

BAB I

USULAN GAGASAN

1.1 Deskripsi Umum Masalah

Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi komunikasi dan informasi telah mengalami percepatan yang signifikan. Tantangan yang dihadapi dalam implementasi teknologi ini terus berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem komunikasi yang lebih cepat, aman, dan andal. Teknologi seperti jaringan non-terrestrial, perhitungan *path loss*, *machine learning*, serta kriptografi kuantum telah menjadi bidang penelitian utama untuk menjawab tantangan-tantangan tersebut. Deskripsi umum masalah memberikan gambaran awal tentang masalah yang dihadapi. Untuk memahami lebih dalam, Tugas Akhir ini meninjau latar belakang masalah guna memberikan penjelasan yang lebih menyeluruh.

1.1.1 Latar Belakang

Latar belakang dari penelitian ini mencakup berbagai aspek yang relevan dalam meningkatkan kinerja sistem komunikasi modern. Aspek-aspek tersebut berkaitan dengan peningkatan kinerja pada teknologi komunikasi 6G. Fokus penelitian tertuju pada subtopik tertentu yang mendukung komunikasi 6G. Beberapa subtopik yang menjadi fokus penelitian ini adalah sebagai berikut

1.1.1.1 *Machine Learning for Channel Estimation*

Proses transmisi sinyal pada *multipath channel* menghadapi berbagai tantangan, seperti *massive barriers*, *neighborhood scattering*, interferensi antar sinyal, dan sebagainya [1]. Faktor-faktor ini dapat menyebabkan distorsi dan penurunan kualitas sinyal di sisi penerima, sehingga mengurangi kinerja jaringan secara keseluruhan. Selain itu, peningkatan jumlah pengguna jaringan nirkabel dan adanya perkembangan jaringan telekomunikasi menuju 6G juga menjadi alasan pentingnya mengestimasi kondisi saluran telekomunikasi (*channel estimation*) secara akurat [2]. Hal ini diperlukan agar sinyal terima dapat didekode secara lebih efektif dan efisien untuk meminimalkan probabilitas kesalahan deteksi sinyal di sisi penerima.

Dalam rangka memperoleh estimasi kondisi saluran yang baik, pemancar *transmitter* dan penerima *receiver* perlu mengetahui *pilot signal* sebagai referensi untuk

mengetahui dan mendeteksi kondisi kanal yang telah dilalui sinyal pada saat proses transmisi. Penggunaan sinyal pilot memungkinkan perangkat untuk mengidentifikasi dan mengadaptasi perubahan dinamis dalam saluran komunikasi, sehingga memperbaiki kualitas transmisi dan meminimalkan tingkat kesalahan. Estimasi saluran yang tepat sangat diperlukan untuk menjaga stabilitas dan kinerja jaringan, terutama di lingkungan dengan interferensi tinggi atau hambatan kompleks, seperti *effect doppler*, *scattering*, *fading*, dan sebagainya [3].

Namun, saat ini *channel estimation* menjadi cukup sulit dilakukan dengan cara tradisional dikarenakan adanya kompleksitas yang tinggi dalam pemrosesan sinyal digital. Oleh karena itu, *machine learning* diperlukan untuk mengurangi kompleksitas komputasi pemrosesan sinyal, terutama untuk operasi aritmatika seperti pembagian yang merupakan salah satu operasi bilangan paling kompleks [4]. Dalam hal ini, keberadaan *machine learning* juga mulai banyak diterapkan dalam berbagai aspek komunikasi nirkabel, seperti *radio resource allocation*, *physical security*, *signal decoding*, dan *channel estimation* [5–9]. Dengan demikian, implementasi *machine learning for channel estimation* dapat menjadi solusi yang lebih efisien untuk meminimalisasi probabilitas *error* pada proses deteksi sinyal, sehingga diharapkan dapat meningkatkan kinerja jaringan dan adaptif dalam memenuhi kebutuhan komunikasi nirkabel masa depan.

1.1.1.2 Eksperimen Lapangan untuk mendapatkan *Path Loss Exponent* pada Komunikasi 6G

Salah satu parameter penting dalam perencanaan dan pengembangan jaringan komunikasi nirkabel yaitu pengukuran dan analisis *path loss exponent*. *Path loss* adalah fenomena alami yang menggambarkan penurunan kekuatan sinyal seiring dengan meningkatnya jarak antara pemancar dan penerima. Dalam konteks komunikasi 6G, yang beroperasi pada frekuensi 4.4–4.8 GHz, 7.125–8.4 GHz, dan 14.8–15.35 GHz [10] masalah *path loss* menjadi semakin signifikan karena sinyal di frekuensi tinggi lebih rentan terhadap pelemahan karena *attenuation*, hambatan, dan *multipath propagation*.

Frekuensi yang digunakan dalam 6G diharapkan mampu mendukung aplikasi berkecepatan sangat tinggi dan latensi sangat rendah, seperti realitas virtual imersif, komunikasi holografik, dan IoT skala besar. Namun, tantangan utama muncul dari penurunan kekuatan sinyal yang lebih besar pada frekuensi ini dibandingkan dengan generasi komunikasi sebelumnya yang beroperasi pada frekuensi yang lebih rendah. Oleh karena itu, pemahaman yang akurat tentang *path loss exponent* di *band* frekuensi 6G sangat penting untuk memastikan performa jaringan yang opti-

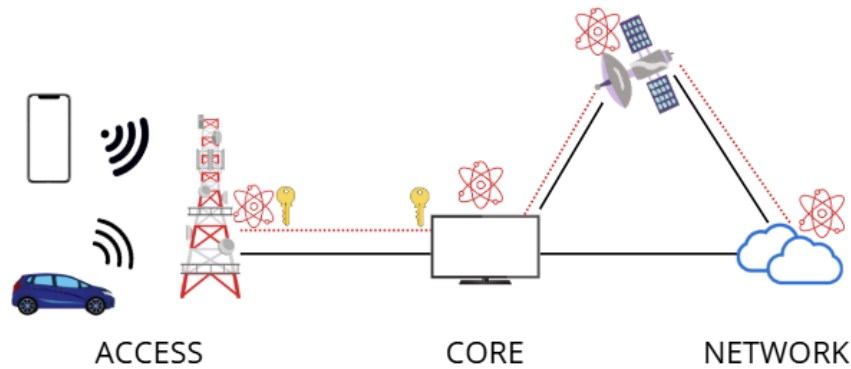
mal dan mendukung pengembangan teknologi 6G.

Path loss exponent bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan, seperti *Line of Sight* (LOS) dan *Non-Line of Sight* (NLOS). Lingkungan urban dengan banyak hambatan fisik akan menghasilkan *path loss* yang lebih besar dibandingkan dengan area terbuka. Pengukuran *path loss exponent* yang akurat sangat penting untuk model propagasi yang digunakan dalam perencanaan jaringan 6G. Kesalahan dalam memperkirakan *path loss* dapat mengakibatkan ketidakefisienan dalam penempatan *base station*, peningkatan biaya, dan penurunan kualitas layanan.

1.1.1.3 Quantum Cryptography

Pertanyaan tentang *cyber security* dan *consumer privacy* menjadi penting seiring dengan pentingnya keperluan untuk sistem komunikasi di masa depan [11]. Semua sistem komunikasi memerlukan keamanan yang sangat canggih. Kegagalan dalam sistem dapat menyebabkan gangguan serius pada layanan penting kapan saja. *Classical cryptography* digunakan secara luas dalam sistem telekomunikasi saat ini, tetapi *cryptography* ini menghadapi ancaman baru dari komputer kuantum, yang berkembang sangat pesat. Algoritma RSA, saat ini digunakan secara praktis, dapat di jebol oleh algoritma kuantum [12]. Pada komunikasi *5G advance* dan 6G masa depan, quantum adalah salah satu fokus studi untuk memberikan layanan apapun dengan sangat cepat [13–15]. *Quantum communications* memberikan kapasitas besar, keamanan yang lebih baik, dan latensi yang lebih rendah [16]. Oleh karena itu, kriptografi kuantum hadir untuk mendukung kebutuhan ini. Kriptografi kuantum didasarkan pada prinsip mekanika kuantum dan bergantung pada hukum fisika untuk memastikan komunikasi yang aman. Tujuan utama kriptografi kuantum adalah keamanan informasi dan mendeteksi penyadap di *communications channel*.

Quantum Key Distribution (QKD) menjawab tantangan keamanan aplikasi generasi ke-enam telekomunikasi (6G) 2030 dengan memanfaatkan *entanglement* dan *quantum teleportation*. Protokol Ekert 91 (E91) adalah salah satu jenis QKD berbasis *entanglement*. *Entanglement swapping*, adalah fenomena yang sangat menarik dalam mekanika kuantum, melibatkan manipulasi *entanglement particles* seperti pasangan Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) pairs [17], yang dapat menghasilkan urutan bit random di dua lokasi yang jauh. QKD menggunakan konsep ini untuk pertukaran kunci, memastikan komunikasi yang aman diantara titik-titik yang jauh. Protokol E91 mencontohkan bagaimana *quantum entanglement* dan *measurement* dapat meningkatkan keamanan dalam komunikasi membuat kunci. Gambar 1.1 menunjukkan arsitektur jaringan 6G yang memanfaatkan QKD untuk menghasilkan kunci keamanan melalui prinsip-prinsip mekanika kuantum. QKD digunakan dalam



Gambar 1.1 Possible implementations kriptografi kuantum dalam evolusi jaringan seluler 6G.

tiga komponen utama:

1. *Access*

Perangkat pengguna seperti smartphone atau kendaraan terhubung melalui jaringan akses nirkabel (base station atau BTS). Proses autentikasi awal dan komunikasi data dienkripsi menggunakan kunci yang didistribusikan secara kuantum.

2. *Core (Inti)*

Di bagian inti, teknologi QKD menghasilkan kunci-kunci kuantum yang aman melalui pertukaran partikel kuantum seperti foton. Dalam tahap ini, protokol kuantum menjamin bahwa setiap gangguan pada saluran transmisi dapat dideteksi secara langsung, memastikan integritas kunci.

3. *Jaringan*

Infrastruktur berbasis satelit digunakan untuk mendistribusikan kunci kuantum ke berbagai node jaringan, memungkinkan keamanan komunikasi ujung-ke-ujung. Dalam ilustrasi ini, kunci yang dihasilkan melalui QKD dapat digunakan untuk mengenkripsi data pada layanan berbasis awan.

1.2 Analisis Masalah

Cara konvensional dianggap tidak bisa memenuhi proses perhitungan pemrosesan sinyal dengan cepat karena adanya peningkatan kompleksitas yang tinggi dalam pemrosesan sinyal digital pada sistem komunikasi *5G Advanced and Beyond*. Dalam hal ini, *machine learning* bisa membantu menyederhanakan atau menyelesaikan proses perhitungan pemrosesan sinyal dengan lebih efisien. Namun, struktur *machine learning* yang optimal dengan model yang sederhana tetapi

akurat untuk pemrosesan sinyal di *physical layer* belum diketahui. Selain itu, banyaknya frekuensi untuk 6G menyebabkan terjadinya simpang siur berita tentang frekuensi resmi internasional dengan frekuensi baru usulan. *Path loss exponent* yang diperlukan untuk memprediksi jangkauan sinyal sehingga *coverage* setiap sel bisa diperkirakan luasnya. Namun, nilai *path loss exponent* untuk frekuensi 6G belum diketahui, sehingga berpeluang menyulitkan desain *coverage cell* pada jaringan 6G. Adanya fakta bahwa kemampuan komputer kuantum saat ini yang sangat hebat mengakibatkan semua algoritma keamanan berpotensi dapat dijebol sehingga membahayakan sistem keamanan masa depan. Selain itu, tidak diketahuinya prinsip kerja E91 dan BB84 dan tidak diketahuinya kunci yang dihasilkan terhadap *practical parameters* seperti penyadapan dan kesalahan saluran.

1.2.1 Aspek Teknis

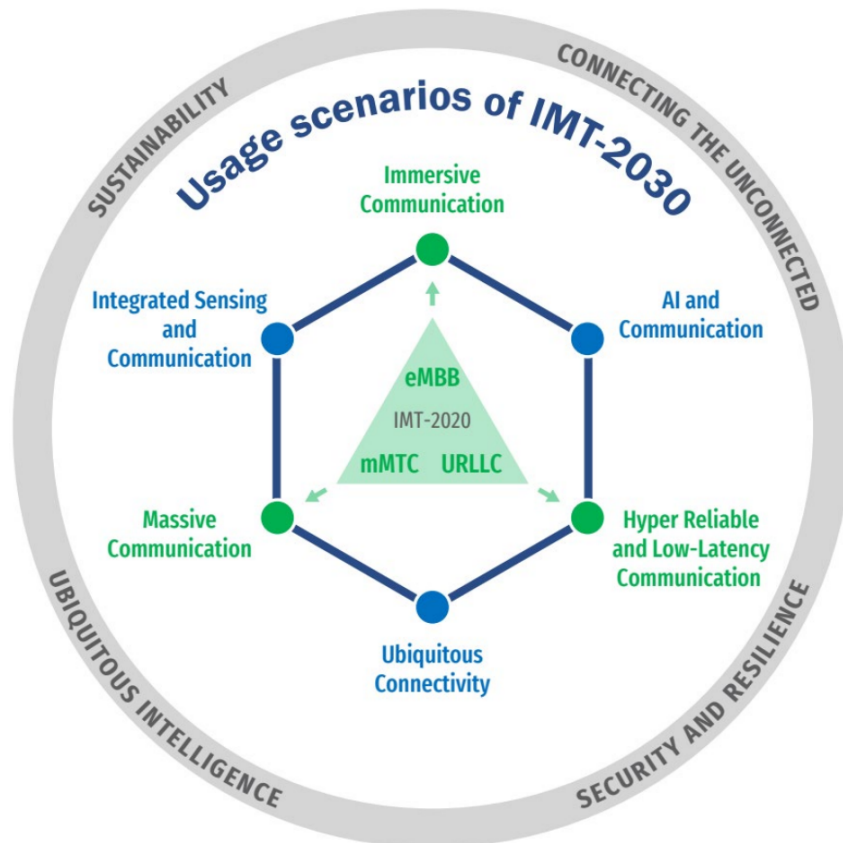
Permasalahan yang diangkat dalam Tugas Akhir ini semuanya memiliki keterkaitan untuk membangun komunikasi 6G.

1. *Machine Learning for Channel Estimation*

Jika ditinjau dari aspek teknis, perkembangan teknologi komunikasi selalu mengalami kemajuan dari waktu ke waktu yang menyebabkan tantangan terhadap peningkatan kinerja jaringan semakin kompleks [2]. Dalam hal ini, 6G membutuhkan *high data rates (Gbps)* dan *ultra low latency* pada kondisi *high mobility* yang lebih unggul daripada generasi sebelumnya, yakni 5G NR. Gambar 1.2 menunjukkan *usage scenarios* untuk sistem komunikasi 6G. Kondisi tersebut membuat perlunya adaptasi terhadap penggunaan teknologi mutakhir untuk meningkatkan kinerja jaringan komunikasi 6G, salah satunya penggunaan *Artificial Intelligence (AI)* dan *Machine Learning (ML)* pada *physical layer* [10]. Dalam hal ini, fokus *research* ditujukan untuk meningkatkan efisiensi pemrosesan sinyal digital menggunakan *machine learning for channel estimation*. Hal ini dikarenakan keberadaan *machine learning* dapat membantu menyederhanakan atau menyelesaikan proses perhitungan pemrosesan sinyal dengan lebih efisien dibandingkan dengan pemrosesan sinyal dengan metode konvensional [7].

2. Eksperimen Lapangan untuk Menghitung *Path Loss Exponent* pada Komunikasi 6G

Kebutuhan komunikasi yang semakin tinggi saat ini mendorong penggunaan frekuensi yang lebih tinggi. Dalam eksperimen lapangan *path loss* untuk



Gambar 1.2 Usage scenarios of IMT-2030 for 6G communication system.

frekuensi 6G diasumsikan terjadi peningkatan *path loss* yang signifikan dibandingkan frekuensi rendah. Hal ini terjadi karena sinyal dengan frekuensi tinggi mengalami pelemahan yang lebih cepat seiring bertambahnya jarak. Selain itu, fenomena *multipath propagation* juga menjadi lebih kompleks dikarenakan sinyal memantul dari berbagai objek dan menyebabkan interferensi yang mengganggu kualitas sinyal. Tantangan ini semakin rumit dalam lingkungan NLOS karena hambatan seperti bangunan dan pohon memperparah penurunan kekuatan sinyal, terutama di area *urban*. Dengan demikian, memastikan keakuratan pengukuran *path loss* menjadi sulit, karena variasi lingkungan sangat memengaruhi hasil eksperimen. Peralatan teknis menghadapi keterbatasan dalam menangkap sinyal di frekuensi tinggi. *Spectrum analyzer* dan antena harus menangkap sinyal lemah dengan akurasi tinggi. Peralatan tersebut rentan terhadap *noise* dan interferensi pada frekuensi tinggi. Keterbatasan ini menyebabkan kesulitan dalam mendapatkan data yang valid.

3. Quantum Cryptography

Kemajuan pesat dalam kemampuan komputer kuantum saat ini telah menim-

bulkan kekhawatiran serius terhadap keamanan sistem kriptografi yang ada. Algoritma keamanan klasik, yang sebelumnya dianggap kuat, kini menghadapi ancaman signifikan karena komputer kuantum berpotensi untuk memecahkan enkripsi tradisional seperti RSA, yang sangat bergantung pada faktorisasi bilangan besar [18]. Hal ini berarti bahwa hampir semua algoritma keamanan yang digunakan saat ini, termasuk yang diterapkan dalam sistem komunikasi modern, berada dalam risiko besar untuk dibobol di masa depan. Situasi ini menimbulkan ancaman serius terhadap keamanan data dan integritas komunikasi yang mengandalkan teknologi kriptografi klasik.

Meskipun berbagai solusi keamanan baru telah diajukan, banyak dari solusi tersebut, termasuk yang terkait dengan protokol E91 untuk QKD, belum memberikan informasi yang cukup jelas tentang berapa kemungkinan kunci yang dihasilkan. Terlebih lagi, protokol tersebut tidak terdapat informasi tentang *Secret Key Rate* (SKR) yang dihasilkan untuk skenario *real-world* dengan memperhitungkan potensi serangan oleh penyusup atau dampak dari kesalahan pada saluran komunikasi (error channel). Keterbatasan ini membuat solusi yang ada saat ini tidak informatif dalam menghadapi tantangan keamanan yang kompleks dan variabel dalam aplikasi komunikasi di masa depan.

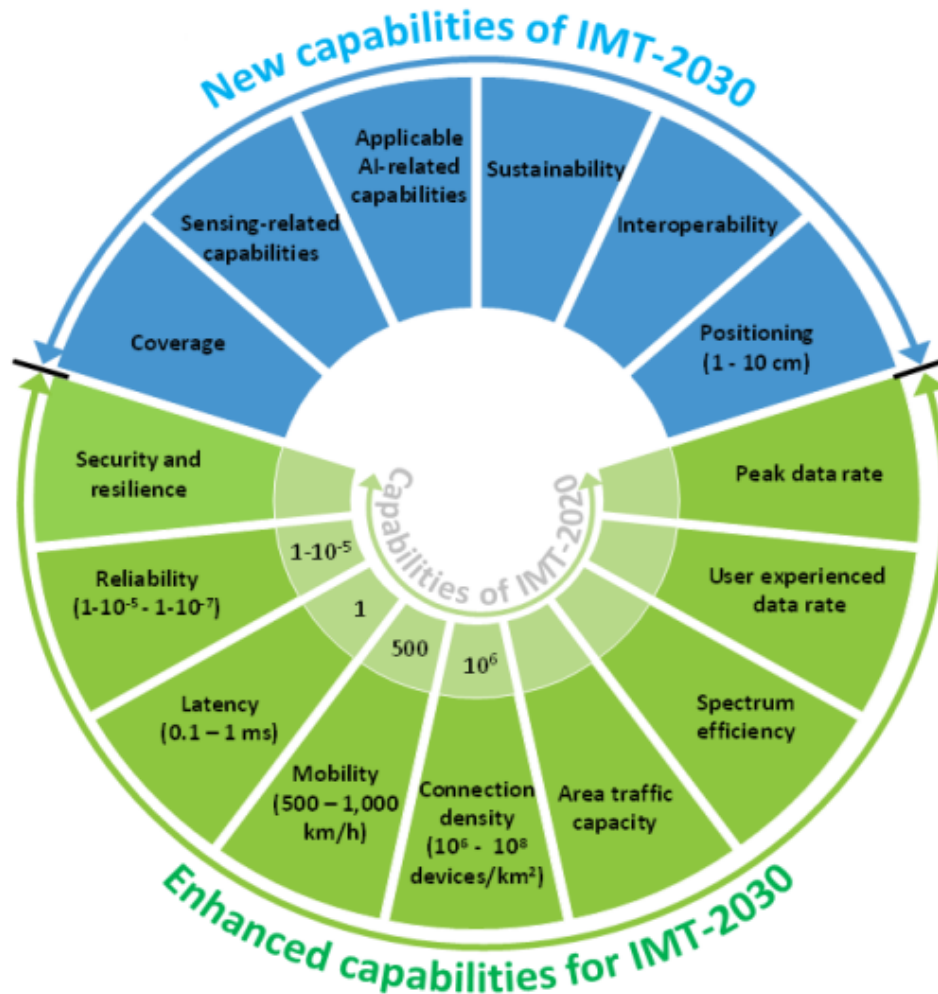
1.2.2 Aspek Regulasi

Dalam pengembangan dan implementasi teknologi komunikasi, aspek regulasi memiliki peran yang sangat penting untuk memastikan keselarasan antara inovasi teknologi dengan kebutuhan hukum, keamanan, dan keberlanjutan. Beberapa aspek regulasi yang menjadi perhatian meliputi:

1. *Machine Learning for Channel Estimation*

IMT-2030 per Mei 2024 menyatakan bahwa terdapat enam *usage scenarios* untuk 6G, yakni *immersive communication*, *massive communication*, *hyper reliable and low latency communication*, *AI and communication*, *ubiquitous connectivity*, dan *integrated sensing and communication*. Dalam hal ini, keberadaan AI diharapkan dapat membantu meningkatkan kapabilitas 6G sesuai IMT-2030 [10]. Adapun, *palette diagram recommendation* dari ITU-R M.2160 dapat dilihat pada Gambar 1.3.

Selain itu, jika ditinjau dari tantangan pemrosesan sinyal pada sistem komunikasi 6G, AI juga berperan penting dalam meningkatkan kualitas *physical layer* dalam menghadapi *fast changing conditions* di *air interface*. Dengan



Gambar 1.3 Palette diagram recommendation ITU-R M.2160.

demikian, *machine learning for channel estimation* diharapkan dapat menjadi solusi untuk estimasi kanal yang besar dengan ketangguhan terhadap efek dari *finite-sampling*, *temporal correlation*, dan *corrupted samples* [2].

2. Eksperimen Lapangan untuk Menghitung *Path Loss Exponent* pada Komunikasi 6G

Penerapan teknologi baru pada spektrum frekuensi untuk 6G harus sesuai dengan standar global. Oleh karena itu, kolaborasi antar negara menjadi krusial dalam mengembangkan regulasi yang konsisten. Namun, perbedaan aturan dan kebijakan di setiap negara sering kali menjadi tantangan dalam proses harmonisasi ini. Saat ini, terdapat enam negara yang sedang melakukan riset terkait regulasi 6G. Acuan utama yang digunakan adalah framework IMT-2030 yang disusun dan diperbarui secara berkala oleh *International Telecommunication Union* (ITU) [19]. Regulasi ini juga dibahas dalam pertemuan *World Radiocommunication Conference* (WRC-23) di Dubai, yang dihadiri

oleh berbagai subgrup dan penyedia layanan. Dalam aspek regulasi terkait propagasi sinyal dengan frekuensi 300 MHz–100 GHz mengacu pada ITU-R P.1411 dan 3GPP TR 38.901 dengan frekuensi 0.5–100 GHz untuk model propagasi di lingkungan perkotaan dan pinggiran kota [20]. Kedua standar ini menjadi acuan dalam melakukan eksperimen lapangan *path loss exponent*.

3. *Quantum Cryptography*

Seiring berkembangnya teknologi 6G, regulasi mengenai keamanan menjadi sangat penting. Regulasi di tingkat nasional dan internasional harus diperbarui untuk mengantisipasi ancaman baru yang muncul, terutama yang berkaitan dengan komputer kuantum dan teknologi kriptografi baru. Salah satu tantangan utama adalah memastikan bahwa protokol keamanan, seperti QKD, diadopsi secara global dan diakui sebagai standar keamanan. Lembaga standar internasional, seperti *International Telecommunication Union (ITU)*, dan otoritas lokal di berbagai negara harus bekerja sama untuk merumuskan pedoman regulasi yang mencakup aspek implementasi kriptografi kuantum dan bagaimana sistem 6G dapat memenuhi standar keamanan global, termasuk dalam hal perlindungan privasi konsumen [10]. Pengaturan kebijakan keamanan yang komprehensif juga penting untuk menjamin kerahasiaan data di masa depan serta mengatur tanggung jawab penyedia layanan komunikasi dalam melindungi data konsumen.

1.2.3 Aspek Ekonomi

Aspek ekonomi menjadi salah satu faktor utama dalam pengembangan teknologi telekomunikasi generasi mendatang. Berikut adalah beberapa aspek penting yang berkaitan dengan implementasi teknologi cerdas berbasis machine learning dan keamanan kuantum:

1. *Machine Learning for Channel Estimation*

Penggunaan *machine learning for channel estimation* dalam bidang telekomunikasi dapat memberikan manfaat ekonomi yang signifikan. Dalam hal ini, AI mampu memberikan peluang pendapatan baru dengan mengurangi biaya produksi dan meningkatkan efisiensi operasional perusahaan. Dengan melakukan otomatisasi proses dan mengoptimalkan alokasi sumber daya, keberadaan *machine learning for channel estimation* dapat membantu *research and development* di bidang telekomunikasi dalam melakukan efisiensi pekerjaan dalam pemrosesan sinyal digital. Keunggulan ini memungkinkan perusahaan yang bergerak dalam bidang telekomunikasi untuk membagi fokus

dengan lebih terstruktur dalam memperbaiki kinerja keuangan, bertahan di tengah persaingan global, dan berinvestasi pada *research and development*. Dengan demikian, penerapan AI tidak hanya mendukung stabilitas operasional, tetapi juga memperkuat daya saing dan memfasilitasi pertumbuhan ekonomi jangka panjang [21].

2. Eksperimen Lapangan untuk Menghitung *Path Loss Exponent* pada Komunikasi 6G

Dalam aspek ekonomi, tantangan utama yang dihadapi adalah tingginya biaya yang diperlukan untuk mengembangkan jaringan 6G. Jangkauan sinyal yang lebih terbatas pada frekuensi 4.4–4.8 GHz, 7.125–8.4 GHz, dan 14.8–15.35 GHz berarti diperlukan lebih banyak base station dan relay node untuk menjamin cakupan jaringan yang memadai, terutama di wilayah urban yang padat. Penambahan infrastruktur ini membutuhkan investasi besar dari penyedia layanan, baik dalam hal perangkat keras maupun perangkat lunak yang mendukung teknologi seperti *massive MIMO* dan *beamforming*. Selain itu, biaya operasional dan pemeliharaan jaringan juga meningkat, mengingat lebih banyaknya elemen jaringan yang harus dikelola.

3. *Quantum Cryptography*

Investasi di bidang keamanan siber untuk teknologi 6G tidak hanya diperlukan untuk melindungi data, tetapi juga untuk memastikan keberlanjutan ekonomi digital di masa depan [22]. Biaya untuk mengembangkan sistem keamanan canggih, termasuk kriptografi kuantum, mungkin signifikan, namun kegagalan dalam melindungi infrastruktur komunikasi bisa menyebabkan kerugian ekonomi yang jauh lebih besar. Industri telekomunikasi harus siap mengalokasikan sumber daya yang besar untuk riset dan pengembangan teknologi keamanan yang kompatibel dengan 6G. Selain itu, keamanan yang lebih tinggi dapat menjadi keunggulan kompetitif bagi penyedia layanan, yang berpotensi meningkatkan loyalitas pelanggan dan menarik investasi asing. Pasar global untuk teknologi keamanan 6G diprediksi akan terus berkembang, dengan perusahaan teknologi berinovasi untuk menyediakan solusi keamanan yang efektif di ekosistem jaringan yang lebih terhubung dan kompleks.

1.2.4 Aspek Lingkungan

Pengembangan teknologi telekomunikasi generasi mendatang juga harus memperhatikan dampak lingkungan. Berikut adalah beberapa cara teknologi ini dapat

mendukung keberlanjutan lingkungan:

1. *Machine Learning for Channel Estimation*

Dari aspek lingkungan, AI mendorong *energy efficiency* dan *sustainability* di berbagai sektor, pada khususnya industri telekomunikasi. Dalam hal ini, AI dapat menangani tantangan utama dan membuka peluang baru untuk pertumbuhan dan keberlanjutan dalam penanganan kualitas jaringan telekomunikasi [21]. Teknologi ini memungkinkan operator untuk beradaptasi dengan dinamika industri sekaligus memperkuat komitmen terhadap pembangunan berkelanjutan. Hal ini menjadikan kehadiran *machine learning for channel estimation* diharapkan dapat membantu menjawab salah satu atau lebih aspek dari empat *overarching aspects* pada IMT-2030, yakni *sustainability*, *connecting the unconnected*, *ubiquitous intelligence*, dan *security/resilience*, terutama sesuai fokus *research* ini yakni untuk meningkatkan *air interface* pada *6G communication system* dengan menghadirkan *machine learning for channel estimation* [10].

Pengembangan teknologi 6G membutuhkan spektrum yang lebih banyak. Teknologi 6G, yang diharapkan menawarkan kecepatan data yang lebih tinggi, latensi rendah, dan koneksi yang lebih stabil, akan membutuhkan lebih banyak spektrum, terutama pada frekuensi yang lebih tinggi seperti mmWave dan sub-THz. Seiring dengan meningkatnya penggunaan jaringan seluler dan teknologi lainnya, permintaan terhadap spektrum frekuensi yang lebih luas juga semakin meningkat. Kepadatan frekuensi di mana banyak perangkat dan jaringan menggunakan frekuensi yang sama atau berdekatan bisa menyebabkan interferensi, terutama jika frekuensi tersebut tidak dikelola dengan baik.

1.3 Analisis Solusi Saat Ini

Bagian ini menjelaskan solusi-solusi yang saat ini tersedia dalam pengembangan dan implementasi sistem telekomunikasi generasi mendatang.

1.3.1 *Machine Learning for Channel Estimation*

Terdapat beberapa solusi yang pernah diusulkan para *researcher* terkait *machine learning for channel estimation*. Paper [23, 24] menyatakan bahwa *Least Squares (LS)* merupakan salah satu metode *channel estimation* yang biasa digunakan karena keunggulannya yang *low cost* dan *low computational* tanpa meli-

batkan statistik informasi mengenai saluran terkait. Namun, metode tersebut memiliki kelemahan, yakni secara relatif menghasilkan probabilitas *error* yang tinggi, terutama pada *multipath channel*. Oleh karena itu, *researchers* pada [1] mengusulkan tiga buah arsitektur *channel estimation* berbasis *deep learning* dalam rangka meningkatkan hasil estimasi kanal yang diperoleh melalui pendekatan *Least Squares (LS) estimation*. Tiga arsitektur tersebut di antaranya, *Fully Connected DNN (FDNN)*, *Convolutional neural network (CNN)*, dan *Bidirectional LSTM (Bi-LSTM)*. Hasil menunjukkan bahwa FDNN mampu mengurangi *bit error ratio* sebagai fungsi dari *SNR levels*. Selain itu, Bi-LSTM juga menunjukkan adanya reduksi *channel estimation error* terbaik dibandingkan dengan dua algoritma lainnya (CNN dan FDNN). Hal ini karena kemampuan arsitektur Bi-LSTM dalam memanfaatkan *time and frequency correlations* antar saluran.

Di sisi lain, metode tradisional *Minimum Mean Square Error (MMSE)* untuk mengestimasi kanal juga menunjukkan adanya kualitas *channel estimation* yang lebih baik dibandingkan LS dengan meminimalisasi rata-rata *channel estimation error* [25]. Tetapi, MMSE juga cukup sulit untuk diimplementasikan karena metode ini biasanya memiliki *high computational complexity* dan sangat sulit diperoleh karena berubah dengan cepat dalam waktu koherensi yang singkat [26,27]. Adapun hasil dari implementasi *Convolutional neural network (CNN) based channel estimation* di *mmWave Massive MIMO system* menunjukkan adanya pengurangan *noise* pada saluran yang diestimasi. Hal ini menunjukkan adanya keunggulan metode *CNN based channel estimation* dibandingkan pendekatan tradisional [28].

Selain itu, CNN juga menunjukkan adanya peningkatan kualitas estimasi saluran dengan menggunakan sedikit pilot. Tetapi, penulis dari paper ini tidak mempertimbangkan pengaruh frekuensi Doppler yang dapat menyebabkan perubahan *channel* secara signifikan dan membuat *channel* menjadi tidak stasioner [29]. Arsitektur *channel estimation* lain juga dibahas pada [30, 31] menggunakan *Long short-term memory (LSTM)* dan *Gated Recurrent Unit (GRU)*. Hasil menunjukkan bahwa metode tersebut dapat memprediksi korelasi jangka panjang dari efektivitas saluran transmisi. Namun, *papers* ini hanya mempertimbangkan *channel estimation* di sistem *Single-Input Single-Output (SISO)*, sehingga evaluasi terhadap penggunaan *recurrent neural network for channel estimation* di bawah pengaruh efek Doppler pada sistem *Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)* yang sudah secara luas diterapkan pada *modern wireless communication systems* [1].

Di sisi lain, penerapan *DNN-based channel estimation* juga menunjukkan adanya efisiensi penggunaan *pilots* sinyal untuk mengestimasi saluran di *underwater channels* [32]. Model DNN juga digunakan untuk mengestimasi saluran

sesuai standar IEEE 802.11p untuk mengetahui *the channel correlation* pada *domain* waktu dan frekuensi [33]. Dengan demikian, struktur DNN dapat disimpulkan mampu memberikan *channel estimation* yang lebih baik dibandingkan dengan metode *channel estimation* tradisional *Least Square (LS)* dan *Linear Minimum Mean Square Error (LMMSE)* [1].

Selain itu, pendekatan algoritma *machine learning* lainnya juga dilakukan oleh [34] menggunakan *Gaussian Process Regression (GPR)-based machine learning*. Hasil menunjukkan bahwa performa *GPR-based ML* dapat dibandingkan dengan kompleksitas pemakaian *neural network-based ML for channel estimation*. Pendekatan algoritma *machine learning* perlu dilakukan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi penggunaannya dalam *signal processing*, pada khususnya untuk melakukan *channel estimation* pada sistem komunikasi *5G Advanced and Beyond*.

1.3.2 Eksperimen Lapangan untuk mendapatkan *Path Loss Exponent* pada Komunikasi 6G

Eksperimen lapangan untuk mengukur *path loss exponent* pada komunikasi 6G menggunakan model propagasi dari ITU-R P.1411-9 dan 3GPP TR 38.901 sebagai acuan utama. Model ITU-R P.1411-9 memberikan pendekatan untuk propagasi di lingkungan perkotaan dan suburban pada frekuensi tinggi [35]. Sementara itu, 3GPP TR 38.901 menyediakan parameter dan model propagasi untuk frekuensi mmWave dan *terahertz* yang relevan dengan jaringan 6G [20]. Penggunaan kedua model ini memastikan hasil pengukuran yang akurat dan sesuai dengan kondisi propagasi di berbagai lingkungan. Eksperimen ini dilakukan dengan perangkat seperti USRP, *spectrum analyzer*, dan antena horn untuk menangkap sinyal pada frekuensi 6G.

1.3.3 *Quantum Cryptography*

Berbagai pengembangan protokol QKD telah dilakukan dan dilaporkan. Penulis [36] mengembangkan protokol E91 untuk komunikasi jarak jauh. Penulis [37] mengeksplorasi generalisasi dari protokol kriptografi kuantum E91. Qubit digantikan dengan qudit, yaitu sistem dengan dimensi N atau d . Penulis [38] mengembangkan protokol E91 dengan menghasilkan qubit berdasarkan *quantum dot*. Penulis [39] meninjau keamanan protokol E91 dengan berbagai strategi serangan. Penulis [40] mengusulkan dua protokol baru yang terinspirasi dari protokol E91 untuk meningkatkan efisiensi pertukaran kunci. Penulis [41] meneliti kekuatan protokol E91 dalam QKD. Dalam era isu keamanan, beberapa perkembangan telah

dilakukan untuk mengembangkan protokol E91 QKD guna menyelesaikan masalah kriptografi klasik dan meningkatkan keamanan dalam komunikasi berbasis *entanglement*. Selain upaya-upaya ini, penulis [42] mengusulkan penggunaan kriptografi kuantum dengan dua keadaan yang tidak ortogonal, sementara penulis [43] memperkenalkan konsep kriptografi kuantum dengan kunci anonim dan komitmen bit kuantum yang aman secara tak bersyarat.

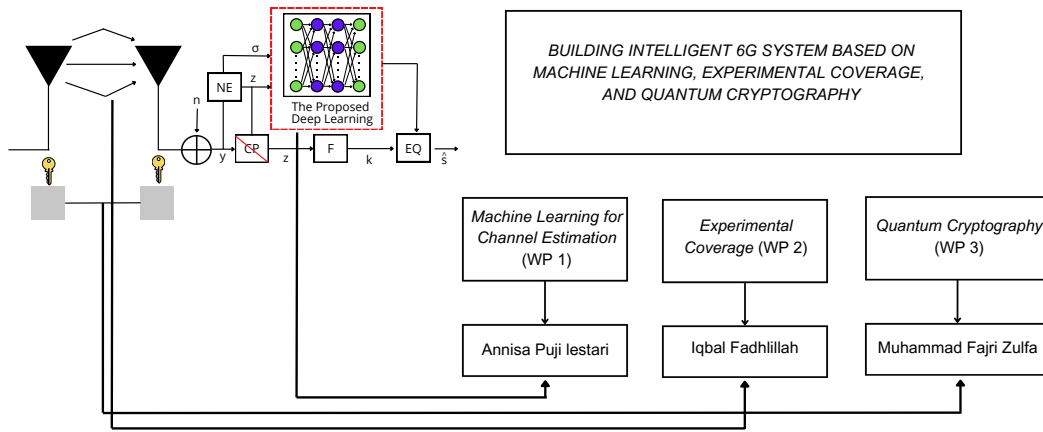
1.4 Tujuan Penelitian Tugas Akhir

Tujuan utama dari penelitian ini adalah membangun sistem 6G cerdas berdasarkan *machine learning*, *coverage*, dan *quantum cryptography*. Penelitian ini berupaya untuk memberikan *impact* pada komunikasi masa depan. Hasil penelitian ini digunakan untuk memperluas cakupan jaringan, serta meningkatkan keamanan transmisi data dalam lingkungan komunikasi nirkabel. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat mendukung pengembangan teknologi komunikasi masa depan yang lebih cerdas dan responsif terhadap kebutuhan pengguna dan perubahan lingkungan jaringan.

1.5 Batasan Tugas Akhir

Penjelasan batasan untuk membangun sistem 6G cerdas sebagai berikut. Untuk menjaga fokus dan ruang lingkup penelitian agar lebih terarah serta dapat diselesaikan dalam waktu yang tersedia, maka penelitian Tugas Akhir ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Estimasi kanal hanya dilakukan menggunakan dua arsitektur *deep learning*, yaitu *Fully Connected Deep Neural Network (FDNN)* dan *Long Short-Term Memory (LSTM)*, tanpa membandingkan dengan metode *machine learning* lainnya seperti *CNN* atau *Bi-LSTM*.
2. Pengukuran *path loss exponent* dilakukan terbatas pada frekuensi 4.4–4.8 GHz, dengan jarak pengukuran 100 meter, 200 meter, 300 meter, 400 meter, dan 500 meter. Skenario yang digunakan yaitu LOS dan NLOS dengan kategori *sub urban* di daerah kampus Telkom University.
3. Implementasi QKD hanya menggunakan protokol E91 sebagai studi kasus, tanpa membahas secara rinci perbandingan implementasi teknis dengan protokol lain seperti BB84 secara fisik, kecuali pada simulasi performa. Simulasi dan eksperimen dilakukan dalam skenario yang dikontrol atau disimulasikan



Gambar 1.4 Manajemen proyek untuk membangun sistem 6G cerdas.

(*lab-scale* atau *real-world simulation*), bukan dalam *deployment* nyata secara luas pada sistem komunikasi 6G yang sebenarnya.

4. Fokus utama pada aspek teknis (estimasi kanal, pengukuran *coverage*, dan skema keamanan), tanpa menjelaskan aspek legal, sosial, atau komersialisasi dari teknologi 6G secara mendalam.

1.6 Manajemen proyek dan identifikasi *working package*

Bagian ini menjelaskan manajemen proyek dan identifikasi *working package* (WP). Gambar 1.4 menunjukkan manajemen proyek yaitu simulasi *machine learning for channel estimation* (WP 1) yang dikerjakan oleh Annisa Puji Lestari, *Experimental Coverage* dengan melakukan eksperimen lapangan (WP 2) yang dikerjakan oleh Iqbal Fadhlillah dan *Quantum Cryptography* (WP 3) dengan melakukan simulasi protokol E91 yang dikerjakan oleh M. Fajri Zulfa. Proyek Capstone Design ini dikelola secara kolaboratif dengan membagi fokus pekerjaan ke dalam empat *Working Package* (WP) yang masing-masing bertujuan untuk mengkaji aspek penting dalam pengembangan sistem komunikasi 6G cerdas. Masing-masing WP memiliki fokus penelitian, tanggung jawab anggota tim, dan keluaran dari masing-masing proyek untuk menjawab tantangan teknis dan keamanan dalam jaringan masa depan. Berikut adalah identifikasi dan penjelasan masing-masing WP:

1.6.1 Identifikasi WP 1 (Status Proyek: Selesai)

WP ini berfokus untuk memberikan kontribusi pada pengembangan 5G-*advanced and beyond*, terutama dalam rangka penemuan algoritma *machine learn-*

ing for signal processing yang dapat mengestimasi kanal pada kondisi *multipath frequency-selective fading channel* untuk menjawab tantangan kompleksitas *traditional method for channel estimation*. Model yang dikembangkan melibatkan FDNN dan LSTM untuk mendapatkan hasil estimasi kanal sesuai dengan performa *perfect channel estimation*.

1.6.2 Identifikasi WP 2 (Status Proyek: Selesai)

WP ini melakukan pengukuran dan analisis nilai *path loss exponent* pada kategori frekuensi 6G yaitu 4.4-4.8 GHz, menggunakan metode eksperimen lapangan mengacu standar ITU-R P.1411-9. Hasil ini bertujuan sebagai referensi dalam desain cakupan jaringan 6G yang lebih efisien dan akurat.

1.6.3 Identifikasi WP 3 (Status Proyek: Selesai)

WP ini mengevaluasi protokol QKD berbasis E91 dalam skenario nyata dengan penyesuaian dan kesalahan kanal. Fokusnya adalah meningkatkan keamanan komunikasi masa depan dari ancaman komputer kuantum.

Setiap WP memiliki *milestone* dan *deliverables* masing-masing, termasuk hasil eksperimen, simulasi, dan integrasi sistem. Koordinasi dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa semua WP saling mendukung dalam membentuk sistem 6G yang cerdas, adaptif, dan aman.