

BAB I

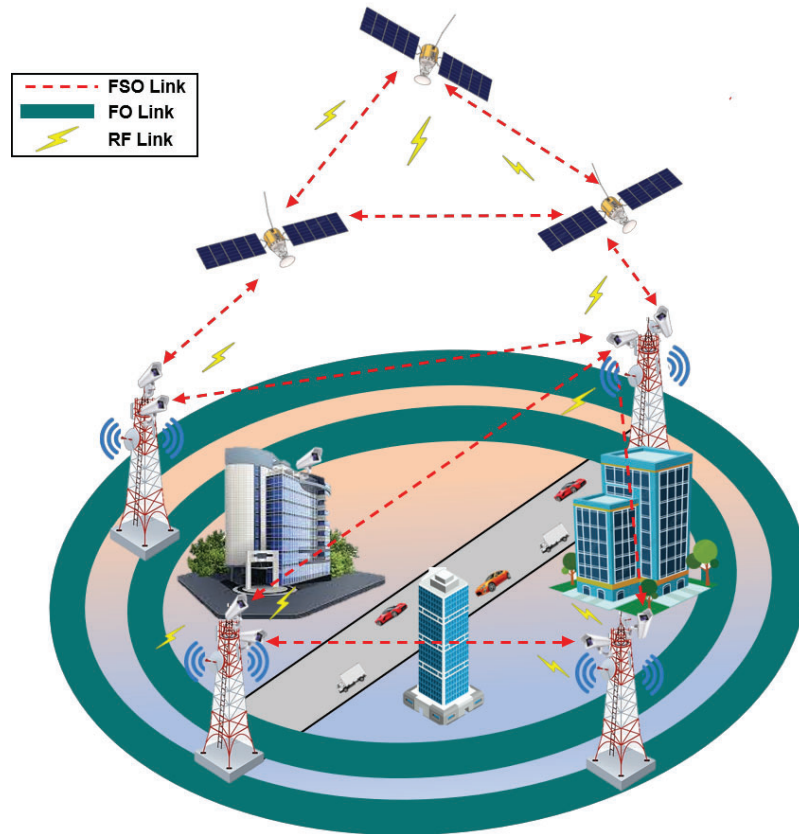
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan seluler global telah mencapai generasi kelima (5G), dan diperkirakan akan beralih ke generasi keenam (6G) pada Tahun 2030 [1]. *International telecommunication union-radiocommunication sector* (ITU-R) telah merilis *draft* teknologi untuk 6G, yang mencakup teknologi *optical wireless* sebagai salah satu teknologi potensial untuk memenuhi kebutuhan *bandwidth* yang semakin besar [2]. Teknologi *optical wireless* yang digunakan untuk aplikasi luar ruangan dikenal sebagai *free space optics* (FSO). Baru-baru ini, FSO mulai banyak digunakan untuk komunikasi klasik dan kuantum, dengan komunikasi kuantum memungkinkan pengiriman informasi yang lebih cepat dan aman dari penyadapan.

Secara prinsip, komunikasi FSO mengirim informasi melalui ruang bebas (*free-space*) dengan menggunakan cahaya. Manusia telah memanfaatkan cahaya untuk keperluan komunikasi sejak lama. Pada tahun 1880, Graham Bell menemukan sistem komunikasi yang dikenal sebagai "*photo-phone*" [3]. Sistem ini dirancang untuk mengirim sinyal suara sejauh sekitar 200 meter dengan memodulasi cahaya matahari yang dipantulkan oleh diafragma foil. Teknologi FSO mengalami perubahan besar pada Tahun 1960-an dengan penemuan *light amplification by stimulated emission of radiation* (LASER) sebagai sumber optik yang memiliki kepadatan energi tinggi dan lebar *beam* yang sempit [4]. Sejak itu, berbagai negara telah memanfaatkan FSO dalam skenario komunikasi jarak jauh. Misalnya, Jepang menguji sistem *optical inter-orbit communications engineering test satellite* (OICETS) pada Tahun 2005 [5], dan Jerman mengirim informasi melalui satelit Terra SAR-X pada Tahun 2007 dengan kecepatan data hingga 5.5 Gbps.

Dalam penelitian terkini, komunikasi FSO digunakan untuk komunikasi kuantum, khususnya untuk aplikasi *quantum key distribution* (QKD) yang bertujuan meningkatkan metode kriptografi tradisional secara signifikan. Pada Tahun 2018, Pang dan timnya berhasil melakukan transmisi kuantum pada kecepatan 10 Mbps di laboratorium dengan jarak 1 m [6]. Selain itu, tim dari *national institute of information and communications technology* (NICT) berhasil mendemonstrasikan komunikasi kuantum antara satelit SOCRATES LEO dan stasiun bumi [7]. Demonstrasi QKD *space-to-ground* bahkan telah dilakukan pada jarak 1200 km, yakni dari



Gambar 1.1 Ilustrasi peran komunikasi FSO untuk telekomunikasi masa depan.

satelit Micius menuju stasiun bumi Xinglong dekat Beijing, Cina [8].

Gambar 1.1 menunjukkan peran komunikasi FSO di masa depan, termasuk untuk komunikasi *ground-to-ground*, *ground-to-space*, dan *space-to-ground* yang dikombinasikan dengan *radio frequency* (RF). Selain itu, komunikasi FSO mendorong aplikasi komunikasi kuantum, sehingga penelitian dalam bidang ini meningkat secara substansial. Meskipun komunikasi kuantum dapat dilakukan melalui *fiber optic* (FO), FO ini membatasi jarak komunikasi dan hanya bisa untuk komunikasi *ground-to-ground*. Sebaliknya, komunikasi FSO tidak terbatas oleh jarak dan memiliki keunggulan seperti ketersediaan *bandwidth* yang lebar, kebutuhan daya rendah, spektrum tidak memerlukan lisensi, dan tingkat keamanan yang tinggi. Oleh karena itu, penelitian komunikasi FSO menjadi penting, terutama dalam membedakan antara komunikasi klasik dan kuantum. Dalam komunikasi klasik, informasi dapat mengalami *error* karena gangguan kanal dan *noise* yang diterima oleh *receiver*. Penelitian yang dilakukan oleh [9], menguji kinerja sistem FSO melalui salah satu model kanal FSO, yaitu kanal *gamma-gamma* dan diperoleh hasil bahwa kanal tersebut secara signifikan memengaruhi nilai *bit-error-rate* (BER).

Kanal *gamma-gamma* memperhitungkan pengaruh *noise* dan *turbulence eddies* yang berjenis *large-scale* dan *small-scale*. Sementara itu, dalam komunikasi kuantum, informasi mengalami *error* karena *Pauli Error*, yang terjadi ketika informasi dikirim melalui kanal kuantum, misalnya, *depolarizing* dan mengalami *decoherence* sehingga menyebabkan *error X, Y, dan Z*. Akan tetapi, perbedaan mendalam antara kanal klasik dan kuantum tidak diketahui, sehingga menyulitkan pengembangan dan implementasinya. Kurangnya *study* pada kanal FSO atas perbedaan distribusi dan karakteristiknya menyebabkan perancangan struktur *transmitter* dan *receiver* juga sulit untuk dilakukan. Selain itu, belum jelas apakah kapasitas kanal kuantum lebih besar daripada kanal klasik atau tidak, sehingga ketidakjelasan ini menimbulkan keraguan dalam pengembangan komunikasi kuantum.

Tugas Akhir ini menginvestigasi dan menganalisis model kanal klasik dan kuantum dengan mempertimbangkan atmosfer dalam kondisi turbulensi. Model kanal klasik, yang meliputi *log-normal*, *gamma-gamma*, *k*, dan *negative exponential*, mengasumsikan bahwa faktor turbulensi atmosfer telah dinyatakan ke dalam distribusi intensitas cahaya atau *irradiance* yang diterima oleh *receiver*. Untuk menganalisis kapasitas model-model kanal klasik tersebut, Tugas Akhir ini menggunakan simulasi komputer serta *closed-form expression*.

Di sisi lain, model kanal kuantum, termasuk *amplitude damping*, *phase damping*, *bit flip*, *phase flip*, *bit phase flip*, dan *depolarizing*, mengasumsikan bahwa faktor turbulensi atmosfer dinyatakan ke dalam probabilitas *error* atas informasi yang diterima. Kapasitas model-model kanal tersebut dianalisis melalui simulasi komputer. Secara ideal, konversi efek turbulensi ke dalam probabilitas *error* diperoleh melalui eksperimen nyata yang melibatkan pengiriman deretan bit informasi yang panjang untuk menilai probabilitas *error* bit yang diterima. Meski eksperimen semacam itu di luar cakupan Tugas Akhir ini, Tugas Akhir ini menggunakan teori probabilitas antara 0 hingga 1 sebagai probabilitas *error* informasi yang diterima dalam menganalisis kapasitas model-model kanal kuantum. Tugas Akhir ini juga melakukan perbandingan dengan parameter setara antara model-model kanal kuantum tersebut dengan model kanal *classical information theory*, seperti *binary symmetric channel* (BSC) dan *binary erasure channel* (BEC). Tujuannya adalah untuk mengetahui model kanal mana yang memiliki kapasitas lebih besar. Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem komunikasi FSO klasik dan kuantum bagi jaringan Generasi 6G.

1.2 Rumusan Masalah

FSO berpotensi besar digunakan untuk komunikasi klasik dan kuantum di era 6G. Akan tetapi, pemahaman mendalam mengenai perbedaan antara kanal klasik dan kuantum tidak diketahui, sehingga ketidaktahuan ini menyulitkan perancangan struktur *transmitter* dan *receiver*. Selain itu, belum ada kejelasan mengenai apakah kapasitas kanal kuantum lebih besar daripada kapasitas kanal klasik, sehingga ketidakjelasan ini menimbulkan keraguan dalam pengembangan komunikasi kuantum.

1.3 Tujuan Penelitian dan Manfaat

Tugas Akhir ini mengklasifikasikan sejumlah model kanal klasik dan kuantum untuk FSO setelah melakukan investigasi mendalam. Pengetahuan mendalam mengenai perbedaan antara kanal klasik dan kuantum bermanfaat untuk pengembangan dan implementasi struktur *transmitter* dan *receiver*. Selain itu, Tugas Akhir ini menganalisis kapasitas kanal klasik dan kuantum, bertujuan untuk memastikan apakah kapasitas kanal kuantum memang lebih besar dibandingkan dengan kanal klasik, sehingga dapat menjawab keraguan yang ada dalam pengembangan komunikasi kuantum. Penelitian ini juga bermanfaat untuk mendukung penelitian selanjutnya dalam mengembangkan komunikasi FSO klasik dan kuantum untuk jaringan Generasi 6G.

1.4 Batasan Permasalahan

Agar penelitian dalam Tugas Akhir ini lebih fokus, terarah, dan tidak melebar pembahasannya, maka pokok pembahasan dibatasi dengan sebagai berikut:

1. Analisis terbatas pada model kanal yang hanya memperhitungkan gangguan turbulensi atmosfer.
2. Model kanal klasik dalam Tugas Akhir ini adalah *log-normal*, *gamma-gamma*, *k*, dan *negative exponential* yang mengasumsikan bahwa faktor turbulensi atmosfer telah dinyatakan ke dalam distribusi *irradiance*.
3. Model kanal klasik (seperti BSC dan BEC) dan kuantum (seperti *amplitude damping*, *bit flip*, *phase flip*, *bit phase flip*, dan *depolarizing*) dalam Tugas Akhir ini mengasumsikan bahwa faktor turbulensi atmosfer dinyatakan ke dalam probabilitas *error*. Model-model kanal tersebut juga digunakan untuk membandingkan secara adil kanal mana yang memiliki kapasitas lebih besar.

4. Tugas Akhir ini tidak melakukan eksperimen lapangan untuk menentukan probabilitas *error* eksak. Sebagai gantinya, analisis menggunakan teori probabilitas dengan rentang nilai antara 0 hingga 1.
5. Model sistem yang digunakan dalam Tugas Akhir ini bersifat umum dan tidak bergantung pada metode transmisi tertentu. Dengan demikian, Tugas Akhir ini mengasumsikan bahwa transmisi informasi antara sisi *transmitter* dan *receiver* berlangsung dalam kondisi ideal. Asumsi ini menjadi landasan dalam analisis kapasitas untuk semua model kanal yang diteliti.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini dirancang sebagai berikut:

1. BAB II KONSEP DASAR

Bab ini memaparkan konsep dasar teknologi FSO serta seluruh aspek yang terkait, seperti pengenalan FSO, teknik modulasi, metode deteksi, model kanal klasik, *classical information theory*, *quantum information theory*, dan model kanal kuantum.

2. BAB III MODEL SISTEM DAN SKENARIO PENGUJIAN

Bab ini mendetailkan model sistem FSO yang digunakan dalam Tugas Akhir ini, mulai dari komponen *transmitter*, model kanal, hingga *receiver*. Selain itu, Bab ini menjelaskan bagaimana kapasitas kanal klasik dan kuantum diuji menggunakan teorema-teorema yang sesuai.

3. BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini menjelaskan hasil dari pengujian kapasitas kanal dan melakukan analisis terhadap model kanal klasik dan kuantum.

4. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menarik kesimpulan dari seluruh penelitian dan memberikan saran untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam sistem komunikasi FSO, baik pada aspek komunikasi klasik maupun kuantum.