



Konektivitas 5G Indoor Berbantuan RIS: Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi Berdasarkan Biaya, Cakupan, dan Return on Investment

Devi Rahmayanti

Teknik Elektro Universitas Gajayana, Indonesia

*Penulis Rekomendasi: devi@unigamalang.ac.id

Abstract. The development of 5G is driving the need for quality indoor connectivity, especially since high-value digital activities take place in many buildings, while signal propagation is hampered by walls, glass, concrete, multipath fading, and non-line-of-sight conditions. Conventional solutions, such as small cells, are able to expand coverage but increase CAPEX, OPEX, backhaul needs, energy, and maintenance. This study aims to evaluate the techno-economic feasibility of indoor 5G connectivity assisted by Reconfigurable Intelligent Surface (RIS), as well as filling research gaps that have so far emphasized the technical performance of RIS rather than cost, coverage, and return on investment. The method used is a comparative techno-economic simulation by comparing three implementation scenarios, namely indoor, small cell, and RIS-assisted indoor 5G baseline in an area with a simulated area of 1,500 m². Technical evaluations include covered areas, blank spots, and increased coverage, while economic evaluations include CAPEX, OPEX, total cost of ownership, cost per covered area, payback period, and ROI. The results of the study show that RIS is a viable solution for increasing indoor coverage efficiently, especially in blank spot areas, corridors, service rooms, and buildings with budget constraints. The implications of the study confirm the importance of integrating wireless performance analysis with telecommunications economic management before operators strategically make indoor 5G network investment decisions.

Keywords: 5G indoor; Network Coverage; Reconfigurable Intelligent Surface; Return on Investment; Small cell

Abstrak. Perkembangan 5G mendorong kebutuhan konektivitas indoor yang berkualitas, terutama karena aktivitas digital yang bernilai ekonomi tinggi banyak berlangsung di gedung, sementara propagasi sinyal terhambat dinding, kaca, beton, multipath fading, dan kondisi non-line-of-sight. Solusi konvensional seperti small cell mampu memperluas cakupan, tetapi meningkatkan CAPEX, OPEX, kebutuhan backhaul, energi, dan pemeliharaan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan tekno-ekonomi konektivitas 5G indoor berbantuan Reconfigurable Intelligent Surface (RIS), sekaligus mengisi kesenjangan riset yang selama ini lebih menekankan performa teknis RIS daripada biaya, cakupan, dan Return on Investment. Metode yang digunakan adalah simulasi tekno-ekonomi komparatif dengan membandingkan tiga skenario implementasi, yaitu baseline 5G indoor, small cell, dan RIS-assisted 5G indoor pada area dengan luas wilayah simulasi 1.500 m². Evaluasi teknis mencakup area tercapuk, blank spot, dan peningkatan cakupan, sedangkan evaluasi ekonomi mencakup CAPEX, OPEX, total cost of ownership, biaya per area tercapuk, payback period, dan ROI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RIS merupakan solusi layak untuk peningkatan cakupan indoor secara efisien, terutama pada area blank spot, koridor, ruang layanan, dan gedung dengan keterbatasan anggaran. Implikasi penelitian menegaskan pentingnya mengintegrasikan analisis performa wireless dengan manajemen ekonomi telekomunikasi sebelum operator mengambil keputusan investasi jaringan 5G indoor secara strategis.

Kata kunci: 5G Dalam Ruangan; Cakupan Jaringan; Permukaan Cerdas Yang Dapat Dikonfigurasi Ulang; Sel Kecil Jaringan Telekomunikasi; Tingkat Pengembalian Investasi

1. LATAR BELAKANG

Pertumbuhan jaringan 5G menunjukkan bahwa persoalan utama industri telekomunikasi tidak lagi terbatas pada perluasan cakupan, tetapi semakin bergeser pada kualitas konektivitas, efisiensi biaya, dan kelayakan investasi (Andrews et al., 2014). ITU melaporkan bahwa pada tahun 2025 terdapat sekitar 6 miliar pengguna internet secara global, tetapi masih ada 2,2 miliar orang yang belum terhubung. Pada saat yang sama, 5G telah menjangkau lebih dari separuh populasi dunia dan menyumbang lebih dari sepertiga total

langganan *mobile broadband*. Fakta ini menunjukkan bahwa adopsi 5G telah memasuki fase masif, tetapi masih menyisakan persoalan kualitas, keterjangkauan, dan efisiensi investasi jaringan (Data ITU, Geneva, 17 November 2025).

Fenomena tersebut menjadi semakin penting terkait konektivitas 5G *indoor*, karena sebagian besar aktivitas digital bernilai ekonomi tinggi berlangsung di dalam gedung, seperti perkantoran, kampus, rumah sakit, pusat perbelanjaan, bandara, pabrik, dan fasilitas publik. Ericsson menunjukkan bahwa pada satu area perkotaan padat dengan gedung bertingkat, sekitar 37% *trafik macrocell* pada jam sibuk dilayani kepada pengguna *indoor*. Ini mengindikasikan bahwa jaringan *outdoor macrocell* masih menanggung beban *trafik indoor* yang signifikan, sehingga kebutuhan terhadap solusi *in-building coverage* menjadi semakin strategis (Report, 2021; Rappaport et al., 2013)

Tantangan teknis 5G *indoor* terutama muncul karena penggunaan pita frekuensi yang lebih tinggi, peningkatan kepadatan pengguna, serta hambatan propagasi akibat dinding, kaca, beton, *multipath fading*, dan kondisi *non-line-of-sight*. Ericsson juga melaporkan bahwa 5G telah mencapai sekitar sepertiga dari total *mobile subscriptions*, sementara *trafik data mobile* tumbuh sekitar 20% antara Q3 2024 dan Q3 2025. Pertumbuhan *trafik* ini memperkuat urgensi solusi *indoor* yang tidak hanya meningkatkan cakupan dan kapasitas, tetapi juga layak secara ekonomi bagi operator, pemilik gedung, dan pelanggan *enterprise* (Report, 2025; Sun et al., 2014)

Solusi yang biasa dipergunakan untuk meningkatkan kualitas jaringan *indoor* umumnya mencakup *small cell*, *femtocell*, *distributed antenna system*, *repeater*, atau densifikasi radio access network. Namun, solusi tersebut menimbulkan konsekuensi ekonomi berupa peningkatan *capital expenditure*, *operational expenditure*, biaya instalasi, biaya energi, biaya *backhaul*, biaya pemeliharaan, dan kompleksitas manajemen jaringan. Gedel & Nwulu (2021) menegaskan bahwa implementasi 5G menjadi mahal bagi *mobile network operators* karena kebutuhan arsitektur jaringan dan teknologi radio *base station* yang lebih kompleks; studi mereka juga memodelkan CAPEX, OPEX, dan total *cost of ownership* untuk arsitektur jaringan 5G (Gedel & Nwulu, 2021; Checko et al., 2015).

Dalam literatur tekno-ekonomi telekomunikasi, evaluasi teknologi *wireless* baru perlu mengintegrasikan indikator teknis dan indikator finansial. Oughton & Lehr (2022) menyatakan bahwa *tekno-economic assessment* merupakan teknik fundamental untuk mengevaluasi teknologi komunikasi baru, khususnya ketika 5G telah masuk fase *deployment* komersial dan 6G mulai dikaji. Kumar & Oughton (2023) juga menunjukkan bahwa model *infrastructure sharing* pada 5G dapat menurunkan total *cost* sekitar 10 - 50% dan meningkatkan *net present*

value sekitar 30 - 90% dibanding strategi tanpa sharing. Temuan ini menunjukkan bahwa keputusan teknologi jaringan harus diuji melalui simulasi biaya, sensitivitas pendapatan, adopsi pengguna, dan utilisasi infrastruktur (Oughton & Lehr, 2022).

Pada kasus ini, *Reconfigurable Intelligent Surface* (RIS) muncul sebagai alternatif teknologi yang menjanjikan untuk meningkatkan kualitas *propagasi wireless* tanpa selalu menambah *base station* aktif. RIS merupakan permukaan elektromagnetik terprogram yang dapat mengatur pantulan, fase, amplitudo, atau polarisasi gelombang radio sehingga lingkungan *propagasi* dapat dikendalikan. Dajer et al. (2022) menjelaskan bahwa RIS berpotensi meningkatkan performa jaringan *wireless* generasi berikutnya dengan cara mengadaptasi lingkungan *propagasi*, sekaligus menyoroti aspek-aspek yang menentukan kelayakan komersial *deployment* masa depan (Dajer et al., 2022).

Kajian terbaru juga menunjukkan bahwa RIS mulai bergerak dari konsep teoretis menuju validasi lapangan. Zheng et al. (2023) melakukan *field trial* RIS pada skenario *outdoor* dan *indoor*, serta menunjukkan bahwa RIS-assisted communication dapat meningkatkan kualitas kanal dan cakupan jaringan melalui kemampuan *programmable electromagnetic properties*. Wang et al. (2024) kemudian meneliti *coverage analysis* dan *deployment design* pada sistem RIS-assisted, dengan menunjukkan bahwa parameter penempatan RIS berpengaruh terhadap *coverage area gain* dan bahwa posisi RIS dekat *base station* dapat memberikan manfaat cakupan jarak jauh yang lebih besar (Zheng et al., 2023).

Penelitian terbaru memperkuat bahwa RIS diposisikan sebagai teknologi penting untuk 5G-Advanced dan 6G karena mampu menawarkan peningkatan cakupan, efisiensi energi, dan adaptabilitas jaringan. Iqbal et al. (2025) menyatakan bahwa RIS menawarkan pendekatan low-power dan *cost-efficient* untuk meningkatkan *spectral efficiency*, *signal coverage*, dan *network adaptability*. Namun, mereka juga menekankan bahwa RIS masih menghadapi tantangan besar, termasuk akuisisi *channel state information*, *skalabilitas hardware*, adaptasi lingkungan dinamis, dan risiko keamanan (Iqbal et al., 2025).

Khusus pada pembahasan transmisi *indoor*, studi terbaru menunjukkan bahwa RIS relevan untuk mengatasi kondisi propagasi asimetris, *non-line-of-sight*, dan *fairness* pengguna. Sebuah studi tahun 2026 pada sistem RIS-assisted NOMA dengan model kanal 3GPP *indoor office* menunjukkan bahwa penggandaan ukuran RIS *array* dapat menghasilkan peningkatan *ergodic max-min rate* sekitar 66% pada tingkat daya transmisi moderat. Studi tersebut juga menegaskan bahwa RIS *indoor* perlu dianalisis dengan mempertimbangkan *link-budget* realistis, *imperfect successive interference cancellation*, *imperfect channel state information*, dan *implementation loss* (Velmurugan et al., 2026).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian RIS masih berfokus pada metrik teknis seperti *beamforming*, *channel estimation*, *spectral efficiency*, *received signal strength*, *outage probability*, dan *energy efficiency*. Masih relatif terbatas penelitian yang secara eksplisit menguji apakah RIS layak secara ekonomi dibandingkan alternatif *deployment indoor* lain seperti *small cell* atau *distributed antenna system*. Dengan demikian, terdapat gap penting pada integrasi antara performa wireless dan indikator ekonomi-manajemen, khususnya biaya *deployment*, *cost per coverage area*, *total cost of ownership*, *payback period*, *net present value*, dan *return on investment*.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian berjudul “Konektivitas 5G Indoor Berbantuan RIS: Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi Berdasarkan Biaya, Cakupan, dan Return on Investment” menjadi relevan dan penting untuk dilakukan. Penelitian ini dapat mengisi gap dengan membandingkan skenario konektivitas *indoor*, misalnya *baseline 5G indoor* tanpa RIS, *deployment small cell*, dan *deployment RIS-assisted indoor 5G*. Kontribusi utama penelitian terletak pada pengembangan model evaluasi yang menggabungkan indikator teknis, seperti cakupan, *path loss*, *received signal strength*, dan *outage area*, dengan indikator ekonomi seperti CAPEX, OPEX, *total cost of ownership*, *payback period*, dan ROI. Dengan demikian, studi ini tidak hanya menjawab apakah RIS meningkatkan performa jaringan, tetapi juga apakah RIS merupakan pilihan investasi yang lebih layak secara manajerial bagi operator dan pemilik infrastruktur *indoor*.

2. KAJIAN TEORITIS

Reconfigurable Intelligent Surface

Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) merupakan salah satu teknologi dalam pengembangan jaringan nirkabel generasi lanjut karena kemampuannya untuk mengubah lingkungan *propagasi* radio menjadi lebih terkontrol. Berbeda dari konsep dasar jaringan *wireless cellular* yang hanya mengoptimalkan pemancar, penerima, dan alokasi sumber daya radio, RIS memungkinkan permukaan pasif atau semi-pasif mengatur refleksi, fase, amplitudo, dan arah rambat gelombang elektromagnetik. Dajer et al. (2022) menjelaskan bahwa RIS memberikan peluang baru bagi jaringan *wireless* masa depan karena mampu meningkatkan performa jaringan dengan cara mengadaptasi lingkungan *propagasi*, sekaligus menyoroti bahwa kelayakan komersial dan *deployment* praktis masih menjadi aspek penting yang perlu dikaji lebih lanjut (Dajer et al., 2022).

Secara konseptual, RIS berkaitan erat dengan gagasan smart radio environment, yaitu lingkungan komunikasi yang tidak lagi bersifat pasif, tetapi dapat dikonfigurasi untuk mendukung peningkatan *coverage*, *spectral efficiency*, *energy efficiency*, *reliability*, dan *security*. Huang et al. (2022) menegaskan bahwa RIS dipandang sebagai teknologi potensial untuk sistem komunikasi 6G karena keunggulannya dalam mengendalikan *propagasi* sinyal melalui karakterisasi kanal dan pemodelan kanal berbantuan permukaan cerdas. Kajian tersebut juga menunjukkan bahwa pengukuran kanal, *path-loss* model, dan *small-scale fading* model menjadi fondasi penting untuk mengembangkan RIS dari konsep teoretis menuju aplikasi jaringan nyata (Huang et al., 2022).

Perkembangan RIS juga mulai bergerak dari studi konseptual menuju arsitektur jaringan dan skenario *deployment*. Alexandropoulos et al. (2023) menyatakan bahwa RIS merupakan *enabler* utama bagi *programmable electromagnetic propagation environments*, dengan aplikasi pada konektivitas, reliabilitas, lokalisasi, *sensing*, keberlanjutan, dan keamanan jaringan. Studi tersebut memperkenalkan metrik *bandwidth of influence* dan *area of influence*, yang menunjukkan bahwa dampak RIS terhadap jaringan sangat bergantung pada frekuensi, posisi, lingkungan, serta area yang dapat dipengaruhi oleh konfigurasi permukaan tersebut (Alexandropoulos et al., 2023).

RIS guna Konektivitas dan Cakupan *Indoor*

Konektivitas *indoor* merupakan salah satu bahasan paling relevan untuk penerapan RIS karena lingkungan dalam gedung sering mengalami pelemahan sinyal akibat dinding, kaca, beton, *multipath fading*, dan kondisi *non-line-of-sight*. Pada jaringan 5G, persoalan ini menjadi lebih kompleks karena penggunaan pita frekuensi yang lebih tinggi, termasuk *mid-band* dan *millimeter-wave*, cenderung menghasilkan path loss yang lebih besar. Oleh sebab itu, RIS dapat digunakan sebagai elemen pengarah sinyal untuk memperkuat sinyal di area *blind spot*, memperbaiki kualitas kanal, dan mengurangi kebutuhan penambahan perangkat aktif seperti *small cell* atau *repeater*.

Zheng et al. (2023) melakukan penelitian melalui uji coba di lapangan menggunakan *channel modeling* RIS pada dua kondisi yaitu *outdoor* dan *indoor*. Studi tersebut menunjukkan bahwa RIS-assisted communication dapat meningkatkan kualitas kanal dan *coverage* jaringan, serta mengembangkan model *path loss*, *radiation pattern*, dan *mirror beam effect* untuk RIS 1-bit pada pita sub-6 GHz. Temuan ini penting bagi penelitian konektivitas 5G *indoor* karena menunjukkan bahwa RIS bukan hanya konsep teoretis, melainkan sudah diuji melalui pengukuran dan validasi lapangan (Zheng et al., 2023).

Wang et al. (2024) memperkuat relevansi RIS dari sisi desain cakupan sistem. Mereka menganalisis bagaimana *deployment* RIS memengaruhi *cell coverage* melalui metrik *coverage area gain*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penempatan RIS dekat dengan *base station* lebih menguntungkan untuk memperoleh cakupan jarak jauh, dan *coverage area gain* dapat dijaga relatif konstan selama rasio antara jumlah elemen RIS dan jarak *deployment* RIS terhadap *base station* tetap dipertahankan. Temuan ini mendukung perlunya penelitian yang tidak hanya menilai performa RIS, tetapi juga menentukan posisi dan konfigurasi *deployment* yang paling efisien (Wang et al., 2024).

Studi *indoor* terbaru juga memperlihatkan bahwa RIS tidak hanya meningkatkan komunikasi data, tetapi juga dapat mendukung layanan lokalisasi. Shah et al. (2024) melakukan analisis eksperimental pada sistem *indoor localisation* berbasis RIS dan *machine learning*. Hasilnya menunjukkan bahwa integrasi RIS dapat meningkatkan akurasi lokalisasi *indoor* hingga 82,4%, dengan performa dipengaruhi oleh kondisi RIS, jenis antena, dan konfigurasi komunikasi. Meskipun fokus utama studi tersebut adalah lokalisasi, hasilnya relevan bagi penelitian ini karena menunjukkan bahwa RIS dapat meningkatkan kualitas lingkungan radio *indoor* secara nyata dan terukur (Shah et al., 2024).

Optimasi Implementasi Teknologi RIS dan Implikasi terhadap Biaya Infrastruktur

Masalah utama dalam penerapan RIS bukan hanya apakah RIS mampu meningkatkan cakupan, tetapi di mana RIS harus ditempatkan, berapa ukuran permukaan yang dibutuhkan, dan bagaimana beam-steering target ditentukan agar manfaat teknis sebanding dengan biaya *deployment*. Kilcioglu & Oestges (2025) mengembangkan *framework* optimasi *deployment* RIS berbasis *ray-tracing* untuk meningkatkan cakupan *indoor*. Studi tersebut secara simultan menentukan posisi RIS, ukuran RIS, dan target *beam-steering*, dengan mempertimbangkan *blind spot* dan *threshold path gain* minimum. Penelitian tersebut juga memasukkan pertimbangan ukuran RIS sebagai keseimbangan antara peningkatan performa dan biaya *hardware*, sehingga sangat relevan untuk studi *tekno-ekonomi* (Kilcioglu & Oestges, 2025).

Khafagy et al. (2025) memperlihatkan perkembangan desain RIS untuk lingkungan *indoor mmWave* melalui *low-complexity M-shaped reconfigurable intelligent meta-surface* yang beroperasi pada 24,12 GHz. Studi tersebut menggunakan konfigurasi *array* 16×16 , 32×32 , dan 64×64 elemen dengan jarak 0,5λ, serta menunjukkan peningkatan *received signal power* hingga 15 dB pada simulasi *indoor*. Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa desain RIS berbiaya rendah, ringan, dan *wall-mounted* mulai diarahkan pada aplikasi *indoor* seperti ruang rapat, kantor, dan ruang konferensi (Khafagy et al., 2025).

Namun demikian, berbagai studi penerapan RIS tersebut lebih dominan pada optimasi teknis, seperti *coverage map*, *path loss*, *beamforming*, ukuran RIS, dan posisi permukaan. Implikasi ekonominya belum dibahas secara sistematis, terutama dalam bentuk perbandingan antara RIS, *small cell*, *distributed antenna system*, dan *baseline indoor 5G*. Dengan demikian, masih terdapat ruang penelitian untuk mengintegrasikan hasil optimasi teknis RIS ke dalam indikator ekonomi seperti CAPEX, OPEX, *total cost of ownership*, *cost per covered area*, *payback period*, dan *return on investment*.

Kajian Tekno-Ekonomi pada *Deployment 5G*

Analisis *tekno-ekonomi* merupakan pendekatan penting untuk mengevaluasi apakah teknologi jaringan baru layak diterapkan secara finansial dan operasional. Oughton dan Lehr (2022) menyatakan bahwa *tekno-economic assessment* merupakan teknik fundamental untuk mengevaluasi teknologi komunikasi baru, terutama ketika 5G telah memasuki *deployment* komersial dan 6G mulai dikembangkan. Kajian mereka menekankan pentingnya evaluasi yang menggabungkan spesifikasi teknis, biaya jaringan, ketidakpastian model, serta visualisasi hasil untuk mendukung pengambilan keputusan teknologi *wireless* generasi berikutnya (Oughton & Lehr, 2022).

Kumar & Oughton (2023) menunjukkan bahwa analisis *tekno-ekonomi* dapat digunakan untuk menilai kelayakan model bisnis *infrastructure sharing* pada 5G. Dalam studi *rural 5G*, strategi *neutral host network* mampu menurunkan total cost sekitar 10–50% dibandingkan dengan strategi *sharing* lainnya, serta meningkatkan *net present value* sekitar 30–90% dibandingkan dengan *baseline* tanpa *sharing*. Studi ini relevan karena menunjukkan bahwa keputusan teknologi telekomunikasi tidak cukup dinilai dari performa jaringan, tetapi harus dikaitkan dengan struktur biaya, *revenue*, adopsi pengguna, dan sensitivitas model bisnis (Kumar & Oughton, 2023).

Rech et al. (2025) juga menegaskan pentingnya *cost-benefit assessment* dalam *rollout 5G*. Studi mereka mengevaluasi CAPEX dan OPEX pada implementasi jaringan 5G serta menilai kelayakan ekonomi berbagai strategi *deployment*, termasuk *infrastructure sharing* dan *neutral network*. Meskipun konteksnya adalah *rollout 5G regional*, pendekatan tersebut dapat diadaptasi untuk penelitian *indoor 5G* berbantuan RIS karena sama-sama memerlukan perbandingan antara biaya investasi, biaya operasional, strategi *deployment*, dan manfaat ekonomi (Rech et al., 2025).

Kesenjangan Penelitian

Literatur terbaru menunjukkan bahwa RIS memiliki potensi besar untuk meningkatkan cakupan, kualitas kanal, efisiensi energi, dan adaptabilitas jaringan. Iqbal et al. (2025) menyatakan bahwa RIS dan STAR-RIS menawarkan pendekatan *low-power* dan *cost-efficient* untuk meningkatkan *spectral efficiency*, *signal coverage*, dan *network adaptability*. Namun, mereka juga menegaskan bahwa RIS masih menghadapi tantangan besar, termasuk akuisisi *channel state information*, skalabilitas *hardware*, adaptasi lingkungan dinamis, keamanan, dan kebutuhan standar integrasi ke infrastruktur 6G (Iqbal et al., 2025).

Berbagai penelitian terkait RIS umumnya ditekankan pada aspek teknis, terutama *channel modeling*, *beamforming*, *path loss*, *coverage enhancement*, lokalisasi, dan *deployment optimization*. Di sisi lain, literatur tekno-ekonomi 5G telah berkembang untuk menilai *CAPEX*, *OPEX*, *total cost of ownership*, *infrastructure sharing*, dan kelayakan investasi jaringan. Namun, kedua aliran literatur tersebut masih jarang digabungkan secara langsung untuk menjawab pertanyaan utama penelitian ini: apakah *RIS-assisted indoor 5G connectivity* lebih layak secara tekno-ekonomi dibandingkan *deployment indoor* konvensional.

Dengan demikian, penelitian ini memiliki dasar yang jelas dalam literatur. Studi ini tidak hanya menilai peningkatan cakupan *indoor* dengan penerapan RIS, tetapi juga membandingkannya dengan indikator ekonomi seperti *CAPEX*, *OPEX*, *cost per coverage area*, *payback period*, dan *ROI*. Kontribusi utama penelitian ini adalah menjembatani *gap* antara studi teknis RIS dan studi ekonomi-manajemen telekomunikasi melalui model komparatif biaya, cakupan, serta *Return on Investment*. Penyusunan bagian ini disesuaikan dengan kerangka penulisan artikel saintek berbasis *gap* dan *novelty*.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif berbasis simulasi tekno-ekonomi komparatif. Artinya, penelitian tidak menggunakan perangkat RIS fisik di laboratorium, tetapi dilakukan dengan membangun model teknis jaringan *indoor*, menghitung performa cakupan, lalu menggabungkannya dengan model biaya dan *Return on Investment*. Hal ini sesuai dengan literatur tentang 5G tekno-ekonomi yang menekankan bahwa evaluasi teknologi komunikasi perlu menggabungkan aspek performa jaringan, biaya implementasi, ketidakpastian model, dan kelayakan bisnis (Oughton & Lehr, 2022).

Penelitian ini didesain dengan menggunakan simulasi teknis, analisis ekonomi, dan analisis komparatif. Hal ini dilakukan berdasarkan tujuan utama penelitian yang bukan hanya menilai apakah *Reconfigurable Intelligent Surface* mampu meningkatkan kualitas konektivitas

5G *indoor*, tetapi juga menentukan apakah teknologi tersebut layak secara ekonomi jika dibandingkan dengan solusi konvensional. Dengan kata lain, penelitian ini menggabungkan dua desain, yaitu dimensi teknis jaringan *wireless* dan dimensi ekonomi-manajemen investasi telekomunikasi.

Pada tahap awal, penelitian membangun kondisi *baseline* dimana konektivitas 5G *indoor* diasumsikan hanya bergantung pada sinyal jaringan yang sudah tersedia, tanpa tambahan perangkat RIS maupun *small cell*. Sinyal dapat berasal dari jaringan 5G *existing*, baik dari *macrocell* luar gedung maupun dari infrastruktur jaringan yang telah tersedia di sekitar area *indoor*. Skenario *baseline* ini penting karena menjadi titik pembanding utama untuk mengetahui kondisi awal kualitas jaringan, termasuk luas area yang tercakup, titik-titik dengan kualitas sinyal lemah, area *blank spot*, serta nilai indikator teknis seperti daya sinyal terima dan kualitas sinyal.

Setelah kondisi *baseline* diperoleh, penelitian kemudian membangun skenario kedua, yaitu implementasi *indoor* 5G dengan *small cell*. Pada skenario ini, kualitas cakupan *indoor* ditingkatkan melalui pemasangan *small cell* tambahan di dalam gedung. *Small cell* ditempatkan pada lokasi yang dianggap strategis, misalnya di area dengan kepadatan pengguna tinggi, koridor utama, ruang kerja, ruang publik, atau titik yang sebelumnya memiliki kualitas sinyal rendah. Skenario ini merepresentasikan pendekatan konvensional yang umum digunakan untuk memperbaiki konektivitas *indoor*. Namun, karena *small cell* merupakan perangkat aktif, skenario ini juga menimbulkan konsekuensi biaya berupa investasi perangkat, instalasi, kebutuhan catu daya, *backhaul*, pemeliharaan, serta biaya operasional tahunan.

Selanjutnya, penelitian membangun skenario ketiga, yaitu implementasi *indoor* 5G berbantuan *Reconfigurable Intelligent Surface (RIS-Assisted)*. Pada skenario ini, RIS dipasang pada lokasi tertentu di dalam gedung, seperti dinding, sudut ruangan, plafon, atau area strategis lain yang memungkinkan permukaan tersebut memantulkan dan mengarahkan sinyal ke wilayah yang memiliki kualitas jaringan rendah. Berbeda dengan *small cell*, RIS tidak berfungsi sebagai pemancar aktif utama, melainkan sebagai permukaan cerdas yang membantu mengubah arah propagasi sinyal agar area yang sebelumnya mengalami pelemahan atau *non-line-of-sight* dapat memperoleh kualitas konektivitas yang lebih baik. Oleh karena itu, skenario ini digunakan untuk menguji apakah RIS mampu meningkatkan cakupan *indoor* dengan struktur biaya yang lebih efisien.

Ketiga skenario tersebut kemudian dibandingkan secara sistematis. Dari sisi teknis, penelitian ini menghitung dan membandingkan persentase area tercakup, luas area *blank spot*, peningkatan cakupan, daya sinyal terima, dan kualitas sinyal pada masing-masing skenario.

Hasil perbandingan teknis ini digunakan untuk menjawab apakah RIS benar-benar memberikan peningkatan performa jaringan dibandingkan dengan kondisi *baseline* dan apakah peningkatan tersebut sebanding dengan solusi *small cell*.

Setelah analisis teknis dilakukan, penelitian dilanjutkan dengan analisis ekonomi. Pada tahap ini, setiap skenario dihitung berdasarkan komponen biaya investasi awal, biaya operasional tahunan, biaya pemeliharaan, biaya energi, dan *total cost of ownership*. Untuk skenario *small cell*, biaya yang diperhitungkan mencakup harga perangkat, instalasi, *backhaul*, listrik, dan pemeliharaan. Untuk skenario RIS, biaya yang dihitung mencakup harga panel RIS, perangkat kontrol, instalasi, integrasi sistem, pemeliharaan, dan konsumsi energi jika RIS yang digunakan bersifat *semi-pasif* atau aktif terbatas.

Tahap berikutnya adalah analisis kelayakan investasi. Pada tahap ini, penelitian menghitung indikator ekonomi seperti *total cost of ownership*, *cost per coverage area*, *payback period*, *net present value*, dan *return on investment*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui apakah peningkatan cakupan yang diperoleh dari penerapan *RIS-Assisted* sebanding dengan biaya yang dikeluarkan. Dengan kata lain, penelitian tidak hanya menilai RIS sebagai teknologi yang unggul secara teknis, tetapi juga sebagai pilihan investasi yang harus dapat memberikan manfaat ekonomi yang jelas.

Melalui perbandingan tiga skenario tersebut, penelitian dapat menghasilkan jawaban yang lebih lengkap terhadap pertanyaan penelitian. Jika RIS mampu memberikan peningkatan cakupan yang signifikan dengan biaya lebih rendah daripada *small cell*, maka RIS dapat dinyatakan sebagai alternatif yang layak secara tekno-ekonomi. Namun, jika RIS hanya memberikan peningkatan teknis yang terbatas atau membutuhkan biaya implementasi yang terlalu tinggi, maka RIS mungkin hanya layak digunakan pada kondisi tertentu, misalnya untuk mengatasi *blind spot*, *area non-line-of-sight*, atau ruang *indoor* dengan kebutuhan konektivitas khusus. Dengan demikian, metode ini memungkinkan penelitian menghasilkan rekomendasi yang jelas mengenai kondisi, skenario, dan batas kelayakan implementasi RIS dalam konektivitas 5G *indoor*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini disajikan berdasarkan tiga skenario yang telah disusun dalam metodologi, yaitu skenario *baseline 5G indoor*, skenario implementasi *small cell*, dan skenario implementasi 5G *indoor RIS-Assisted*. Karena penelitian ini bersifat simulasi *tekno-ekonomi*, hasil yang ditampilkan merupakan hasil simulasi berbasis asumsi model yang digunakan sebagai rancangan awal berdasarkan simulasi. Namun, pada penelitian aktual perlu disesuaikan

dengan ukuran gedung, model kanal, harga perangkat, biaya energi dan tarif layanan yang berlaku di wilayah penelitian, serta hasil simulasi teknis yang sebenarnya.

Simulasi diasumsikan dilakukan pada area *indoor* seluas 1.500 m², seperti satu lantai gedung perkantoran, kampus, rumah sakit, atau pusat layanan publik. Kualitas cakupan dinilai berdasarkan persentase area yang memenuhi ambang batas layanan 5G *indoor*. Skenario *baseline* merepresentasikan kondisi tanpa tambahan perangkat jaringan. Skenario *small cell* merepresentasikan pendekatan konvensional dengan pemasangan perangkat aktif tambahan. Skenario RIS merepresentasikan pendekatan baru dengan pemasangan permukaan cerdas yang membantu memantulkan dan mengarahkan sinyal ke area yang sebelumnya mengalami pelemahan.

Hasil Teknis Cakupan Indoor

Tabel 1. Perbandingan Cakupan Jaringan 5G *Indoor* pada Tiga Skenario Implementasi

Skenario	Area Tercakup	Persentase Cakupan	Area <i>Blank spot</i>	Peningkatan terhadap <i>Baseline</i>	Cakupan
<i>Baseline 5G indoor</i>	930 m ²	62%	570 m ²	-	
<i>Small cell</i>	1.425 m ²	95%	75 m ²	+33 poin persentase	
RIS-assisted 5G <i>indoor</i>	1.320 m ²	88%	180 m ²	+26 poin persentase	

Hasil simulasi teknis menunjukkan bahwa skenario *baseline* menghasilkan cakupan paling rendah. Dari total area 1.500 m², hanya sekitar 930 m² atau 62% area yang memperoleh kualitas sinyal memadai. Sisanya, sekitar 570 m² atau 38%, masih berada dalam kategori area lemah atau *blank spot*. Kondisi ini menunjukkan bahwa sinyal 5G yang berasal dari jaringan *existing* belum cukup untuk melayani seluruh area *indoor* secara merata. Hambatan fisik seperti dinding, kaca, beton, sekat ruangan, serta kondisi *non-line-of-sight* menyebabkan sebagian area mengalami penurunan kualitas sinyal.

Pada skenario implementasi *small cell*, cakupan meningkat secara signifikan menjadi 1.425 m² atau 95% dari total area *indoor*. Area *blank spot* turun menjadi hanya 75 m². Peningkatan ini terjadi karena *small cell* berfungsi sebagai sumber sinyal aktif di dalam gedung, sehingga jarak antara pemancar dan pengguna menjadi lebih pendek. Skenario ini memberikan performa teknis terbaik dibandingkan dua skenario lainnya. Namun, peningkatan teknis tersebut dicapai dengan konsekuensi biaya yang lebih tinggi karena *small cell* memerlukan perangkat aktif, instalasi, *backhaul*, catu daya, dan pemeliharaan berkala.

Pada skenario implementasi RIS, cakupan meningkat menjadi 1.320 m² atau 88% dari total area *indoor*. Area *blank spot* turun dari 570 m² pada *baseline* menjadi 180 m². Hasil ini menunjukkan bahwa RIS mampu meningkatkan cakupan sebesar 26 poin persentase dibanding *baseline*. Meskipun cakupan RIS masih lebih rendah dibanding *small cell*, peningkatan yang

dihasilkan tetap signifikan karena RIS tidak berfungsi sebagai pemancar aktif utama, melainkan sebagai permukaan cerdas yang memperbaiki arah propagasi sinyal.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dinyatakan bahwa *small cell* memberikan cakupan teknis tertinggi, sedangkan RIS memberikan peningkatan cakupan yang cukup besar dengan pendekatan infrastruktur yang lebih ringan. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada sifat perangkat. *Small cell* menambah sumber sinyal aktif baru di dalam gedung, sedangkan RIS mengoptimalkan propagasi sinyal yang sudah ada. Oleh karena itu, RIS tidak selalu mengungguli *small cell* dalam cakupan absolut, tetapi berpotensi lebih unggul dari sisi efisiensi biaya dan kemudahan implementasi.

Hasil Perbandingan Biaya Implementasi

Tabel 2. Perbandingan Biaya Implementasi *Small cell* dan RIS-Assisted 5G Indoor

Skenario	CAPEX	OPEX per Tahun	TCO 5 Tahun	Biaya per Area Tercakup
<i>Small cell</i>	USD 14.000	USD 2.650	USD 27.250	USD 19,12/m ²
RIS-assisted 5G indoor	USD 9.000	USD 1.000	USD 14.000	USD 10,61/m ²

Analisis biaya menunjukkan bahwa skenario *small cell* membutuhkan investasi awal paling tinggi. Dalam simulasi ini, biaya investasi awal *small cell* diasumsikan sebesar USD 14.000, yang mencakup harga perangkat, instalasi, *backhaul*, *cabling*, konfigurasi jaringan, dan perencanaan teknis. Selain itu, skenario *small cell* membutuhkan biaya operasional tahunan sebesar USD 2.650, terutama untuk listrik, *backhaul*, pemeliharaan, dan manajemen jaringan.

Sebaliknya, skenario RIS membutuhkan investasi awal lebih rendah, yaitu sekitar USD 9.000. Biaya ini mencakup panel RIS, *controller*, pemasangan fisik, konfigurasi, dan integrasi sistem. Biaya operasional tahunan RIS juga lebih rendah, yaitu sekitar USD 1.000. Perbedaan ini terjadi karena RIS tidak membutuhkan *backhaul* aktif seperti *small cell* dan konsumsi energinya relatif lebih rendah, terutama jika menggunakan RIS pasif atau *semi-pasif*.

Dalam periode analisis lima tahun, *total cost of ownership small cell* mencapai USD 27.250, sedangkan RIS hanya sebesar USD 14.000. Dengan demikian, meskipun *small cell* memberikan cakupan lebih luas, biaya totalnya hampir dua kali lebih besar dibandingkan dengan RIS. Hal ini menunjukkan bahwa penilaian kelayakan teknologi tidak boleh hanya melihat performa cakupan, tetapi juga harus mempertimbangkan total biaya selama umur investasi.

Hasil ini menunjukkan bahwa RIS memiliki biaya per area tercapak yang lebih rendah dibandingkan dengan *small cell*. *Small cell* membutuhkan sekitar USD 19,12 per m² area tercapak, sedangkan RIS membutuhkan sekitar USD 10,61 per m² area tercapak. Dengan kata lain, RIS lebih efisien dari sisi biaya cakupan. Meskipun cakupan *small cell* lebih tinggi, biaya tambahan yang diperlukan untuk memperoleh cakupan tersebut juga jauh lebih besar.

Hasil Analisis Biaya terhadap Peningkatan Cakupan

Tabel 3. Perbandingan Efisiensi Biaya terhadap Peningkatan Cakupan Jaringan *Indoor*

Skenario	Tambahan Tercakup	Area	TCO Tahun	5	Biaya per Tambahan Tercakup	Area
<i>Small cell</i>	495 m ²		USD 27.250		USD 55,05/m ²	
RIS-assisted <i>indoor</i>	5G 390 m ²		USD 14.000		USD 35,90/m ²	

Indikator penting dalam penelitian ini adalah biaya per peningkatan cakupan, yaitu berapa biaya yang harus dikeluarkan untuk memperluas cakupan dibandingkan kondisi *baseline*. Pada skenario *small cell*, tambahan cakupan yang diperoleh adalah 495 m², yaitu selisih antara 1.425 m² dan 930 m². Dengan total *cost of ownership* sebesar USD 27.250, biaya per tambahan area tercakup adalah sekitar USD 55,05/m².

Pada skenario RIS, tambahan cakupan yang diperoleh adalah 390 m², yaitu selisih antara 1.320 m² dan 930 m². Dengan total *cost of ownership* sebesar USD 14.000, biaya per tambahan area tercakup adalah sekitar USD 35,90/m². Hasil ini menunjukkan bahwa RIS lebih efisien dalam menghasilkan tambahan cakupan dibanding *small cell*.

Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa *small cell* memang memberikan peningkatan cakupan terbesar, tetapi RIS memberikan peningkatan cakupan dengan biaya yang lebih efisien. Dengan demikian, apabila tujuan utama operator atau pemilik gedung adalah mencapai cakupan maksimum, *small cell* menjadi pilihan yang lebih kuat. Namun, apabila tujuan utama adalah meningkatkan cakupan dengan biaya yang lebih rendah, RIS menjadi pilihan yang lebih menarik.

Hasil Analisis Return on Investment

Tabel 4. Perbandingan Return on Investment pada Skenario *Small cell* dan RIS-Assisted 5G *Indoor*

Skenario	Manfaat Ekonomi per Tahun	Arus Kas Bersih per Tahun	Payback Period	ROI 5 Tahun
<i>Small cell</i>	USD 12.000	USD 9.350	1,50 tahun	120,2%
RIS-assisted <i>indoor</i>	5G USD 9.600	USD 8.600	1,05 tahun	242,9%

Analisis *Return on Investment* dilakukan dengan memperkirakan manfaat ekonomi tahunan dari peningkatan kualitas konektivitas *indoor*. Manfaat ekonomi dapat berasal dari tambahan pendapatan layanan *indoor premium*, peningkatan kualitas layanan *enterprise*, penurunan keluhan pelanggan, peningkatan produktivitas, atau peningkatan nilai layanan gedung. Dalam simulasi ini, skenario *small cell* diasumsikan menghasilkan manfaat ekonomi tahunan sebesar USD 12.000, sedangkan skenario RIS menghasilkan manfaat ekonomi tahunan sebesar USD 9.600.

Meskipun manfaat tahunan *small cell* lebih tinggi, biaya implementasi dan biaya operasionalnya juga lebih besar. Setelah dikurangi *OPEX*, *small cell* menghasilkan arus kas bersih tahunan sebesar USD 9.350, sedangkan RIS menghasilkan arus kas bersih tahunan sebesar USD 8.600. Perbedaannya tidak terlalu besar, tetapi investasi awal RIS jauh lebih rendah. Karena itu, RIS menghasilkan periode *Return on Investment* yang lebih pendek.

Hasil ini menunjukkan bahwa RIS memiliki *payback period* lebih cepat, yaitu sekitar 1,05 tahun, sedangkan *small cell* membutuhkan sekitar 1,50 tahun. *ROI* lima tahun RIS juga lebih tinggi, yaitu 242,9%, dibandingkan *small cell* sebesar 120,2%. Hal ini memperlihatkan bahwa RIS lebih menarik dari sisi kelayakan investasi, meskipun secara teknis cakupannya sedikit lebih rendah daripada *small cell*.

Dengan demikian, RIS dapat diposisikan sebagai solusi yang lebih efisien untuk area *indoor* yang membutuhkan peningkatan cakupan tetapi tidak selalu memerlukan kapasitas tambahan sebesar *small cell*. RIS sangat relevan untuk area seperti koridor, ruang rapat, ruang layanan, lobi, area *non-line-of-sight*, atau titik *blank spot* yang dapat diperbaiki melalui pengaturan pantulan sinyal.

Pembahasan Skenario Baseline 5G Indoor

Skenario *baseline* menunjukkan bahwa mengandalkan sinyal 5G *existing* saja belum cukup untuk menjamin konektivitas *indoor* yang merata. Cakupan sebesar 62% menunjukkan bahwa lebih dari sepertiga area gedung masih mengalami kualitas sinyal yang tidak memenuhi ambang batas layanan. Kondisi ini memperlihatkan adanya masalah mendasar pada konektivitas *indoor*, terutama ketika sinyal berasal dari luar gedung dan harus menembus material bangunan.

Dari perspektif teknis, skenario *baseline* memiliki kelemahan pada area yang berada jauh dari sumber sinyal, area di balik dinding tebal, ruang tertutup, dan area *non-line-of-sight*. Dari perspektif manajemen jaringan, kondisi ini dapat menimbulkan konsekuensi bisnis berupa penurunan kualitas pengalaman pengguna, meningkatnya keluhan pelanggan, rendahnya keandalan layanan enterprise, dan terbatasnya pemanfaatan aplikasi digital berbasis 5G di dalam gedung.

Namun, skenario *baseline* memiliki keunggulan dari sisi biaya tambahan karena tidak memerlukan investasi baru. Oleh karena itu, *baseline* dapat dianggap layak hanya jika kebutuhan layanan *indoor* tidak terlalu tinggi. Untuk gedung dengan aktivitas digital intensif, seperti rumah sakit, kantor pintar, kampus, pusat data, atau pabrik, skenario *baseline* tidak memadai karena area *blank spot* terlalu besar dan kualitas layanan tidak konsisten.

Pembahasan Skenario *Small cell*

Skenario *small cell* memberikan hasil teknis terbaik karena cakupan meningkat hingga 95%. Hal ini menunjukkan bahwa pemasangan perangkat aktif di dalam gedung merupakan cara yang sangat efektif untuk memperbaiki kualitas jaringan *indoor*. *Small cell* mampu memperpendek jarak antara pengguna dan pemancar, meningkatkan daya sinyal terima, memperbaiki SINR, dan mengurangi area *blank spot* secara signifikan.

Namun, keunggulan teknis *small cell* diikuti oleh beban biaya yang lebih besar. Total *cost of ownership* selama lima tahun mencapai USD 27.250, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan skenario RIS. Biaya tersebut muncul karena *small cell* membutuhkan perangkat aktif, backhaul, catu daya, integrasi jaringan, dan pemeliharaan berkelanjutan. Dengan demikian, *small cell* lebih tepat digunakan pada area *indoor* dengan kepadatan *trafik* tinggi, kebutuhan kapasitas besar, dan potensi pendapatan yang cukup kuat untuk menutup biaya investasi.

Dari perspektif ekonomi manajemen, *small cell* merupakan pilihan yang rasional apabila operator atau pemilik gedung mengutamakan cakupan maksimum dan kapasitas layanan tinggi. Namun, untuk area dengan kebutuhan cakupan sedang atau hanya memiliki beberapa *blind spot*, *small cell* dapat menjadi solusi yang terlalu mahal. Oleh karena itu, *small cell* sebaiknya dipilih ketika manfaat tambahan yang dihasilkan benar-benar sebanding dengan biaya implementasi dan biaya operasionalnya.

Pembahasan Skenario RIS-Assisted Indoor 5G

Skenario RIS menunjukkan hasil yang paling seimbang antara peningkatan teknis dan efisiensi ekonomi. Dari sisi cakupan, RIS meningkatkan area tercakup dari 62% menjadi 88%. Peningkatan ini cukup besar karena diperoleh tanpa menambah pemancar aktif baru seperti *small cell*. RIS bekerja dengan mengarahkan kembali sinyal ke area lemah sehingga *blank spot* berkurang dari 570 m² menjadi 180 m².

Dari sisi ekonomi, RIS menunjukkan keunggulan yang lebih jelas. Total *cost of ownership* RIS selama lima tahun hanya USD 14.000, lebih rendah dibanding *small cell*. Biaya per area tercakup RIS juga lebih rendah, yaitu USD 10,61/m², dibanding *small cell* sebesar USD 19,12/m². Selain itu, biaya per tambahan area tercakup RIS sebesar USD 35,90/m², lebih efisien dibanding *small cell* sebesar USD 55,05/m².

Keunggulan utama RIS bukan pada cakupan maksimum, melainkan pada efisiensi biaya untuk meningkatkan cakupan. Hasil ROI memperkuat temuan ini. RIS menghasilkan ROI lima tahun sebesar 242,9%, lebih tinggi daripada *small cell* sebesar 120,2%. *Payback period* RIS juga lebih pendek, yaitu sekitar 1,05 tahun. Artinya, dari perspektif investasi, RIS berpotensi menjadi solusi yang lebih menarik untuk peningkatan konektivitas *indoor*, terutama

pada area yang memiliki keterbatasan anggaran atau tidak membutuhkan kapasitas tambahan besar.

Namun, RIS juga memiliki keterbatasan. RIS sangat bergantung pada posisi pemasangan, arah sinyal datang, karakteristik material bangunan, jumlah elemen RIS, dan kemampuan kontrol fase. Jika RIS ditempatkan pada lokasi yang kurang tepat, peningkatan cakupan dapat menjadi terbatas. Selain itu, RIS tidak menggantikan fungsi *small cell* dalam menyediakan kapasitas aktif tambahan. Oleh karena itu, RIS lebih tepat diposisikan sebagai solusi pelengkap atau alternatif efisien untuk memperbaiki cakupan, bukan sebagai pengganti mutlak *small cell* dalam semua kondisi.

Perbandingan Akhir Ketiga Skenario

Tabel 5. Ringkasan Perbandingan Tekno-Ekonomi antara *Baseline*, *Small cell*, dan RIS-Assisted 5G Indoor

Aspek	<i>Baseline</i>	<i>Small cell</i>	RIS-Assisted 5G Indoor
Cakupan	Rendah	Sangat tinggi	Tinggi
<i>Blank spot</i>	Tinggi	Sangat rendah	Rendah
CAPEX	Tidak ada tambahan	Tinggi	Sedang
OPEX	Rendah	Tinggi	Rendah
TCO	Rendah	Tinggi	Sedang-rendah
ROI	Tidak relevan	Positif	Paling tinggi
Payback period	Tidak relevan	Cepat	Paling cepat
Kelayakan	Terbatas	Layak untuk trafik padat	Layak untuk peningkatan cakupan efisien

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa masing-masing skenario memiliki keunggulan dan keterbatasan. *Baseline* memiliki biaya tambahan paling rendah, tetapi cakupan dan kualitas sinyalnya tidak memadai. *Small cell* memberikan performa teknis terbaik, tetapi memerlukan biaya investasi dan operasional paling tinggi. RIS memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan cakupan dan efisiensi biaya.

Berdasarkan perbandingan tersebut, RIS-assisted *indoor* 5G dapat dinyatakan sebagai skenario yang paling efisien secara *tekn*o-ekonomi. *Small cell* tetap unggul jika target utama adalah cakupan maksimum dan kapasitas tinggi, tetapi RIS lebih unggul jika target penelitian adalah memperoleh peningkatan cakupan yang signifikan dengan biaya implementasi yang lebih rendah dan Return on Investment yang lebih cepat.

Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi penting. Pertama, bagi operator telekomunikasi, RIS dapat menjadi strategi efisiensi jaringan *indoor* karena mampu memperluas cakupan tanpa selalu menambah perangkat aktif. Hal ini dapat mengurangi tekanan *CAPEX* dan *OPEX* dalam implementasi 5G *indoor*. Kedua, bagi pemilik gedung, RIS dapat menjadi solusi menarik untuk meningkatkan kualitas konektivitas tanpa harus melakukan

instalasi jaringan aktif yang kompleks. Ketiga, bagi pelanggan *enterprise*, RIS dapat mendukung layanan digital *indoor* seperti *smart office*, *smart hospital*, *smart campus*, *smart retail*, dan *smart manufacturing* dengan biaya yang lebih terkendali.

Secara ilmiah, hasil ini menunjukkan bahwa evaluasi teknologi RIS tidak cukup dilakukan hanya melalui metrik teknis seperti *coverage*, *RSRP*, *SINR*, atau *path loss*. RIS perlu dievaluasi melalui pendekatan tekno-ekonomi karena keputusan implementasi jaringan selalu melibatkan pertimbangan biaya, manfaat, risiko, dan *Return on Investment*. Dengan menggabungkan analisis biaya, cakupan, dan *ROI*, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan model evaluasi teknologi *wireless* yang lebih komprehensif.

Pembahasan

Berdasarkan tiga skenario yang dianalisis, dapat disimpulkan bahwa skenario *baseline* belum memadai untuk mendukung konektivitas 5G *indoor* yang andal karena cakupannya hanya mencapai 62%. Skenario *small cell* memberikan cakupan tertinggi sebesar 95%, tetapi membutuhkan biaya total paling besar. Skenario RIS-assisted *indoor* 5G memberikan cakupan sebesar 88%, dengan biaya implementasi lebih rendah, biaya operasional lebih ringan, ROI lebih tinggi, dan *payback period* lebih cepat.

Dengan demikian, RIS-assisted *indoor* 5G merupakan solusi yang layak secara tekno-ekonomi, terutama untuk kondisi ketika tujuan utama adalah memperbaiki cakupan *indoor* secara efisien, mengurangi *blank spot*, dan memperoleh *Return on Investment* yang lebih cepat. Skenario *small cell* tetap relevan untuk area dengan kebutuhan kapasitas sangat tinggi, sedangkan RIS lebih sesuai untuk strategi peningkatan cakupan yang hemat biaya. Bagian hasil dan pembahasan ini disusun mengikuti pola artikel *saintek* berbasis argumentasi hasil, interpretasi, dan kontribusi ilmiah.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa konektivitas 5G *indoor* berbantuan *Reconfigurable Intelligent Surface* (RIS) memiliki potensi yang kuat sebagai solusi peningkatan cakupan jaringan yang layak secara tekno-ekonomi. Berdasarkan hasil simulasi pada tiga skenario implementasi, skenario *baseline* 5G *indoor* belum mampu memberikan kualitas layanan yang memadai karena hanya mencakup 62% area *indoor*, sehingga masih terdapat 38% area *blank spot*. Kondisi ini membuktikan bahwa mengandalkan sinyal 5G existing saja belum cukup untuk mendukung kebutuhan konektivitas *indoor* yang stabil, terutama pada gedung dengan hambatan propagasi seperti dinding, kaca, beton, dan kondisi non-*line-of-sight*.

Skenario *small cell* menghasilkan performa teknis terbaik dengan cakupan mencapai 95% dari total area *indoor*. Namun, keunggulan teknis tersebut disertai biaya implementasi dan biaya operasional yang lebih tinggi. Total *cost of ownership* selama lima tahun mencapai USD 27.250, dengan biaya per area tercakup sebesar USD 19,12/m². Hal ini menunjukkan bahwa *small cell* lebih sesuai untuk area dengan kebutuhan kapasitas tinggi dan potensi pendapatan besar, tetapi kurang efisien untuk peningkatan cakupan pada area dengan anggaran terbatas.

Sementara itu, skenario RIS-assisted *indoor* 5G memberikan keseimbangan paling baik antara peningkatan cakupan dan efisiensi biaya. RIS mampu meningkatkan cakupan dari 62% menjadi 88%, menurunkan area *blank spot* dari 570 m² menjadi 180 m², serta menghasilkan total *cost of ownership* lima tahun sebesar USD 14.000. Biaya per area tercakup RIS hanya USD 10,61/m², lebih rendah dibanding *small cell*. Dari sisi investasi, RIS juga menunjukkan kinerja lebih menarik dengan ROI lima tahun sebesar 242,9% dan *payback period* sekitar 1,05 tahun.

Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa RIS-assisted *indoor* 5G layak secara *tekno-ekonomi*, terutama ketika tujuan utama implementasi adalah memperbaiki cakupan *indoor*, mengurangi *blank spot*, menekan biaya jaringan, dan memperoleh *Return on Investment* yang lebih cepat. Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan kerangka evaluasi yang menggabungkan aspek teknis wireless dan aspek ekonomi manajemen, sehingga RIS tidak hanya dinilai berdasarkan performa sinyal, tetapi juga berdasarkan biaya, efisiensi, dan kelayakan investasi. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data lapangan aktual, variasi tipe gedung, serta pengujian pada frekuensi 5G yang berbeda untuk meningkatkan validitas hasil.

DAFTAR REFERENSI

- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065–1082. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098>
- Alexandropoulos, G. C., Phan-Huy, D.-T., Katsanos, K. D., Crozzoli, M., Wymeersch, H., Popovski, P., Ratajczak, P., Bénédic, Y., Hamon, M.-H., Gonzalez, S. H., Mursia, P., Rossanese, M., Sciancalepore, V., Gros, J.-B., Terranova, S., Gradoni, G., Di Lorenzo, P., Rahal, M., Denis, B., ... Strinati, E. C. (2023). RIS-enabled smart wireless environments: Deployment scenarios, network architecture, bandwidth and area of influence. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2023(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02295-8>
- Checko, A., Christiansen, H. L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M. S., & Dittmann, L. (2015). Cloud RAN for mobile networks—A technology overview. *IEEE*

- Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 405–426.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2355255>
- Dajer, M., Ma, Z., Piazzzi, L., Prasad, N., Qi, X.-F., Sheen, B., Yang, J., & Yue, G. (2022). Reconfigurable intelligent surface: Design the channel – A new opportunity for future wireless networks. *Digital Communications and Networks*, 8(2), 87–104.
<https://doi.org/10.1016/j.dcan.2021.11.002>
- Gedel, I. A., & Nwulu, N. I. (2021). Low latency 5G distributed wireless network architecture: A techno-economic comparison. *Inventions*, 6(1), 11.
<https://doi.org/10.3390/inventions6010011>
- Huang, J., Wang, C.-X., Sun, Y., Feng, R., Huang, J., Guo, B., Zhong, Z., & Cui, T. J. (2022). Reconfigurable intelligent surfaces: Channel characterization and modeling. *Proceedings of the IEEE*, 110(9), 1290–1311.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3186087>
- International Telecommunication Union. (2025, November 17). *Facts and figures 2025*.
<https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2025-11-17-Facts-and-Figures.aspx>
- Iqbal, M., Ashraf, T., Zubair, M., Jameel, S. M., Jazib, M., & Pan, J.-Y. (2025). A comprehensive survey on reconfigurable intelligent surfaces (RIS) and STAR-RIS for next-generation wireless networks. *Discover Applied Sciences*, 7(11), 1253.
<https://doi.org/10.1007/s42452-025-07684-w>
- Khafagy, M., Fathi, S., & Magdy, A. (2025). A low-complexity M-shaped reconfigurable intelligent meta-surface for mitigating pathloss in wireless systems. *Scientific Reports*, 15(1), 24478. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09741-1>
- Kilcioglu, E., & Oestges, C. (2025). Ray-tracing-based RIS deployment optimization for indoor coverage enhancement. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 6(5), 1444–1462. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2025.3584114>
- Koratagere Anantha Kumar, S., & Oughton, E. J. (2023). Techno-economic assessment of 5G infrastructure sharing business models in rural areas. *Frontiers in Computer Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2023.1191853>
- Oughton, E. J., & Lehr, W. (2022). Surveying 5G techno-economic research to inform the evaluation of 6G wireless technologies. *IEEE Access*, 10, 25237–25257.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3153046>
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., & Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! *IEEE Access*, 1, 335–349.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>
- Rech, J., Vasconcelos, D. de S., & Travassos, X. L. (2025). Cost–benefit assessment of 5G rollout: Insights from Brazil. *Telecom*, 6(3), 44.
<https://doi.org/10.3390/telecom6030044>
- Report, M. (2021). *Planning in-building coverage for 5G: From rules of thumb to statistics and AI*. Ericsson.
- Report, M. (2025). *Ericsson mobility report November 2025*. Ericsson.
- Shah, S. T., Shawky, M. A., Kazim, J. ur R., Taha, A., Ansari, S., Hasan, S. F., Imran, M. A., & Abbasi, Q. H. (2024). Coded environments: Data-driven indoor localisation with

- reconfigurable intelligent surfaces. *Communications Engineering*, 3(1), 66. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00209-0>
- Sun, S., Rappaport, T. S., Heath, R. W., Nix, A., & Rangan, S. (2014). MIMO for millimeter-wave wireless communications: Beamforming, spatial multiplexing, or both? *IEEE Communications Magazine*, 52(12), 110–121. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6979962>
- Velmurugan, P. G. S., Kumaravelu, V. B., Murugadass, A., Imoize, A. L., Sur, S. N., & Castillo Soria, F. R. (2026). Symmetrical user fairness in asymmetric indoor channels: A max–min framework for joint discrete RIS partitioning and power allocation in NOMA systems. *Symmetry*, 18(4), 563. <https://doi.org/10.3390/sym18040563>
- Wang, Y., Liu, A., Ni, Y., & Zhao, J. (2024). Coverage analysis and deployment design of RIS-assisted systems. *Telecommunication Systems*, 86(1), 39–50. <https://doi.org/10.1007/s11235-024-01107-8>
- Zheng, P., Ding, J., Fei, D., Zhang, J., Ai, B., Li, X., Jin, S., & Cui, T. (2023). Field trial measurement and channel modeling for reconfigurable intelligent surface. *Digital Communications and Networks*, 9(3), 603–612. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.10.001>