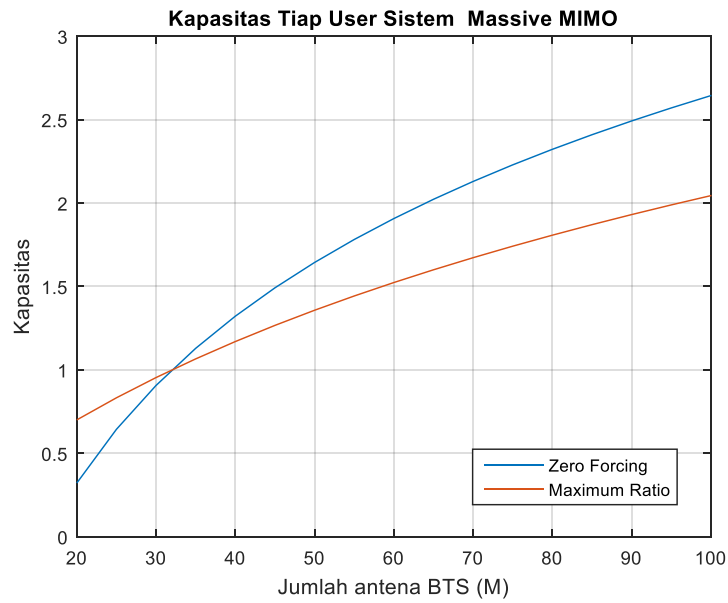
4.1.4 Efisiensi spektrum *Massive* MIMO Secara Teori

Parameter sistem *Massive* MIMO telah ditentukan pada. Parameter ini bisa digunakan untuk menghitung kapaistas dan efisiensi spektrum sistem *Massive* MIMO secara teori. Pada simulasi awal ini, dibandingkan dua metode linear processing untuk mengetahui metode mana yang bisa bekerja lebih optimal. Metode yang dibandingkan yaitu *zero forcing* dan maximum ratio. Grafik kapasitas total sistem *Massive* MIMO yang dirumuskan pada persamaan (2.39) dan (2.40) adalah sebagai berikut



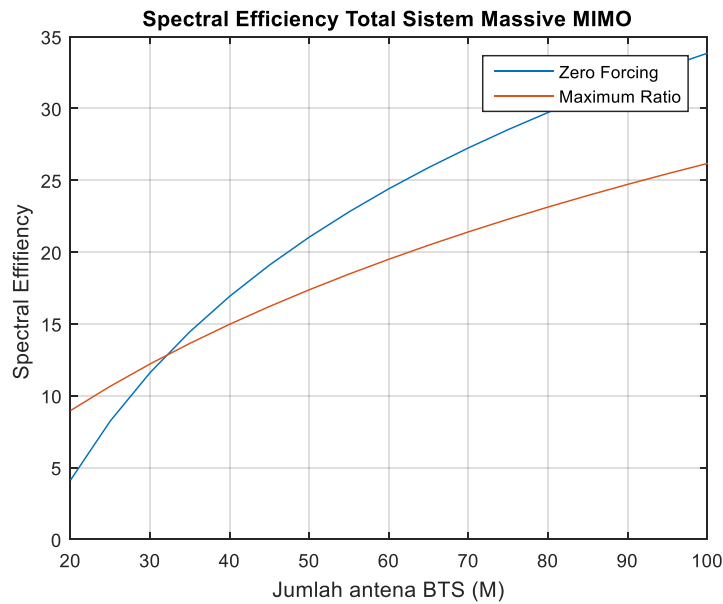
Gambar 4.1 Kapasitas total Massive MIMO

Grafik kapasitas tiap *user* sebagai berikut:



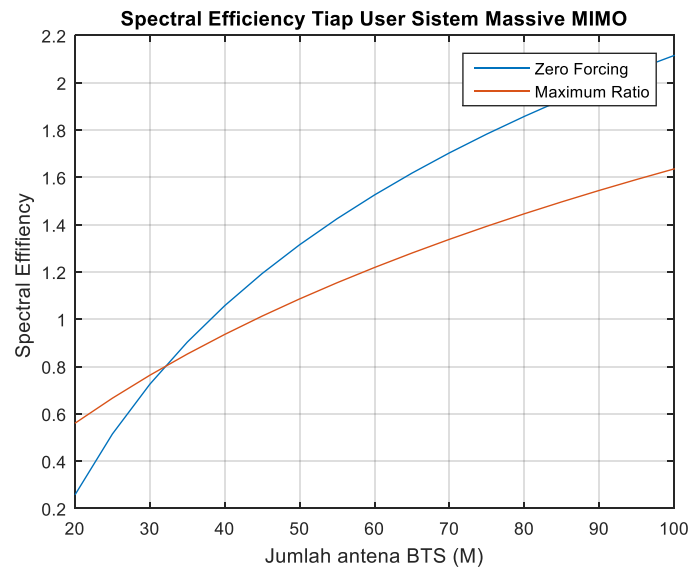
Gambar 4.2 Kapasitas tiap user Massive MIMO

Grafik efisiensi spektrum total sistem *Massive* MIMO berdasarkan persamaan (2.41) dan (2.42) adalah:



Gambar 4.3 Efisiensi spektrum total Massive MIMO

Grafik efisiensi spektrum masing-masing *user* untuk sistem *Massive MIMO* adalah:



Gambar 4.4 Efisiensi spektrum tiap user Massive MIMO

4.2 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Semester 1						Semester 2						Semester 3					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	Studi Literatur																		
2	Membangun sistem pemancar																		
3	Membangun skenario model kanal																		
4	Membangun sistem penerima																		
5	Simulasi pembangkitan kanal																		
6	Simulasi estimasi CSI dengan jumlah <i>user</i> skala kecil																		
7	Simulasi transmisi dengan elemen array skala kecil																		
UJIAN PROPOSAL																			
6	Simulasi estimasi CSI dengan jumlah elemen array <i>Massive</i>																		
7	Simulasi pembangkitan data dan multiplexing OFDM																		
8	Simulasi transmisi dengan kanal <i>Rayleigh</i>																		
9	Simulasi transmisi dengan kanal random LOS																		
10	Simulasi proses <i>decoding</i> di receiver																		
11	Analisa																		
12	Penulisan paper																		
13	Penulisan thesis																		
UJIAN TESIS																			

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *IEEE 5G And Beyond Technology Roadmap White Paper*.
- [2] L. Zao, *Massive MIMO in 5G Network*, Springer SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, 2018.
- [3] M. Rana and R. Vesilo, "Antenna Selection in Massive MIMO Using Non-Central Principal Component Analysis," *International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, pp. 978-1-5090-0919-0, 2016.
- [4] H. Q. Ngo and T. L. Marzetta, "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, vol. 61, no. 4, 2013.
- [5] T. L. Marzetta and E. G. Larsson, *Fundamentals of Massive MIMO*, United Kingdom: Cambridge University Press, 2016.
- [6] M. Sadeghi, C. Yuen and Y. H. Chew, "Sum rate maximization for uplink distributed massive MIMO."
- [7] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris and M. Debbah, "Hardware impairments in large-scale MISO systems: Energy efficiency, estimation, and capacity limits," in *Proc. Signal Processing and Optimization for Green Energy and Green Communications (DSP'13)*, Santorini, Greece, 2013.
- [8] H. Yang and T. L. Marzetta, "Performance of Conjugate and Zero-Forcing Beamforming in Large-Scale Antenna Systems," *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, vol. 31, no. 2, 2013.
- [9] H. Q. Ngo and T. L. Mazetta, "Massive MU-MIMO Downlink TDD Systems with Linear Precoding and Downlink Pilots," in *Fifty-first Annual Allerton Conference*, Illinois, USA, 2013.
- [10] M. S. Reddy, A. T. Kumar and K. S. Rao, "Spectral Efficiency Analysis of Massive MIMO System," in *IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPPC 2016)*, Melaka, Malaysia, 2016.
- [11] A. A., A. Atayero and O. I., *Modeling, Simulation and Analysis of Video Streaming Errors in Wireless Wideband Access Networks*, Springer, 2013.
- [12] "DIGITALEUROPE Views on 5G Licensing and Authorisation," DIGITALEUROPE, Brussels, 2017.

- [13] G. J. Proakis and M. Salehi, Digital Communication, Fifth Edition, New York, Americas: McGraw-Hill, 2001.
- [14] S. Mumtaz, J. Rodriguez and L. Dai, mmWave Massive MIMO A Paradigm for 5G, London, United Kingdom: Elsevier Inc. , 2017.
- [15] T. L. Marzetta, "MASSIVE MIMO: An Intoduction," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, 2015.
- [16] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2004.
- [17] N. J. In, "Introduction to Wireless Fading Channel," [Online]. Available: http://www.slideshare.net/nitin_jain_india/introduction-to-wireless-fading-channels.
- [18] J. G. Proakis, Digital Communications (ch. 14) 3rd ed, NewYork,NY: McGraw-Hill,, 1995.
- [19] S. Aalam, "Introduction to Data Communications," Msc Telecommunication and Computer Network Engineering, 2008.
- [20] T. Kailath, H. Vikalo and B. Hassibi, "MIMO Receive Algorithms," Stanford University California Institute of Technology.
- [21] H. Yuan, C. Wang and Y. Li, "The Design of Array Antennas Used for Massive MIMO System in the Fifth Generation Mobile Communication," in *Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 2016 11th International Symposium on*, Guilin, China , 2016.
- [22] Y. Huo, "5G Cellular User Equipment: From Theory to Practical Hardware Design," in *IEEE Access*, 2017.
- [23] H. Asplund and K. Larsson, "How typical is the "Typical Urban" channel model? Mobile-based Delay Spread and Orthogonality Measurements," Ericsson Research, Stockholm, Lulea, Sweden, 2008.
- [24] S. W. L and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [25] "5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality," National Instrument, 22 Agustus 2017. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/>. [Accessed 20 Mei 2018].