

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era digital yang berkembang pesat, kebutuhan akan konektivitas nirkabel yang cepat, andal, dan efisien menjadi tantangan utama, terutama di lingkungan urban dengan kepadatan pengguna dan perangkat yang sangat tinggi [1]. Teknologi *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) telah dikenal sebagai salah satu solusi dalam meningkatkan kapasitas jaringan, efisiensi spektral, dan kualitas transmisi data[2]. Dengan memanfaatkan banyak antena pada pemancar (*base station*) dan penerima (*user equipment*), sistem MIMO memungkinkan transmisi simultan dari beberapa aliran data, yang secara signifikan meningkatkan *throughput* jaringan[3].

Namun demikian, penerapan sistem MIMO di lingkungan urban masih menghadapi berbagai hambatan teknis. *Multipath fading* yang disebabkan oleh pantulan sinyal dari gedung dan struktur arsitektur menyebabkan distorsi sinyal yang kompleks. Selain itu, tingginya kepadatan pengguna juga menimbulkan interferensi ko-kanal, yang berdampak pada penurunan performa sistem dan *Bit Error Rate* (BER) yang tinggi[4]. Lingkungan urban yang dicerminkan oleh *multipath fading* dan interferensi tinggi akibat pantulan sinyal dari gedung dan kepadatan pengguna[4]. Teknologi MIMO menawarkan kapasitas tinggi dan ketahanan terhadap *fading*, unggul dibandingkan *Single Input Single Output* (SISO)/*Multiple Input Single Output* (MISO)[4]. Konfigurasi 2×2 sebagai *baseline* yang mendukung *beamforming* adaptif untuk komunikasi modern[5]. Dalam kondisi ini, strategi pengolahan sinyal yang lebih adaptif diperlukan untuk mempertahankan kualitas komunikasi[5].

Salah satu pendekatan dalam menghadapi tantangan tersebut adalah *beamforming* adaptif. *Beamforming* adalah teknik yang mengarahkan daya pancar atau penerimaan antena ke arah tertentu secara selektif, dengan tujuan memperkuat sinyal yang diinginkan sekaligus menekan gangguan dari arah lain[6]. Di lingkungan urban yang dinamis, di mana posisi pengguna dan kondisi kanal berubah cepat, algoritma

beamforming yang bersifat statis menjadi tidak efektif. Oleh karena itu, diperlukan algoritma yang dapat menyesuaikan bobot antena secara otomatis dan *real-time*[6].

Dalam konteks ini, salah satu teknik utama untuk mencapai *beamforming* adaptif adalah pembobotan, di mana bobot (amplitudo dan fase) untuk setiap elemen antena pada penerima dihitung dan diperbarui secara dinamis berdasarkan informasi kanal. Proses pembobotan ini dilakukan menggunakan algoritma *Recursive Least Squares* (RLS), yang memperbarui bobot secara iteratif dengan meminimalkan kesalahan kuadrat rata-rata antara sinyal yang diterima dan sinyal referensi. Dengan kemampuan memperbarui bobot *beamformer* secara *loop* berdasarkan kondisi kanal saat itu, metode ini mampu menurunkan tingkat *error*, dan mendorong efisiensi transmisi[7].

Tugas Akhir ini difokuskan pada rancangan dan implementasi *beamforming* adaptif di sisi penerima pada sistem MIMO dengan menggunakan pembobotan yang berbasis algoritma RLS, yang bertujuan untuk meningkatkan performa sistem komunikasi di lingkungan urban yang padat dan penuh interferensi.

1.2 Kajian Riset Terdahulu

Dalam beberapa tahun terakhir, *beamforming* adaptif telah menjadi salah satu topik utama dalam penelitian sistem komunikasi nirkabel, khususnya dalam konteks sistem MIMO yang dihadapkan pada interferensi tinggi. Tabel 1. 1 berikut memuat beberapa cantuman referensi utama dengan penelitian terkait.

Tabel 1. 1 Rujukan utama.

No.	Judul	Peneliti	Tahun
1.	<i>Elevating 5G Applications Performance: Harnessing Beamforming with MIMO Antennas</i> [8]	Kanwalinderjit Kaur, Jarl Christian Ramos, dkk	2024
2.	<i>A Deep Learning Framework for Adaptive Beamforming in Massive MIMO Systems Millimeter Wave 5G Multicellular Networks</i> [9]	Spyros Lavdas, Panagiotis K. Gkonis, dkk	2023
3.	<i>An Adaptive Hybrid Beamforming Approach for 5G-MIMO mmWave Wireless Cellular Networks</i> [10]	K. Koufos, N. N. Moghadam, dkk	2021

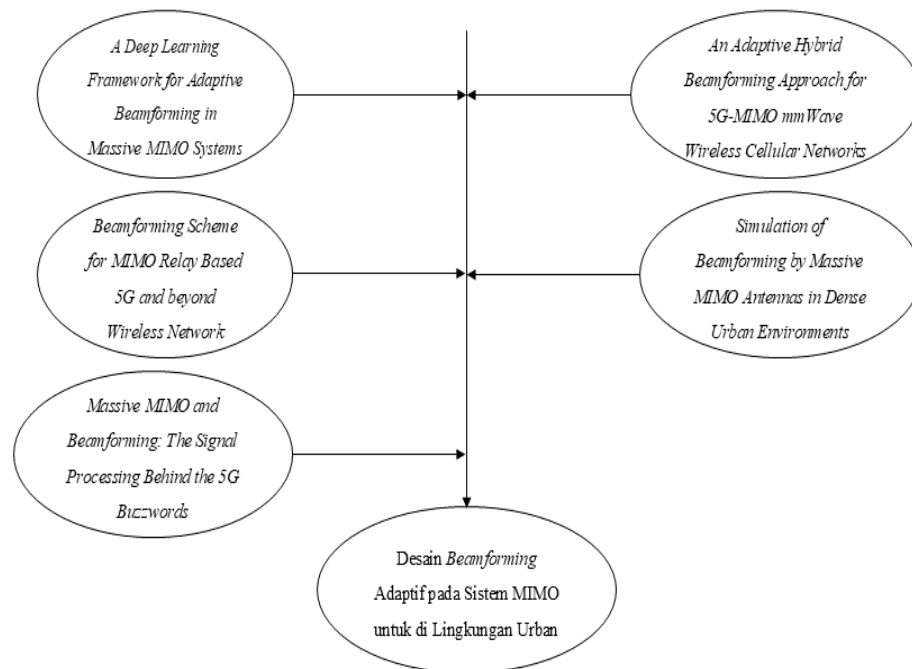
No.	Judul	Peneliti	Tahun
4.	<i>Beamforming Scheme for MIMO Relay Based 5G and beyond Wireless Network</i> [11]	A. Ali, B. Adoum, dkk	2021
5.	<i>Simulation of Beamforming by Massive MIMO Antennas in Dense Urban Environments</i> [12]	Gregory J. Skidmore, dkk	2021

Paper [8] mengeksplorasi penerapan beamforming pada sistem MIMO di lapisan fisik *Radio Access Network* (RAN) untuk meningkatkan kinerja jaringan 5G, dengan fokus pada penempatan antena yang strategis untuk mengoptimalkan observabilitas dan kinerja. Studi ini menunjukkan peningkatan signifikan pada *throughput*, rasio pengiriman paket, dan penurunan latensi dalam aplikasi seperti *streaming video* dan *augmented/virtual reality* di lingkungan urban. Temuan ini mendukung tujuan Tugas Akhir ini untuk meningkatkan kinerja sistem komunikasi di lingkungan urban yang kompleks.

Paper [9] dan [10] membahas pendekatan *beamforming* adaptif berbasis *deep learning* dan *hybrid*. Keduanya menekankan pentingnya penyesuaian pola pancar secara *real-time* untuk mengatasi perubahan kondisi kanal dan interferensi. Pendekatan tersebut canggih namun cenderung kompleks dan membutuhkan daya komputasi tinggi. Hal ini membuka peluang bagi pendekatan sederhana seperti RLS untuk dijadikan solusi yang lebih ringan dan stabil. Paper [11] menambahkan skema *relay* untuk meningkatkan efisiensi spektral pada sistem MIMO. Sementara itu, [12] dan [13] lebih fokus pada perilaku propagasi sinyal dan simulasi antena dalam lingkungan urban padat. Studi-studi ini menegaskan bahwa desain *beamforming* adaptif sangat penting untuk menghadapi tantangan khas kota seperti *multipath*, interferensi, dan mobilitas pengguna tinggi.

Berdasarkan kajian riset terdahulu, sebagian besar penelitian tentang *beamforming* adaptif pada sistem MIMO, seperti yang dilakukan oleh [9] dan [10], berfokus pada pendekatan *deep learning* atau *hybrid beamforming* untuk jaringan 5G mmWave, yang memerlukan daya komputasi tinggi dan kompleksitas implementasi

yang signifikan. Selain itu, penelitian [11] mengeksplorasi skema *relay* pada Massive MIMO, sementara [12] dan [13] lebih menekankan pada simulasi propagasi sinyal atau efisiensi spektral dalam lingkungan urban. Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini mengisi literatur dengan menerapkan algoritma *Recursive Least Squares* (RLS) pada sisi penerima dalam sistem MIMO 2×2 , yang menawarkan solusi sederhana, ringan secara komputasi, dan stabil untuk lingkungan urban dengan kanal Rayleigh *fading*. Dengan mengevaluasi metrik kinerja seperti *Bit Error Rate* (BER), *Mean Squared Error* (MSE), dan *throughput* secara komprehensif, Tugas Akhir ini tidak hanya memberikan wawasan tentang efektivitas RLS dalam mengatasi *multipath fading* dan interferensi tinggi, tetapi juga menawarkan pendekatan praktis untuk aplikasi pada sistem dengan sumber daya terbatas, seperti IoT atau komunikasi skala kecil di lingkungan urban. Dengan demikian, Tugas Akhir ini memberikan kontribusi akademik melalui analisis mendalam terhadap RLS dan kontribusi praktis dengan solusi yang lebih mudah diimplementasikan dibandingkan metode berbasis *deep learning* atau Massive MIMO.



Gambar 1.1 *State of the art* rujukan utama.

Gambar 1.1 mengilustrasikan hubungan Tugas Akhir ini dengan studi terdahulu, di mana Tugas Akhir ini mengisi gap dengan pendekatan RLS yang komputasinya ringan.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, berikut adalah rumusan masalah yang dapat diangkat pada Tugas Akhir ini :

1. Bagaimana rancangan dan implementasi algoritma *beamforming* adaptif berbasis *Recursive Least Squares* (RLS) pada sistem MIMO 2×2 untuk menghadapi tantangan interferensi tinggi dan *multipath fading* di lingkungan urban?
2. Sejauh mana efektivitas algoritma RLS dalam meningkatkan performa sistem komunikasi MIMO, ditinjau dari parameter *Bit Error Rate* (BER), konvergensi *error*, dan *throughput* pada kondisi kanal Rayleigh?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Adapun tujuan dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini berfokus pada :

1. Merancang dan mengimplementasikan algoritma *beamforming* adaptif berbasis *Recursive Least Squares* (RLS) pada sistem MIMO 2×2 menggunakan simulasi berbasis MATLAB.
2. Mengevaluasi performa algoritma yang diusulkan pada kanal *Rayleigh* dan interferensi tinggi, dengan menganalisis metrik *Bit Error Rate* (BER), dan *throughput* sebagai indikator kinerja sistem.

1.4.2 Manfaat

Pada Tugas Akhir ini diharapkan dapat memperoleh beberapa manfaat diantaranya :

1. Manfaat Akademis
Tugas Akhir ini diharapkan berkontribusi memperkaya khasanah keilmuan bidang telekomunikasi. Kajian terhadap performa algoritma berdasarkan

metrik *Bit Error Rate* (BER), dan *throughput* juga menambah literatur dalam bidang pemrosesan sinyal digital dan sistem komunikasi nirkabel.

2. Manfaat Praktis

Hasil dari Tugas Akhir ini dapat menjadi acuan dalam pengembangan sistem komunikasi nirkabel yang lebih adaptif dan efisien, khususnya di lingkungan urban yang padat dan penuh interferensi. Algoritma RLS yang diimplementasikan dapat diadopsi dalam skenario nyata seperti sistem 5G/6G atau IoT yang memerlukan adaptasi cepat terhadap kondisi kanal yang berubah-ubah.

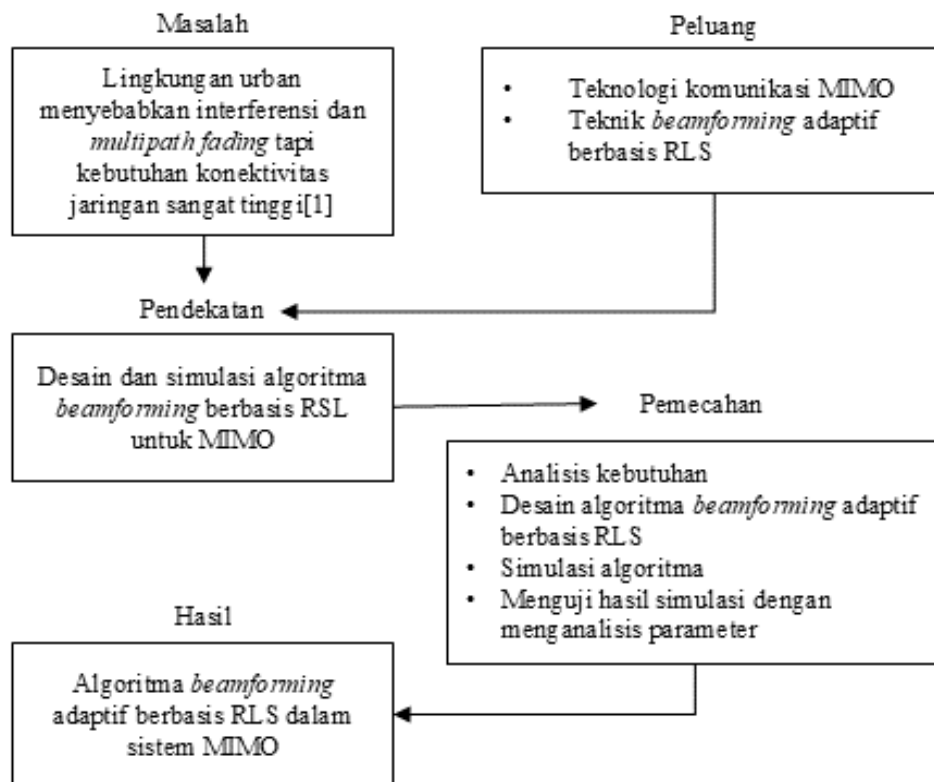
1.5 Batasan Masalah

Masalah yang berhubungan dengan fokus Tugas Akhir ini sangat luas, oleh karena itu penulis membatasi metode masalah yang berupa:

1. Tugas Akhir ini hanya menggunakan sistem MIMO sebagai teknologi komunikasi utama.
2. Area kajian dibatasi pada lingkungan urban yang dilambangkan oleh kanal Rayleigh *fading* dengan kepadatan pengguna tinggi dan dibatasi pada penerima.
3. Tugas Akhir ini berfokus pada *user* yang keduanya dalam kondisi diam.
4. Tugas Akhir berfokus pada penurunan *Bit Error Rate* (BER) dan peningkatan *throughput*.
5. Evaluasi kinerja algoritma *beamforming* adaptif dilakukan berdasarkan parameter spesifik seperti *Bit error rate* (BER) dan *throughput*.
6. Tugas Akhir terbatas pada implementasi dan evaluasi *beamforming* adaptif.
7. Konfigurasi kanal yang digunakan dalam penelitian ini adalah matriks MIMO 2x2.
8. Studi dilakukan dengan simulasi berbasis perangkat lunak MATLAB.

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka pemikiran yang mendasari Tugas Akhir ini dijelaskan pada Gambar 1.2



Gambar 1.2 Kerangka berpikir penelitian tugas akhir.

Kerangka berpikir dimulai dengan adanya sebuah masalah lalu dilanjutkan dengan peluang yang akan mengarah ke pendekatan, setelah pendekatan diteliti cara menanganinya yang muncul sebuah solusi yang diteliti.

1.7 Sistematika Penulisan

Tugas akhir harus ditulis secara metodelis dan disusun dalam tiga bab, yang masing masing bab mempunyai beberapa subbab. Bab-bab tersebut adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang yang menjelaskan pentingnya penelitian terkait pengembangan desain *beamforming* adaptif untuk MIMO di lingkungan urban. Rumusan masalah dirumuskan berdasarkan tantangan utama dalam sistem komunikasi, seperti interferensi tinggi dan *multipath fading*. Selanjutnya, bab ini memuat tujuan penelitian yang menjelaskan hasil yang ingin dicapai serta manfaat penelitian, baik untuk akademis, industri telekomunikasi, maupun masyarakat luas.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini mencakup penjelasan teoritis dan kajian literatur yang relevan dengan penelitian. Konsep dasar sistem komunikasi MIMO, *beamforming* adaptif, serta parameter parameter yang akan digunakan dijelaskan secara rinci.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan ketika melakukan penelitian mengenai desain *beamforming* adaptif pada sistem MIMO untuk meningkatkan kinerja di lingkungan urban.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab ini menjelaskan tahapan perancangan sistem komunikasi MIMO 2×2 yang menerapkan *beamforming* adaptif menggunakan algoritma *Recursive Least Squares* (RLS) di sisi penerima. Pembahasan meliputi arsitektur sistem secara keseluruhan, konfigurasi kanal, skema pelatihan dan pengujian, serta implementasi algoritma RLS. Di akhir bab ini juga dijelaskan parameter simulasi yang digunakan dalam lingkungan MATLAB.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL

Bab ini membahas hasil pengujian sistem berdasarkan simulasi yang telah dilakukan. Analisis dilakukan terhadap berbagai metrik kinerja seperti *Bit Error Rate*

(BER), konvergensi *error*, *Mean Squared Error* (MSE), dan *throughput*. Perbandingan performa sistem dilakukan pada tiga skenario kanal, yaitu *theoretical* Rayleigh, Rayleigh tanpa *beamforming*, dan Rayleigh dengan *beamforming* RLS..

BAB VI PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan atau penelitian selanjutnya. Kesimpulan disusun berdasarkan tujuan yang telah ditetapkan, sedangkan saran ditujukan sebagai masukan untuk peningkatan metode atau perluasan cakupan penelitian di masa mendatang..

