

BAB I

PENDAHULUAN

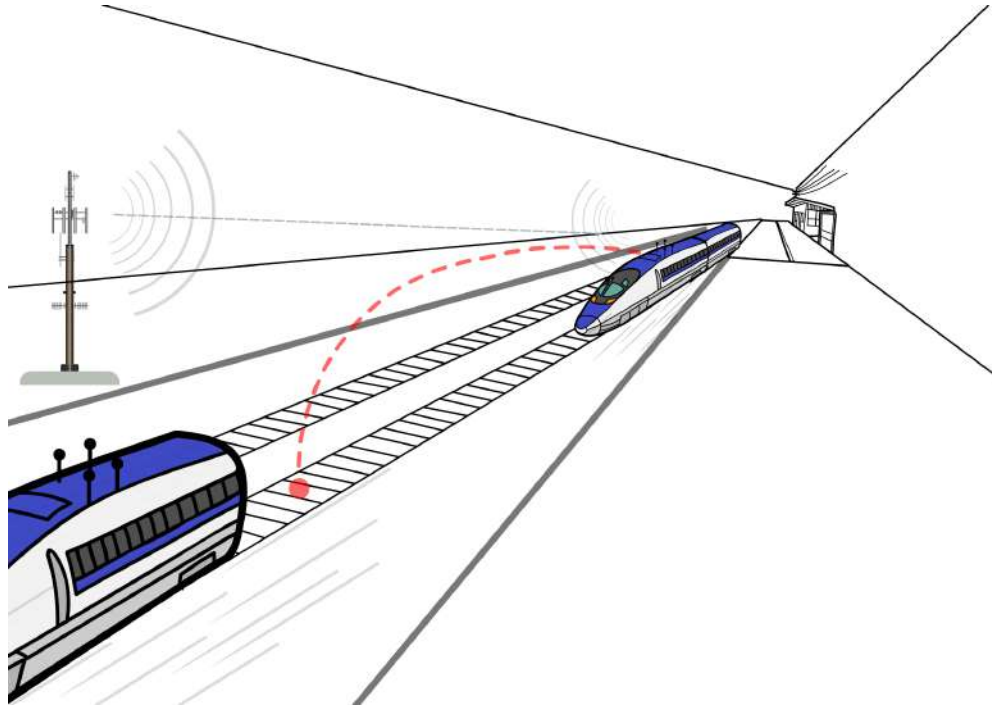
1.1 Latar Belakang

High-speed railways (HSR) atau kereta cepat adalah moda transportasi yang aman, ramah lingkungan, dan hemat energi. Sektor perkeretaapian dunia, *international association of railways* (UIC), mendukung transportasi bebas karbon yang berkelanjutan (*sustainable-carbon free*) dengan meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi CO_2 [1,2]. Terdapat lima persyaratan yang selalu dikembangkan oleh industri HSR, antara lain: (i) kecepatan, (ii) kapasitas transportasi, (iii) tingkat keselamatan, (iv) kualitas layanan, dan (v) efisiensi operasi [3].

Beberapa tahun terakhir, banyak negara mengembangkan HSR sebagai transportasi yang aman, cepat, dan efisien untuk menghubungkan kota-kota besar seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.1. Sebagai contoh, pengembangan HSR di negara Cina dengan kepadatan penduduk yang tinggi. Cina memiliki jarak operasi HSR sepanjang 25000 km pada data akhir Desember 2017 dengan kapasitas tahu-

Tabel 1.1: Data perkembangan HSR di dunia sampai pada tahun 2017.

| Negara | Jarak Operasi (km) | Kecepatan (km/h) | Cakupan populasi |
|-----------------|--------------------|------------------|------------------|
| Cina | 25000 | 350 | 10.70 % |
| Spanyol | 3100 | 320 | 12.69 % |
| Jerman | 3038 | 320 | 18.280 % |
| Jepang | 2765 | 320 | 36.55 % |
| Perancis | 2647 | 320 | 12.96 % |
| Swedia | 1706 | 200 | 21.41 % |
| Inggris | 1377 | 300 | 11.99 % |
| Korea Selatan | 1104.5 | 300 | 44.57 % |
| Italia | 999 | 200 | 18.47 % |
| Rusia | 845 | 250 | 12.22 % |
| Turki | 802 | 250 | 7.00 % |
| Finlandia | 609.5 | 220 | 1.89 % |
| Uzbekistan | 600 | 250 | 9.01 % |
| Austria | 352 | 230 | 27.55 % |
| Polandia | 143 | 200 | 12.57 % |
| Norwegia | 64 | 210 | 12.44 % |
| Amerika Serikat | 54.6 | 240 | 3.73 % |



Gambar 1.1: Ilustrasi persinyalan HSR dengan dua kereta cepat yang saling beroperasi dalam satu lintasan.

nan lebih dari 1.4 miliar penumpang [4, 5]. Sementara itu, HSR antara Beijing dan Shanghai memiliki kecepatan maksimum mencapai 350 km/h pada data bulan September Tahun 2017 [6]. Indonesia pada Tahun 2023 juga diperkirakan memiliki HSR perdana yang beroperasi di lintas Jakarta–Bandung sepanjang 142.3 km dengan kecepatan maksimum 350 km/h.

Dengan perkembangan luas HSR dan peningkatan kecepatan kereta, transmisi nirkabel yang tepat waktu dan *reliable* untuk *train control signal* dan akses internet penumpang menjadi penting untuk dijamin agar berjalan dengan sukses. Sistem komunikasi seluler untuk kereta cepat merupakan salah satu komponen penting dalam menjaga konektivitas antara *ground* dan kereta cepat, serta menjadi salah satu teknologi kunci yang memungkinkan operasi HSR yang sukses. Gambar 1.1 menunjukkan ilustrasi persinyalan komunikasi HSR dengan dua kereta cepat yang beroperasi di lintasan yang sama, sehingga dengan ini menunjukkan pentingnya sistem persinyalan yang andal dalam kondisi kecepatan tinggi. Kebutuhan akan kecepatan yang lebih tinggi (hingga 500 km/h) menjadi tantangan bagi sistem komunikasi nirkabel pada kereta cepat.

Saat ini, terdapat tiga sistem komunikasi kereta yang digunakan di seluruh dunia, yaitu: (i) *global system for mobile communication – railway* (GSM-R), (ii) *terrestrial trunked radio – railway* (TETRA), dan (iii) *long term evolution – railway* (LTE-R). GSM-R merupakan sistem persinyalan kereta yang paling banyak

digunakan secara global, namun kecepatan transfer datanya terbatas hingga kurang dari 200 kbps dan hanya mendukung layanan terkait persinyalan kereta. Meskipun demikian, GSM-R diperkirakan tidak akan menjadi pilihan masa depan untuk transmisi data pada kereta berkecepatan tinggi. Sistem komunikasi seluler pada kereta perlu sejalan dengan tren pengembangan teknologi telekomunikasi seluler 4G dan *the fifth generation new radio* (5G NR). Oleh karena itu, UIC meluncurkan studi pertama untuk penerus GSM-R pada awal 2012, yaitu *future railway mobile communication system* (FRMCS).

FRMCS adalah sistem komunikasi *next-generation* yang berbasis *mobile broadband* yang dirancang khusus untuk keperluan perkeretaapian berkecepatan tinggi di masa depan. UIC dan *railways operator* menetapkan sistem FRMCS sebagai pengganti sistem GSM-R, dengan tujuan untuk mengantarkan 5G-NR ke jaringan kereta cepat. Sistem ini tidak hanya berperan sebagai pengganti sistem komunikasi GSM-R yang sudah usang, tetapi juga memungkinkan implementasi berbagai aplikasi penerapan yang baru seperti *automatic train operation* (ATO), *internet of things* (IoT), dan *predictive maintenance* [7]. FRMCS yang berbasis teknologi komunikasi 5G NR diharapkan memiliki kapasitas jaringan yang lebih besar daripada sistem sebelumnya. Dengan demikian, kereta dapat beroperasi dalam satu lintasan dengan aman tanpa terjadi kecelakaan [5].

Desain sistem persinyalan yang baik antara kereta dan stasiun dapat memastikan keamanan penggunaan layanan transportasi kereta cepat. Oleh karena itu, pengembangan sistem FRMCS mengadaptasi standar *3rd generation partnership project* (3GPP) sehingga pengembangan kinerja sistem komunikasi kereta ditargetkan lebih baik daripada GSM-R. Teknologi 5G pada dasarnya memanfaatkan *bandwidth* yang lebar untuk menyediakan layanan berkecepatan tinggi. Namun, *Release* 18 dari 3GPP melakukan pengembangan lebih lanjut untuk implementasi alokasi lebar spektrum kurang dari 5 MHz pada spektrum frekuensi 874.4–880 MHz untuk *up-link* dan 919.4–925 MHz untuk *down-link* [8–12].

Laju kecepatan kereta cepat yang tinggi dapat mempengaruhi kinerja sistem komunikasi antara kereta dan *ground*, sehingga memperburuk kinerja sistem. Kecepatan tinggi kereta cepat menimbulkan efek Doppler pada sistem komunikasi kereta. Efek Doppler dinamai berdasarkan fisikawan Austria, Christian Doppler, yang pertama kali mengamati dan menjelaskan fenomena pergeseran frekuensi akibat perpindahan objek yang cepat ini pada tahun 1842 [13]. Efek Doppler adalah pergeseran frekuensi yang terjadi karena adanya benda bergerak dengan suatu nilai kecepatan antara dua titik pengamatan.

Dalam lingkungan propagasi *multipath* terdapat beberapa sinyal dengan jalur

kedatangan gelombang dari arah yang berbeda ke penerima, dan setiap jalur mempengaruhi pergeseran Doppler sesuai dengan besaran sudut kedatangannya. Sinyal terima adalah jumlah dari setiap jalur-jalur *multipath* dengan frekuensi pergeseran Doppler yang berbeda-beda. Dalam konteks ini, fenomena ini disebut sebagai "*Doppler spread*". Fenomena *Doppler spread* menyebabkan *error* di bagian penerima yang ditunjukkan dengan *error-floor* pada kurva *bit-error-rate* (BER) [14]. *Error-floor* merupakan *error* yang tidak turun meskipun *noise* semakin kecil. Pada penelitian [15], interpolator dengan antenna *array* mampu mengestimasi sinyal terima di titik yang diam atau stasioner terhadap *ground*. Dengan cara ini, sinyal terima hasil interpolasi seolah-olah tidak mengalami efek Doppler. Sehingga, teknologi *Doppler spread compensator* (DSC) ini *error-floor* yang disebabkan oleh efek Doppler dapat dikompensasi.

Pada penelitian [16] telah berhasil mengembangkan teknologi *multiple input multiple output* (MIMO) yang dikombinasikan dengan teknologi DSC (MIMO-DSC) secara simulasi komputer. Teknologi MIMO-DSC memiliki kinerja yang baik berdasarkan BER terhadap *signal-to-noise ratio* (SNR) dalam kondisi kecepatan tinggi. Oleh karena itu, MIMO-DSC diusulkan sebagai teknologi FRMCS untuk memenuhi kebutuhan kapasitas aplikasi modern pada FRMCS. Namun, cara kerja teknologi MIMO-DSC yang diusulkan oleh [16] belum dinalisis secara mendalam, sehingga menyulitkan implementasi di lapangan. Tugas Akhir ini melakukan analisis cara kerja DSC secara mendalam dengan fungsi Bessel dan penambahan faktor jumlah elemen antenna. Kemudian, Tugas Akhir ini melakukan analisis cara kombinasi teknologi MIMO yang menggunakan teknik pengkodean *space time block code* (STBC) dengan teknologi DSC. Analisis ini menjadi penting untuk membantu memahami cara kerja dan implementasi teknologi MIMO-DSC.

Untuk mendukung implementasi MIMO-DSC di lapangan, Tugas Akhir ini melakukan implementasi MIMO sederhana (tanpa teknologi DSC) terlebih dahulu pada perangkat *universal software radio peripheral* (USRP) dan dalam skala laboratorium. Implementasi dilakukan sebagai langkah pendahuluan untuk memahami karakteristik teknologi MIMO dengan teknik pengkodean STBC pada sistem *software-defined radio* (SDR). Untuk melakukan implementasi pada perangkat USRP dengan sistem SDR, teknik sinkronisasi sinyal dan estimasi kanal harus dilakukan agar sistem dapat bekerja dengan baik. Selama implementasi sistem, Tugas Akhir ini menggunakan perangkat USRP B210 dengan empat antenna yang beroperasi pada frekuensi 938 MHz. Desain MIMO sederhana dalam Tugas Akhir ini diharapkan dapat menjadi langkah pendahuluan yang mendukung penerapan MIMO-DSC untuk kereta cepat Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Pengembangan sistem persinyalan kereta cepat untuk masa depan juga dilakukan di Indonesia. Oleh karena itu, pengembangan teknologi dari karya anak bangsa menjadi bagian motivasi dari Tugas Akhir ini. Hasil penelitian [16] dalam simulasi komputer menunjukkan bahwa teknologi yang diusulkan dapat beroperasi dengan baik dalam kondisi kecepatan hingga 1000 km/h. Teknologi MIMO-DSC mampu mendukung FRMCS untuk persinyalan kereta [16], namun cara kerjanya belum dianalisis secara mendalam, sehingga menyulitkan implementasi di lapangan.

1.3 Tujuan Penelitian dan Manfaat

Tugas Akhir ini melakukan: (i) implementasi MIMO (tanpa teknologi DSC) sebagai langkah pendahuluan untuk mendukung pengembangan implementasi teknologi MIMO-DSC menggunakan sistem SDR dan (ii) analisis cara kerja DSC untuk komunikasi persinyalan kereta berbasis FRMCS. Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat bermanfaat dan berkontribusi dalam pengembangan sistem persinyalan kereta cepat di Indonesia.

1.4 Batasan Masalah

Ruang lingkup yang ditetapkan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Tugas Akhir ini menggunakan 1 buah perangkat USRP B210 dan empat antena VERT900 selama implementasi.
2. Tugas Akhir ini menggunakan frekuensi *downlink* FRMCS pada 922.2 MHz selama simulasi, tetapi pada frekuensi 938 MHz selama eksperimen dengan pertimbangan agar tidak mengganggu pengguna band yang berdekatan dengan frekuensi FRMCS di Indonesia.
3. Tugas Akhir ini hanya melakukan analisis dan evaluasi kinerja sistem di 5G *numerologi 0* menggunakan kurva BER dengan simulasi komputer pada kanal FRMCS Indonesia.
4. Tugas Akhir ini menggunakan modulasi masing-masing 64 *quadrature amplitude modulation* (QAM) dan 4-QAM untuk simulasi dan implementasi.

5. Tugas Akhir ini melakukan simulasi dalam tiga kondisi kecepatan, yaitu 500, 1000, dan 1800 km/h untuk sistem SISO-DSC, dan untuk MIMO-DSC dalam kondisi kecepatan 500 km/h.
6. Model sistem dan *frame work* yang digunakan selama implementasi adalah model MIMO tanpa teknologi DSC dan aplikasi LabVIEW.
7. Tugas Akhir ini mengasumsikan efek interaksi elektromagnetik antara elemen antena (*mutual coupling*) adalah ideal.

1.5 Metode Penelitian

Tugas Akhir ini menggunakan metodologi penelitian sebagai berikut:

- a. Studi Literatur.
Tahap ini mengumpulkan informasi, menganalisis dan mengidentifikasi tentang sistem persinyalan kereta cepat dari beberapa penelitian yang sudah dikaji dari berbagai literatur. Literatur yang menjadi rujukan adalah *text book, the-sis, journal, dan paper conference* yang dipublikasikan secara internasional. Tahap ini juga melakukan pendalaman tentang bagaimana cara melakukan implementasi dengan sistem SDR.
- b. Pemodelan sistem DSC untuk sistem persinyalan kereta.
Tahap ini melakukan pemodelan sistem persinyalan dengan berkemampuan DSC untuk kereta cepat sesuai dengan parameter yang telah ditentukan dalam analisis kurva BER. Tahap ini juga melakukan pemodelan interpolator untuk kereta cepat dengan menggunakan elemen antena sebanyak $K = \{2, 4\}$.
- c. Simulasi komputer SISO-DSC dan MIMO-DSC pada kanal kereta cepat Indonesia.
Tahap ini bertujuan melakukan simulasi kinerja sistem SISO-DSC dalam kondisi kecepatan, yaitu 500, 1000, dan 1800 km/h dan sistem MIMO-DSC dalam kondisi 500 km/h.
- d. Perancangan dan implementasi MIMO.
Tahap ini melakukan perancangan sistem persinyalan MIMO tanpa interpolator menggunakan USRP. Tahap pemodelan sistem sesuai dengan parameter implementasi yang sudah ditentukan.
- e. Analisis dan Evaluasi.
Tahap ini melakukan analisis hasil simulasi, pengujian, dan implementasi

seederhana sistem MIMO tanpa interpolator pada tahap c dan d untuk kereta cepat dengan eksperimen skala laboratorium.

f. Penarikan kesimpulan.

Tahap ini melakukan kesimpulan berdasarkan hasil verifikasi teori dan teknik MIMO-DSC yang dianalisis secara menyeluruh dan hasil implementasi yang dilakukan untuk sistem MIMO. Tugas Akhir ini diharapkan dapat membantu pengembangan sistem persinyalan kereta cepat Indonesia.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistem penulisan Tugas Akhir ini selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. BAB II KONSEP DASAR

Bab ini menjelaskan tentang konsep dasar FRMCS, USRP, modulasi, pemodelan kanal, BER, dan seluruh aspek yang terkait.

2. BAB III MODEL SISTEM DAN PERANCANGAN IMPLEMENTASI MIMO

Bab ini menjelaskan tentang perancangan implementasi MIMO dan pemodelan sederhana dengan menggunakan perangkat USRP B210.

3. BAB IV ANALISIS KURVA BER MIMO-DSC DAN IMPLEMENTASI MIMO SEDERHANA

Bab ini melakukan analisis dan evaluasi kinerja BER yang didapatkan melalui hasil simulasi MIMO-DSC pada sistem komunikasi kereta cepat serta analisis implementasi MIMO sederhana pada USRP B210.

4. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memaparkan kesimpulan dan hasil studi sistem komunikasi kereta cepat Indonesia yang diusulkan dan saran terkait dengan pengembangan sistem komunikasi kereta cepat di Indonesia.