

Studi Pengelolaan Risiko dan Keselamatan Kerja pada Proyek Pembangunan *Base Transceiver Station*

Widyo Nugroho*¹, Sulfiah Dwi Astarini¹, Eko Prihartanto²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bojonegoro,
Bojonegoro 62119, Indonesia

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan,
Tarakan 77123, Indonesia

*e-mail: widyo.nugroho@gmail.com, eko.prihartanto@borneo.ac.id

Received 25th June 2025; Reviewed 01st September 2025; Accepted 27th October 2025

Journal Homepage: <http://jurnal.ubt.ac.id/index.php/bejts>

Doi : <https://doi.org/10.35334/be.v9i3.251>

Abstract

The construction of Base Transceiver Stations plays a crucial role in expanding digital connectivity and supporting economic transformation; however, its implementation involves various risks ranging from technical and financial aspects to occupational safety. This study aims to identify, classify, and prioritize risks in Base Transceiver Station construction projects using the Analytical Hierarchy Process method, based on data obtained from literature reviews, interviews, and questionnaires. The analysis results indicate that physical risks carry the most significant weight, followed by design, economic, and natural disaster risks, with overall risk assessments ranging from moderate to high levels. The occupational safety analysis further reveals that the highest risks occur in foundation works, tower structure erection, fabrication, and electrical installation, where human resources and work methods are the dominant contributors to potential accidents. Therefore, the success of Base Transceiver Station construction projects is highly determined by the effectiveness of managing physical risks and the consistent implementation of occupational safety standards, ensuring that project objectives in terms of time, cost, and quality can be achieved while safeguarding worker safety.

Keywords: base transceiver station; job safety analysis; risk management

Abstrak

Pembangunan Base Transceiver Station berperan penting dalam memperluas konektivitas digital dan mendukung transformasi ekonomi, namun proses konstruksinya menghadirkan berbagai risiko mulai dari aspek teknis, finansial, hingga keselamatan kerja. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi, mengklasifikasikan, dan memprioritaskan risiko pada proyek pembangunan Base Transceiver Station dengan metode Analytical Hierarchy Process berdasarkan data dari tinjauan pustaka, wawancara, dan kuesioner. Hasil analisis menunjukkan bahwa risiko fisik memiliki bobot dominan, diikuti risiko desain, ekonomi, dan bencana alam, dengan hasil penilaian risiko dalam tingkat sedang ke tinggi. Analisis keselamatan kerja mengungkapkan bahwa risiko tertinggi terdapat pada pekerjaan pondasi, struktur menara, pabrikasi, serta elektrik, di mana faktor sumber daya manusia dan metode kerja menjadi penyumbang dominan potensi kecelakaan. Oleh karena itu, keberhasilan pembangunan Base Transceiver Station sangat ditentukan oleh efektivitas pengelolaan risiko fisik dan penerapan standar keselamatan kerja secara konsisten sehingga proyek dapat mencapai target waktu, biaya, kualitas, serta menjamin keselamatan tenaga kerja.

Kata kunci: analisis keselamatan kerja; base transceiver station; pengelolaan risiko

1. Pendahuluan

Infrastruktur telekomunikasi memiliki peran yang sangat penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi serta mempercepat transformasi digital. Pada era modern, ekonomi digital, layanan pemerintahan berbasis elektronik, pendidikan daring, perdagangan elektronik, dan pekerjaan jarak jauh sangat bergantung pada jaringan telekomunikasi yang andal dan memiliki cakupan luas. Akses terhadap telekomunikasi tidak lagi dianggap sebagai suatu kemewahan, melainkan telah menjadi kebutuhan dasar yang secara langsung mempengaruhi produktivitas, kesetaraan ekonomi, dan inklusi sosial. Salah satu komponen utama dalam perluasan infrastruktur tersebut adalah pembangunan *Base Transceiver Station* (BTS), yang berfungsi sebagai tulang punggung sistem komunikasi seluler. BTS berperan sebagai piranti antarmuka penting antara perangkat pengguna dan jaringan inti. Fungsi utamanya adalah menjaga kekuatan sinyal serta memastikan komunikasi berjalan lancar dalam area cakupannya, baik untuk layanan suara maupun data. Meskipun memberikan manfaat signifikan, pembangunan BTS juga memiliki potensi risiko yang cukup besar, terutama pada tahapan krusial seperti akuisisi lahan, proses konstruksi, instalasi peralatan, serta komisioning (Altamimi dkk., 2024). Setiap tahapan rentan terhadap risiko yang dapat mempengaruhi biaya, waktu, kualitas, keselamatan kerja, serta keberlanjutan lingkungan (Widyatmoko & Mauludiyanto, 2015). Kegagalan dalam manajemen risiko dapat mengakibatkan keterlambatan proyek, pembengkakan biaya, sanksi regulasi, bahkan kegagalan proyek. Oleh karena itu, penerapan pendekatan manajemen risiko yang sistematis menjadi sangat penting untuk menjamin bahwa proyek BTS dapat diselesaikan tepat waktu, sesuai anggaran, dan memenuhi standar kualitas (Amalin & Handayeni, 2017). Kerangka kerja yang banyak diakui untuk klasifikasi risiko dalam proyek konstruksi diperkenalkan oleh Mustafa dan Al-Bahar (1991). Model tersebut mengelompokkan risiko ke dalam enam kategori utama, yaitu (Mustafa & Al-Bahar, 1991) :

1. Risiko bencana alam (*acts of God*), seperti gempa bumi, banjir, dan badai yang dapat mengganggu aktivitas proyek.
2. Risiko fisik, meliputi kerusakan aset, kegagalan struktur, maupun kecelakaan di lokasi proyek.
3. Risiko ekonomi, termasuk inflasi, fluktuasi nilai tukar, serta keterlambatan pembayaran yang dapat mengancam kelayakan proyek.
4. Risiko politik dan lingkungan, mencakup perubahan regulasi, ketidakstabilan politik, serta dampak lingkungan yang merugikan.
5. Risiko desain, yang muncul akibat kesalahan perencanaan, kekurangan dokumen desain, atau ketidaksesuaian antara spesifikasi desain dengan kondisi lapangan.
6. Risiko terkait lokasi proyek, meliputi rendahnya produktivitas tenaga kerja, kegagalan peralatan, kendala logistik, serta kondisi lapangan yang tidak dapat diprediksi.

Klasifikasi ini memberikan kerangka sistematis yang memungkinkan pemangku kepentingan proyek untuk mengidentifikasi dan memitigasi risiko sepanjang siklus hidup proyek (Mustafa & Al-Bahar, 1991). Salah satu kelemahan utama dalam praktik manajemen risiko yang ada saat ini adalah sifatnya yang deskriptif, tanpa dilengkapi mekanisme terstruktur untuk memprioritaskan risiko berdasarkan tingkat keparahan dan kemungkinan terjadinya. Keterbatasan ini mengurangi efektivitas manajemen risiko dalam mendukung pengambilan keputusan proyek, khususnya dalam kondisi yang dinamis dan penuh ketidakpastian. Oleh karena itu, diperlukan kerangka penilaian risiko yang lebih kuat, adaptif, dan berorientasi pada pengambilan keputusan dengan mengkombinasikan analisis kuantitatif serta pertimbangan kualitatif dari para ahli (Refsdal dkk., 2015). Salah satu metode yang dapat menjawab kebutuhan tersebut adalah *Analytical Hierarchy Process* (AHP), yang dikembangkan oleh Thomas Saaty. AHP menyusun permasalahan pengambilan keputusan yang kompleks ke dalam bentuk hierarki, sehingga memudahkan pemangku kepentingan untuk memecah permasalahan menjadi komponen yang lebih sederhana (Aladayleh & Aladaileh, 2024). Melalui perbandingan

berpasangan, para ahli memberikan bobot relatif terhadap faktor dan sub faktor, kemudian hasilnya digabungkan untuk menentukan peringkat risiko (Tereso dkk., 2025). Keunggulan utama AHP terletak pada kemampuannya untuk mengintegrasikan faktor kualitatif dan kuantitatif. Hal ini menjadikan AHP sangat relevan untuk penilaian risiko pada proyek infrastruktur seperti pembangunan BTS, di mana data kuantitatif sering kali terbatas atau tidak pasti, dan opini ahli memegang peranan penting. Dengan penerapan metode ini, *Project Manager* dapat menyusun hierarki risiko yang mencerminkan baik probabilitas maupun tingkat keparahan dari masing-masing risiko (Nugroho dkk., 2025).

Studi ini didasarkan pada data proyek pembangunan BTS di Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia. Fokus studi ini adalah pada pentingnya kerangka penilaian risiko yang terstruktur dan komprehensif, yang disesuaikan dengan tantangan spesifik di lapangan. Studi ini secara khusus bertujuan untuk menjawab bagaimana kontribusi relatif dari setiap faktor risiko dan sub-faktor mempengaruhi profil risiko keseluruhan pada berbagai tahapan proyek. Pemahaman terhadap distribusi risiko ini sangat penting, karena memungkinkan para pengambil keputusan menyusun rencana mitigasi yang lebih terarah, mengoptimalkan alokasi sumber daya, serta meningkatkan keberhasilan proyek.

2. Metode Studi

Studi ini secara umum dilaksanakan melalui beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Tinjauan pustaka, yang difokuskan pada identifikasi dan pemetaan risiko dalam lingkup proyek, serta eksplorasi jenis pekerjaan yang berpotensi menimbulkan risiko, mulai dari tingkat rendah hingga berat (Osei-Kyei dkk., 2022). Literatur diperoleh dari berbagai sumber terkait manajemen risiko, laporan proyek, serta referensi lain yang berhubungan dengan manajemen risiko.
2. Tahap pengumpulan data, yang mencakup identifikasi potensi risiko melalui *brainstorming* dan wawancara dengan para ahli yang berpengalaman dalam proyek serupa (Chou dkk., 2021). Faktor risiko diperoleh dari hasil tinjauan pustaka yang kemudian dinilai lebih lanjut. Data dikumpulkan melalui kuesioner, yang bertujuan untuk memberikan bobot pada faktor risiko serta melakukan penilaian risiko guna menentukan tingkat risiko proyek.
3. Tahap identifikasi risiko, yang dilaksanakan pada seluruh lingkup pembangunan, mulai dari fase perencanaan rekayasa hingga tahap implementasi (Refsdal dkk., 2015). Tujuan utama dari tahap ini adalah mengidentifikasi secara sistematis seluruh potensi kejadian atau kondisi yang dapat berdampak negatif terhadap tujuan proyek, baik dari sisi biaya, jadwal, kualitas, keselamatan, maupun harapan para pemangku kepentingan.
4. Tahap penilaian risiko, yang dilakukan untuk menentukan tingkat risiko. Penilaian risiko dilakukan pada seluruh tahapan pekerjaan. Pendekatan yang digunakan dalam studi ini adalah pendekatan empiris, dengan memanfaatkan metode statistik untuk menganalisis data kuesioner, serta metode matematis dan statistik yang diintegrasikan ke dalam *Decision Support System* untuk menyelesaikan permasalahan (Zhang dkk., 2024).
5. Tahap perumusan respon terhadap risiko dan pemantauan, yang dilakukan setelah tingkat risiko diperoleh dari hasil penilaian. Pada tahap ini dirumuskan tindakan tanggapan untuk menghilangkan atau mengurangi risiko yang telah diidentifikasi. Selanjutnya dilakukan pemantauan terhadap implementasi program respon risiko, bersamaan dengan penunjukan personil yang bertanggung jawab. Respon terhadap risiko merupakan proses modifikasi atau penanganan risiko, dapat berupa pengembangan opsi serta penentuan tindakan untuk meningkatkan peluang sekaligus mengurangi ancaman terhadap tujuan proyek. Respon diarahkan pada risiko yang telah diidentifikasi, dengan pilihan respon ditentukan berdasarkan hasil penilaian risiko sebelumnya (Dunovic dkk., 2016).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Identifikasi Risiko

Mengklasifikasikan risiko ke dalam kategori yang logis dan komprehensif dapat meningkatkan kejelasan analisis risiko secara keseluruhan dengan menyediakan bahasa bersama di antara para pemangku kepentingan serta memastikan konsistensi dalam proses evaluasi. Klasifikasi ini memungkinkan pemilik proyek, kontraktor, konsultan, dan regulator untuk menyelaraskan ekspektasi, memantau eksposur risiko sepanjang siklus hidup proyek, serta mengalokasikan sumber daya secara efektif untuk mitigasi sebagaimana disampaikan oleh peneliti sebelumnya (Nugroho, 2020). Setiap kategori risiko, baik yang terkait dengan desain, pelaksanaan, finansial, lingkungan, maupun bencana alam, memiliki implikasi yang unik terhadap biaya, waktu, keselamatan, dan kualitas, sehingga harus ditangani dengan pendekatan yang sesuai dengan konteksnya. Lebih lanjut, klasifikasi risiko berfungsi sebagai langkah awal yang fundamental untuk prioritas dan penilaian kuantitatif, termasuk melalui metode seperti *Analytical Hierarchy Process* (AHP).

Berdasarkan hasil tinjauan pustaka yang ekstensif serta diskusi mendalam dengan para profesional proyek dan pakar di bidangnya, studi ini mengusulkan suatu skema klasifikasi praktis untuk mengelompokkan risiko ke dalam kategori yang bermakna dan relevan secara operasional. Klasifikasi ini mengintegrasikan wawasan teoritis dari sumber-sumber akademik dengan pengetahuan empiris yang diperoleh dari pengalaman lapangan, sehingga tidak hanya kuat secara konseptual tetapi juga aplikatif secara pragmatis. Kategori risiko yang disusun mencerminkan tidak hanya dinamika internal proses konstruksi, tetapi juga eksternalitas yang dapat mengganggu kesinambungan dan kinerja proyek.

Berdasarkan hasil *brainstorming* dan wawancara, dua kategori risiko yang awalnya dikemukakan oleh Mustafa dan Al-Bahar (1991), yakni risiko politik dan risiko terkait lokasi dikecualikan. Risiko politik dianggap tidak relevan dalam konteks studi ini karena seluruh lokasi proyek berada dalam yurisdiksi geopolitik dan regulasi yang sama, sehingga volatilitas kebijakan maupun ketidakpastian legislasi dapat diminimalkan.

Sementara itu, risiko terkait lokasi dianggap telah dimitigasi pada tahap analisis kelayakan sebelumnya. Pada tahap tersebut, lokasi yang tidak memiliki justifikasi sosial, lingkungan, atau ekonomi yang memadai telah dieliminasi dari pengembangan lebih lanjut, sehingga mempersempit profil risiko pada tahap-tahap selanjutnya. Dengan demikian, studi ini mengklasifikasikan risiko ke dalam klasifikasi risiko bencana alam, risiko fisik, risiko ekonomi, dan risiko desain.

Tabel 1. Identifikasi Risiko

Hirarki	Faktor	Sub Faktor
Pertama	Bencana Alam	
Kedua		Gempa bumi
Kedua		Tanah longsor
Kedua		Angin
Kedua		Sambaran petir
Kedua		Cuaca ekstrem
Pertama	Fisik	
Kedua		Metode
Kedua		Finansial
Kedua		Material
Kedua		Sumberdaya manusia

Hirarki	Faktor	Sub Faktor
Pertama	Desain	
Kedua		Lingkup desain tidak lengkap
Kedua		Kesalahan (<i>error</i>) pada desain
Kedua		Spesifikasi teknis tidak sesuai
Kedua		Perubahan desain
Pertama	Ekonomi	
Kedua		Inflasi
Kedua		Ketidakstabilan kurs Rupiah

Pada analisis penilaian risiko proyek, jenis data yang digunakan adalah data kualitatif dalam skala verbal Saaty. Data kualitatif ini digunakan untuk menentukan bobot kriteria kemungkinan risiko yang mempengaruhi pembangunan BTS. Selanjutnya, data kualitatif tersebut dikonversi ke dalam bentuk kuantitatif menggunakan skala numerik Saaty. Data yang telah dikonversi ini diperoleh dari persepsi para ahli ketika melakukan perbandingan berpasangan antara faktor dan sub-faktor dalam rangka mengidentifikasi risiko pada pembangunan BTS.

3.2 Penilaian Risiko

Dalam konteks prioritas risiko pada pembangunan BTS, metode AHP digunakan untuk mengklasifikasikan dan memberikan bobot pada berbagai kategori risiko berdasarkan dampak relatifnya. Analisis ini mengidentifikasi empat kategori utama risiko, yaitu: fisik, desain, ekonomi, dan bencana alam. Di antara kategori tersebut, risiko fisik muncul sebagai kategori paling dominan dengan bobot prioritas sebesar 0,467, yang menunjukkan bahwa hampir setengah dari total risiko proyek berasal dari faktor-faktor fisik. Kategori ini mencakup risiko yang berkaitan dengan:

1. Sumber daya manusia atau tenaga kerja (bobot: 0,136),
2. Permasalahan material, seperti kelangkaan atau mutu yang tidak sesuai standar (0,136),
3. Metode konstruksi (0,060), serta
4. Aspek finansial pada tahap implementasi (0,136).

Risiko yang berkaitan dengan desain menempati posisi kedua paling signifikan dengan bobot sebesar 0,292. Kategori ini mencakup risiko akibat spesifikasi yang tidak lengkap atau ambigu (0,120) serta perubahan desain selama pelaksanaan proyek (0,087). Risiko-risiko tersebut seringkali menyebabkan eskalasi biaya, keterlambatan jadwal, maupun kebutuhan untuk melakukan *redesign*, yang pada akhirnya dapat mengganggu kelangsungan proyek apabila tidak dikelola dengan baik. Selain itu, terdapat pula risiko terkait desain yang tidak lengkap (0,035) dan kesalahan perhitungan (*error*) dalam desain (0,051) yang turut berkontribusi dalam kategori risiko desain.

Risiko ekonomi menyumbang bobot sebesar 0,155 dari total keseluruhan risiko. Kategori ini terutama berfokus pada kondisi makroekonomi yang mempengaruhi pembiayaan proyek, meliputi inflasi (0,103) dan fluktuasi suku bunga (0,052). Meskipun faktor-faktor tersebut bersifat eksternal terhadap proyek, dampaknya dapat signifikan terhadap kemampuan kontraktor dalam menjaga profitabilitas sekaligus memenuhi kewajiban kontraktual.

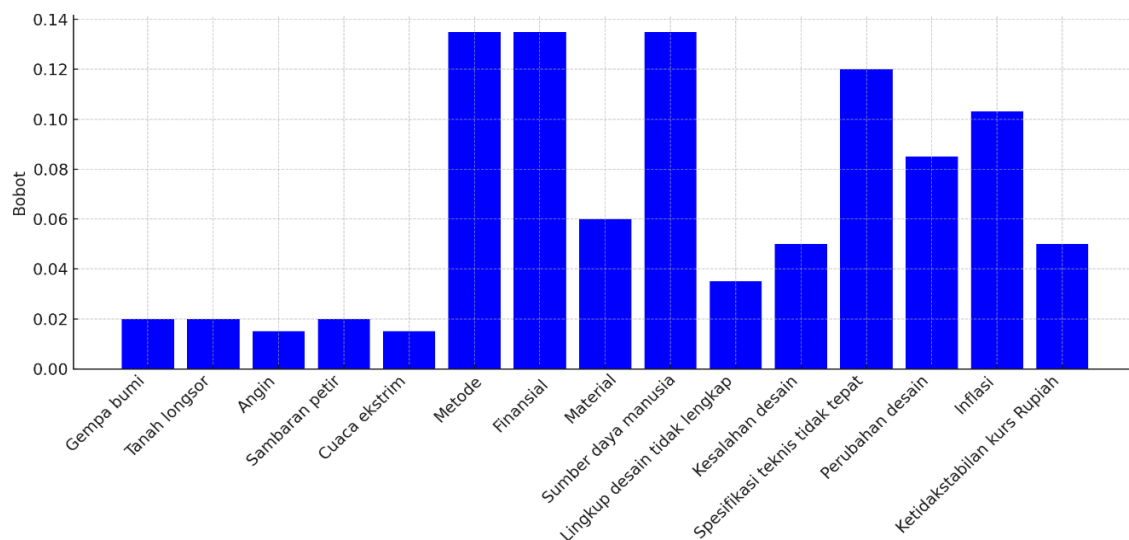
Sementara itu, risiko bencana alam memiliki bobot relatif terkecil, yaitu 0,086. Walaupun bobotnya rendah, risiko ini tetap penting karena sifatnya yang tidak dapat diprediksi dan berada di luar kendali manusia. Risiko ini mencakup kejadian alam seperti gempa bumi (0,019), longsor (0,020), angin kencang (0,013), sambaran petir (0,020), serta kondisi cuaca ekstrem (0,015). Secara umum, risiko-risiko tersebut biasanya diakomodasi dalam klausul kontrak dan memerlukan perencanaan kontinjensi, meskipun probabilitas kejadiannya relatif rendah.

Tabel 2. Perbandingan Berpasangan Faktor, Sub Faktor dan Tingkat Risiko

Faktor	Sub Faktor		Tingkat Risiko		
			Tinggi	Sedang	Rendah
Bencana alam	0,086				
		Gempa bumi	0.018		
			0.006	0.008	0.004
		Tanah longsor	0.020		
			0.006	0.009	0.003
		Angin	0.013		
Fisik	0,467				
		Sambaran petir	0.020		
			0.005	0.006	0.002
		Cuaca ekstrim	0.015		
			0.012	0.006	0.002
			0.009	0.003	0.003
Desain	0,292				
		Metode	0.136		
			0.043	0.062	0.031
		Finansial	0.136		
			0.043	0.062	0.031
		Material	0.059		
Ekonomi	0,155				
		Sumberdaya manusia	0.136		
			0.055	0.065	0.016
		Lingkup desain tidak lengkap	0.035		
			0.013	0.016	0.006
		Kesalahan pada desain	0.051		
		Spesifikasi teknis tidak tepat	0.120		
			0.029	0.015	0.007
		Perubahan desain	0.086		
			0.070	0.034	0.016
			0.028	0.036	0.022
		Inflasi	0.103		
			0.029	0.014	0.060
		Ketidakstabilan kurs rupiah	0.052		
			0.027	0.017	0.008

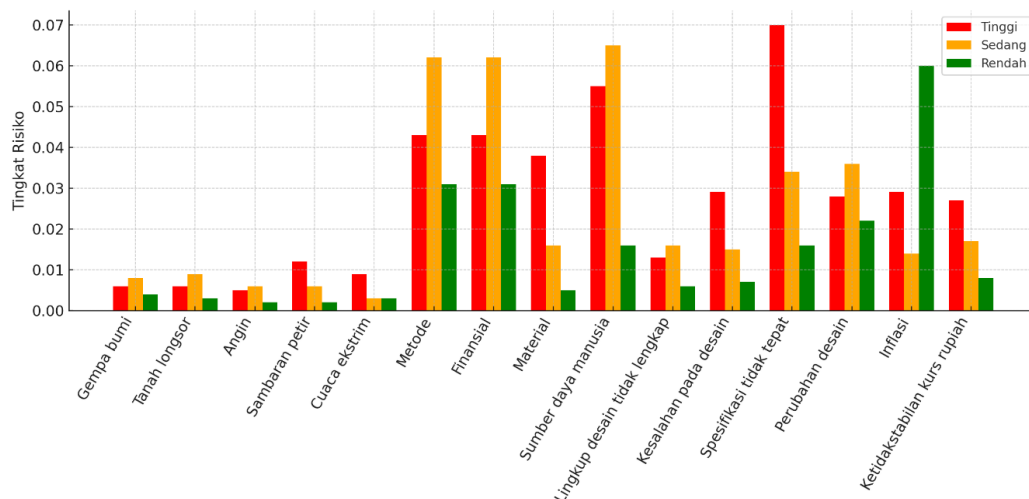
Dominasi bobot risiko fisik sebagaimana terlihat pada gambar 1, memberikan wawasan penting bahwa sebagian besar ancaman terhadap keberhasilan pembangunan BTS bersumber dari fase operasional dan implementasi, bukan dari pengaruh lingkungan eksternal atau faktor makroekonomi. Temuan ini selaras dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa tantangan utama dalam proyek infrastruktur terletak pada aspek pelaksanaan internal (Dunovic dkk., 2016; Chou dkk., 2021). Hal ini menegaskan perlunya *Project Manager* untuk lebih intensif dalam mengelola variabel-variabel pelaksanaan di lapangan, seperti keselamatan tenaga kerja, logistik material, keandalan peralatan, serta metode kerja. Bobot yang relatif setara pada sumberdaya manusia, material, dan finansial dalam kategori risiko fisik menunjukkan bahwa ketiga elemen tersebut saling bergantung dan harus dikelola secara terintegrasi. Sebagai contoh, keterlambatan dalam pengiriman material dapat mengganggu jadwal tenaga kerja, yang pada gilirannya meningkatkan biaya tenaga kerja serta berpotensi menimbulkan kesalahan pelaksanaan akibat penyelesaian pekerjaan yang terburu-buru, sebagaimana juga disoroti oleh Amalin dan Handayeni (2017) dalam penelitian sebelumnya. Dari perspektif ekonomi, meskipun risiko ekonomi seperti inflasi dan volatilitas kurs rupiah memperoleh

bobot yang relatif rendah, implikasinya dalam jangka panjang tetap signifikan terutama dalam proyek infrastruktur multi-tahap. Inflasi dapat dengan cepat meningkatkan biaya material dan tenaga kerja, menurunkan margin keuntungan, bahkan berpotensi memicu renegotiasi kontrak sebagaimana dinyatakan oleh peneliti terdahulu (Ali dkk., 2024). Menariknya, bobot yang relatif rendah pada kategori risiko bencana alam dalam hasil analisis tidak berarti kategori ini tidak relevan, melainkan mencerminkan sifatnya yang meski kemungkinan terjadinya rendah namun bila terjadi akan berdampak tinggi. Bencana alam seperti gempa bumi, meskipun jarang terjadi, dapat menimbulkan konsekuensi yang katastrofik. Oleh karena itu, meskipun skornya rendah dalam matriks AHP, kategori ini tetap harus dikelola melalui rencana struktural preventif, perencanaan resiliensi, atau perlindungan asuransi sebagaimana rekomendasi peneliti terdahulu (Huang dkk., 2024).



Gambar 1. Bobot Sub Faktor

Tingkat risiko yang relatif tinggi pada sub faktor desain sebagaimana terlihat gambar 2, mengindikasikan adanya persoalan sistemik yang sering ditemui dalam proyek infrastruktur dengan skema percepatan, sebagaimana proyek pembangunan BTS, yaitu kurangnya detail dan kejelasan pada tahap awal perencanaan dan desain.



Gambar 2. Tingkat Risiko Berdasarkan Sub Faktor

3.3 Respon terhadap Risiko

Respon terhadap risiko dalam studi ini diklasifikasikan ke dalam empat kategori utama, yakni bencana alam, fisik, desain, dan ekonomi. Setiap kategori ditangani dengan strategi berbeda sesuai tingkat kendali, prediktabilitas, dan keparahan dampaknya, disertai penetapan tanggung jawab yang jelas serta penyelarasan dengan siklus hidup proyek untuk memastikan akuntabilitas dan efisiensi, sebagaimana rekomendasi oleh peneliti sebelumnya (Chou dkk., 2021; Refsdal dkk., 2015).

Risiko bencana alam seperti gempa bumi, tanah longsor, cuaca ekstrem, dan sambaran petir bersifat di luar kendali manusia, meskipun probabilitasnya rendah namun berisiko tinggi. Strategi utama berupa penerimaan risiko dapat melalui mekanisme asuransi (Sheikallavudeen & Sankar, 2015). Asuransi komprehensif memungkinkan pemangku kepentingan menyerap implikasi finansial tanpa mengorbankan keberlanjutan proyek. Sejalan dengan rekomendasi Huang dkk. (2024), perencanaan pra-konstruksi harus mengintegrasikan prinsip resiliensi terhadap bencana dan jaminan kontraktual, termasuk klausul perlindungan terhadap kerusakan akibat gempa atau cuaca ekstrem. Tanggung jawab pengaturan cakupan asuransi berada pada *Project Director* dan wajib dilaksanakan sebelum pekerjaan fisik dimulai.

Risiko fisik mencakup variabilitas metode konstruksi, kualitas material, tenaga kerja, dan aspek finansial. Karena lebih dapat diprediksi, risiko ini dikelola melalui perencanaan dan pengendalian yang efektif. Variabilitas eksekusi diatasi dengan standarisasi metode kerja dan protokol keselamatan (Dunovic dkk., 2016). Gangguan finansial dapat diminimalkan melalui pembiayaan aman, seperti pencairan berbasis *milestone*. Aspek material dikelola dengan diversifikasi pemasok dan memprioritaskan sumber lokal. Sementara itu, aspek sumberdaya manusia, yang meliputi kompetensi, perilaku keselamatan, dan produktivitas, ditangani melalui pelatihan, sertifikasi, serta pengawasan lapangan berkelanjutan (Widyatmoko & Mauludiyanto, 2015). *Project Manager* bertanggung jawab penuh dalam fase konstruksi ketika risiko fisik paling dominan.

Risiko desain menimbulkan tantangan sistemik, di mana kesalahan fase perencanaan dapat berimplikasi pada keterlambatan, pekerjaan ulang, dan pembengkakan biaya (Chou dkk., 2021). Keterlibatan pemangku kepentingan sejak awal krusial untuk mendefinisikan ruang lingkup yang lengkap. Risiko perhitungan desain yang keliru dapat dikurangi melalui tinjauan independen oleh pakar sejawat (Altamimi dkk., 2024). Spesifikasi yang salah dapat diminimalkan dengan koordinasi lintas disiplin antara tim sipil, mekanikal, dan elektrikal. Potensi perubahan desain dikendalikan melalui sistem manajemen perubahan yang terstruktur, mencakup dokumentasi formal, persetujuan, dan analisis dampak (Ali dkk., 2024). Mitigasi risiko desain menjadi tanggung jawab *Project Manager* dan wajib diintegrasikan pada fase pra-konstruksi.

Risiko ekonomi, meskipun sering dianggap kurang prioritas, tetap memiliki dampak strategis. Inflasi ditangani dengan klausul eskalasi harga yang memungkinkan penyesuaian pembayaran mengikuti indeks inflasi. Volatilitas nilai tukar, khususnya pelemahan Rupiah terhadap mata uang utama, dapat mempengaruhi biaya pengadaan impor. Untuk itu digunakan strategi *hedging*, kontrak berjangka, atau anggaran multi-mata uang (Ali dkk., 2024; Altamimi dkk., 2024). Respon terhadap risiko pada studi ini selengkapnya disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Respon terhadap Risiko

Faktor	Sub Faktor	Jenis Respon	Mekanisme Respon	Penanggung-jawab	Waktu
Bencana alam	Gempa bumi	Penerimaan risiko	Asuransi <i>all risk</i>	<i>Project Director</i>	Pra konstruksi
	Tanah longsor	Penerimaan risiko	Asuransi <i>all risk</i>	<i>Project Director</i>	Pra konstruksi

Faktor	Sub Faktor	Jenis Respon	Mekanisme Respon	Penanggung-jawab	Waktu
Fisik	Angin	Penerimaan risiko	Asuransi <i>all risk</i>	<i>Project Director</i>	Pra konstruksi
	Sambaran petir	Penerimaan risiko	Asuransi <i>all risk</i>	<i>Project Director</i>	Pra konstruksi
	Cuaca ekstrem	Penerimaan risiko	Asuransi <i>all risk</i>	<i>Project Director</i>	Pra konstruksi
	Metode	Mitigasi risiko	Standarisasi konstruksi dan prosedur keselamatan	<i>Project Manager</i>	Tahap konstruksi
	Finansial	Mitigasi risiko	Pengamanan pembiayaan proyek	<i>Project Manager</i>	Tahap konstruksi
Desain	Material	Mitigasi risiko	Sistem rantai pasok yang andal	<i>Project Manager</i>	Tahap konstruksi
	Sumber daya manusia	Mitigasi risiko	Pelatihan dan pengawasan	<i>Project Manager</i>	Tahap konstruksi
	Lingkup desain tidak lengkap	Mitigasi risiko	Keterlibatan pemangku kepentingan di awal desain	<i>Project Manager</i>	Pra konstruksi
	Kesalahan dalam desain	Mitigasi risiko	<i>Review</i> desain oleh pihak sejawat/ <i>peer</i>	<i>Project Manager</i>	Pra konstruksi
	Spesifikasi teknis tidak sesuai	Mitigasi risiko	Penetapan standar spesifikasi teknis	<i>Project Manager</i>	Pra konstruksi
Ekonomi	Perubahan desain	Mitigasi risiko	Penetapan standar dan prosedur perubahan	<i>Project Manager</i>	Pra konstruksi
	Inflasi	Mitigasi risiko	Klausul mengenai eskalasi harga	<i>Project Director</i>	Pra konstruksi
	Ketidakstabilan kurs Rupiah	Mitigasi risiko	Penyertaan program <i>hedging</i>	<i>Project Director</i>	Tahap konstruksi

3.4 Analisis Keselamatan Kerja pada Tahap Konstruksi

Proses pembangunan BTS melibatkan berbagai tahapan konstruksi yang memiliki potensi bahaya sesuai dengan karakteristik pekerjaan. Identifikasi bahaya pada setiap tahapan menjadi langkah penting dalam penerapan keselamatan kerja. Analisis identifikasi bahaya dan penilaian risiko mengintegrasikan empat aspek utama, yaitu sumberdaya manusia, material, metode, dan finansial sebagai variabel yang mempengaruhi tingkat risiko di setiap tahap konstruksi. Dengan adanya identifikasi bahaya ini, setiap tahapan konstruksi dapat dipetakan risiko dominannya, baik dari sisi manusia, material, metode, maupun finansial. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam menentukan strategi mitigasi risiko yang lebih tepat sasaran sehingga mendukung keberhasilan proyek sekaligus menjaga keselamatan pekerja di lapangan. Tabel 4 berikut menyajikan hasil identifikasi bahaya dan penilaian risiko keselamatan kerja berdasarkan tahapan konstruksi.

Tabel 4. Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko Keselamatan Kerja

Tahap Konstruksi	Aspek	Identifikasi Bahaya	Konsekuensi bila terjadi	Kemungkinan terjadi	Keparahan bila terjadi	Tingkat Risiko
Persiapan Lahan & Mobilisasi	Sumberdaya Manusia	Pekerja kurang disiplin, rawan kecelakaan kerja	Luka ringan–sedang	Sedang	Sedang	Sedang
	Material	Keterlambatan <i>supply</i> alat/material	Keterlambatan proyek	Sedang	Tinggi	Tinggi
	Metode	Lalu lintas tidak teratur, pekerja tertabrak kendaraan	Cedera serius/fatal	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Finansial	Biaya tambahan akibat keterlambatan mobilisasi	Kerugian biaya	Sedang	Sedang	Sedang
Pekerjaan Pondasi	Sumberdaya Manusia	Pekerja tidak memahami prosedur keamanan kerja	Cedera serius akibat kesalahan kerja	Sedang	Tinggi	Tinggi
	Material	Material tidak sesuai spesifikasi	Kegagalan struktur, <i>rework</i>	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Metode	Longsor galian / tertimpa material	Cedera serius/fatal	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Finansial	Biaya tambahan akibat <i>rework</i>	Kerugian biaya	Sedang	Sedang	Sedang
Pekerjaan struktur menara	Sumberdaya Manusia	<i>Rigger</i> jatuh dari ketinggian, tersambar petir	Cedera serius/fatal	Sedang	Tinggi	Tinggi
	Material	Komponen cacat atau rusak	Keterlambatan & kerugian material	Sedang	Tinggi	Tinggi
	Metode	<i>Crane</i> gagal angkat beban	Kerusakan material, cedera pekerja	Sedang	Tinggi	Tinggi
	Finansial	Biaya tambahan akibat kecelakaan & kerusakan material	Kerugian biaya	Sedang	Tinggi	Tinggi
Pekerjaan pabrikasi baja	Sumberdaya Manusia	Pekerja terkena percikan las atau tertimpa material	Luka bakar, cedera	Sedang	Tinggi	Tinggi
	Material	Tabung gas bocor	Kebakaran, cedera/fatal	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Metode	Percikan memicu kebakaran	Kerugian material, potensi cedera	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Finansial	Kerugian akibat kecelakaan & kebakaran	Kerugian biaya	Sedang	Tinggi	Tinggi
Pekerjaan elektrik	Sumberdaya Manusia	Teknisi jatuh saat instalasi	Cedera serius/fatal	Sedang	Tinggi	Tinggi

Tahap Konstruksi	Aspek	Identifikasi Bahaya	Konsekuensi bila terjadi	Kemungkinan terjadi	Keparahan bila terjadi	Tingkat Risiko
	Material	Kabel rusak saat penarikan	Kerusakan material, biaya tambahan	Sedang	Sedang	Sedang
	Metode	Sengatan listrik	Cedera serius/fatal	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Finansial	Biaya tambahan akibat kerusakan kabel	Kerugian biaya	Sedang	Sedang	Sedang
Instalasi instrumen telekomunikasi	Sumberdaya Manusia	Teknisi cedera saat <i>handling</i> perangkat	Cedera ringan–sedang	Sedang	Sedang	Sedang
	Material	Peralatan rusak saat pemasangan	Kerugian material	Sedang	Sedang	Sedang
	Metode	Sengatan listrik saat koneksi	Cedera serius/fatal	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Finansial	Biaya tambahan akibat kerusakan perangkat	Kerugian biaya	Sedang	Tinggi	Tinggi
Komisioning & integrasi sistem	Sumberdaya Manusia	Salah konfigurasi oleh <i>engineer</i>	<i>Downtime</i> , kerugian material	Sedang	Sedang	Sedang
	Material	Perangkat tidak kompatibel	Keterlambatan, <i>rework</i>	Sedang	Sedang	Sedang
	Metode	Gangguan listrik & radiasi RF	Cedera, gangguan kesehatan, kerusakan alat	Rendah	Tinggi	Tinggi
	Finansial	<i>Downtime</i> membuat kerugian biaya	Kerugian biaya	Sedang	Tinggi	Tinggi
Finishing & pembersihan	Sumberdaya Manusia	Pekerja cedera karena <i>housekeeping</i> buruk	Luka ringan–sedang	Sedang	Sedang	Sedang
	Material	Pekerja cedera akibat sisa material tercecer	Potensi cedera ringan	Sedang	Rendah	Rendah
	Metode	Pekerja terpeleset akibat area kotor	Luka ringan–sedang	Sedang	Sedang	Sedang
	Finansial	Biaya tambahan akibat keterlambatan serah terima	Kerugian biaya & penalti kontrak	Sedang	Sedang	Sedang

Analisis pada tabel 5 memuat operabilitas penanganan risiko keselamatan kerja yang mencakup rincian tahap konstruksi, jenis bahaya yang teridentifikasi, tingkat risiko, tindakan yang dipilih, pelaksana tindakan, serta waktu penerapan. Dengan analisis ini, setiap risiko dapat dikelola secara terstruktur, siapa yang bertanggung jawab, dan kapan tindakan tersebut harus dilakukan. Selain itu, tabel ini juga berfungsi sebagai acuan pemantauan agar penerapan pengendalian risiko dapat dievaluasi secara berkala. Dengan adanya pemetaan yang jelas, proses pengambilan keputusan menjadi lebih efektif, serta dapat meminimalisir potensi terjadinya kecelakaan kerja maupun keterlambatan proyek.

Tabel 5. Operabilitas Penanganan Risiko Keselamatan Kerja

Tahap Konstruksi	Aspek	Identifikasi Bahaya	Tindakan	Oleh	Waktu
Persiapan lahan & mobilisasi	Sumberdaya manusia	Pekerja kurang disiplin, rawan kecelakaan kerja	<i>Safety induction briefing</i> harian	<i>Project Manager, Safety Officer</i>	Harian
	Material	Keterlambatan <i>supply</i> alat/material	Kontrak logistik, pengaturan jadwal mobilisasi	<i>Procurement, Project Manager</i>	Pra-konstruksi
	Metode	Lalu lintas tidak teratur, pekerja tertabrak kendaraan	Pengaturan lalu lintas dan rambu lalu lintas	<i>Site Manager, Safety Officer</i>	Saat mobilisasi
	Finansial	Biaya tambahan akibat keterlambatan mobilisasi	Perencanaan anggaran transportasi secara detail	<i>Finance Officer, Project Manager</i>	Tahap Perencanaan
Pekerjaan pondasi	Sumberdaya manusia	Pekerja tidak memahami prosedur keamanan kerja	Pelatihan K3, supervisi ketat	<i>Safety Officer, Mandor</i>	Awal pekerjaan
	Material	Material tidak sesuai spesifikasi	<i>QC</i> material masuk, <i>vendor approval</i>	<i>QC, Procurement</i>	Saat penerimaan
	Metode	Longsor galian / tertimpa material	<i>Shoring</i> , zona aman, APD	<i>Site Engineer, Safety Officer</i>	Selama pelaksanaan
	Finansial	Biaya tambahan akibat <i>rework</i>	Rencana mutu konstruksi secara ketat	<i>QC, Project Manager</i>	Selama pelaksanaan
Pekerjaan struktur menara	Sumberdaya manusia	<i>Rigger</i> jatuh dari ketinggian, tersambar petir	<i>Safety harness, lifeline</i> , sertifikasi <i>rigger</i> , larangan kerja saat hujan	<i>Rigger, Safety Officer</i>	Selama <i>erection</i>
	Material	Komponen cacat atau rusak	Pemeriksaan material sebelum <i>erection</i>	<i>QC, Procurement</i>	Sebelum <i>erection</i>
	Metode	<i>Crane</i> gagal angkat beban	Perawatan <i>crane</i> , sertifikasi operator	<i>Operator Crane, Safety Officer</i>	Selama <i>erection</i>
	Finansial	Biaya tambahan akibat kecelakaan & kerusakan material	Jamsostek, asuransi material & peralatan	<i>Finance Officer, Project Manager</i>	Selama <i>erection</i>
Pekerjaan pabrikan baja	Sumberdaya manusia	Pekerja terkena percikan las atau tertimpa material	APD las lengkap, pelindung area kerja	<i>Welder, Safety Officer</i>	Selama pekerjaan
	Material	Tabung gas bocor	Inspeksi tabung gas rutin	<i>Safety Officer, Mandor</i>	Harian
	Metode	Percikan memicu kebakaran	APAR disiapkan, SOP <i>hot work</i>	<i>Safety Officer, Mandor</i>	Selama pengelasan
	Finansial	Kerugian akibat kecelakaan & kebakaran	Jamsostek, polis asuransi proyek	<i>Finance Officer, Project Manager</i>	Selama proyek
Pekerjaan elektrik	Sumberdaya manusia	Teknisi jatuh saat instalasi	<i>Safety harness, lifeline</i>	Teknisi, <i>Safety Officer</i>	Selama instalasi
	Material	Kabel rusak saat penarikan	<i>Reel & roller</i> kabel	Teknisi, <i>QC</i>	Saat instalasi

Tahap Konstruksi	Aspek	Identifikasi Bahaya	Tindakan	Oleh	Waktu
	Metode	Sengatan listrik	<i>Lock-out/tag-out, insulated tools</i>	Teknisi, <i>Safety Officer</i>	Saat instalasi
	Finansial	Biaya tambahan akibat kerusakan kabel	QC material, kontrol logistik	<i>Procurement, Project Manager</i>	Saat instalasi
	Sumberdaya manusia	Teknisi cedera saat <i>handling</i> perangkat	Training <i>handling</i> , alat bantu angkat	Teknisi, Mandor	Saat pemasangan
	Material	Peralatan rusak saat pemasangan	<i>Packing & QC</i> perangkat	<i>Vendor, Procurement</i>	Sebelum pemasangan
Instalasi instrumen telekomunikasi	Metode	Sengatan listrik saat koneksi	<i>Lock-out/tag-out, insulated tools</i>	Teknisi, <i>Safety Officer</i>	Saat pemasangan
	Finansial	Biaya tambahan akibat kerusakan perangkat	Kontrak garansi <i>vendor</i>	<i>Project Manager, Vendor</i>	Setelah instalasi
	Sumberdaya manusia	Salah konfigurasi oleh <i>engineer</i>	<i>Checklist</i> konfigurasi, <i>double check</i>	<i>Engineer, Vendor</i>	Saat komisioning
	Material	Perangkat tidak kompatibel	Uji kompatibilitas awal	<i>Vendor, Engineer</i>	Sebelum komisioning
Komisioning & integrasi sistem	Metode	Gangguan listrik & radiasi RF	<i>Grounding, signage area RF</i>	<i>Engineer, Safety Officer</i>	Saat komisioning
	Finansial	<i>Downtime</i> membuat kerugian biaya	Perencanaan jadwal komisioning	<i>Project Manager</i>	Selama komisioning
	Sumberdaya manusia	Pekerja cedera karena <i>housekeeping</i> buruk	Supervisi pembersihan, APD	Mandor, <i>Safety Officer</i>	Saat <i>finishing</i>
	Material	Pekerja cedera akibat sisa material tercecer	Pemilahan limbah, pengumpulan material	Mandor, <i>Safety Officer</i>	Saat <i>finishing</i>
Finishing & pembersihan	Metode	Pekerja terpeleset akibat area kotor	Pembersihan rutin, jalur aman	Pekerja, Mandor	Saat <i>finishing</i>
	Finansial	Biaya tambahan akibat keterlambatan serah terima	Pemantauan proses & jadwal serah terima	<i>Project Manager</i>	Akhir konstruksi

4. Kesimpulan

Studi ini menekankan pentingnya pendekatan komprehensif dalam penilaian risiko pembangunan *Base Transceiver Station* (BTS) yang pada praktiknya merupakan proyek kompleks dengan tingkat risiko tinggi terhadap biaya, jadwal, mutu, serta keselamatan kerja. Untuk memperoleh pemetaan yang terukur, metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) digunakan dalam mengklasifikasikan sekaligus memprioritaskan risiko berdasarkan kajian literatur serta masukan pakar yang berpengalaman di bidang konstruksi telekomunikasi. Pendekatan ini memungkinkan setiap kategori risiko dianalisis secara sistematis sehingga dapat ditentukan tingkat urgensinya dalam proses pengendalian. Risiko terbagi ke dalam empat kategori utama, yaitu fisik, desain, ekonomi, dan bencana alam. Hasil analisis menunjukkan bahwa risiko fisik memiliki bobot dominan, diikuti risiko desain, ekonomi, dan bencana alam, dengan hasil penilaian risiko dalam tingkat sedang ke tinggi.

Risiko fisik terkait dengan aspek sumberdaya manusia, material, metode, serta finansial. Kondisi ini menuntut adanya pengendalian konstruksi yang ketat, keandalan rantai pasok, serta peningkatan kapasitas tenaga kerja melalui pelatihan yang berkesinambungan. Selanjutnya, risiko desain dapat terjadi karena spesifikasi yang tidak lengkap, kesalahan dalam rancangan, maupun perubahan desain di tengah pelaksanaan. Hal tersebut memerlukan perencanaan awal yang matang, kolaborasi lintas pemangku kepentingan, serta mekanisme *peer review* sebelum implementasi. Risiko ekonomi perlu diperhatikan karena dampaknya terhadap stabilitas proyek akibat inflasi, kenaikan harga material, dan fluktuasi nilai tukar. Strategi mitigasi dapat dilakukan melalui klausul eskalasi harga, *buffer* keuangan, serta langkah-langkah hedging. Sementara itu, risiko bencana alam, meski tercatat dengan bobot terkecil, tetapi berpotensi menimbulkan kerugian besar, sehingga strategi respons yang tepat mencakup seleksi lokasi pembangunan, rekayasa ketangguhan struktur, serta penyediaan asuransi komprehensif.

Analisis keselamatan memperlihatkan bahwa risiko tertinggi terjadi pada pekerjaan struktur menara, pekerjaan pondasi, proses pabrikasi, dan pekerjaan elektrik. Karena faktor manusia menjadi aspek dominan, integrasi sistem keselamatan kerja menjadi keharusan mutlak. Upaya yang dilakukan antara lain penerapan alat pelindung diri (APD), *briefing* harian, inspeksi peralatan, penggunaan *safety harness*, penerapan prosedur *lock-out/tag-out*, serta pengaturan jalur kendaraan dan alat berat. Dengan strategi respons yang terstruktur, pengalokasian tanggung jawab yang jelas pada *Project Manager* maupun *Project Director*, serta penanaman budaya keselamatan yang konsisten, pembangunan BTS dapat terlaksana lebih terjamin dalam aspek waktu, biaya, mutu, dan terutama keselamatan pekerja.

Daftar Pustaka

- Aladayleh, K. J., & Aladaileh, M. J. (2024). Applying Analytical Hierarchy Process (AHP) to BIM-Based Risk Management for Optimal Performance in Construction Projects. *Buildings* (Vol. 14, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/buildings14113632>
- Ali, M. B., Altamimi, A., Kazmi, S. A., Khan, Z. A., & Alyami, S. 2024. Sustainable Growth in the Telecom Industry through Hybrid Renewable Energy Integration: A Technical, Energy, Economic and Environmental (3E) Analysis. *Sustainability* (Vol. 16, Issue 14). <https://doi.org/10.3390/su16146180>
- Altamimi, A., Ali, M. B., Kazmi, S. A., & Khan, Z. A. 2024. Multi-Agent Reinforcement Learning Optimization Framework for On-Grid Electric Vehicle Charging from Base Transceiver Stations Using Renewable Energy and Storage Systems. *Energies* (Vol. 17, Issue 14). <https://doi.org/10.3390/en17143592>
- Amalin, R. E., & Handayani, K. D. M. E. 2017. Kriteria Lokasi Pembangunan Tower BTS (Base Transceiver System) di Kota Kediri. *Jurnal Teknik ITS*.
- Chou, J.-S., Liao, P.-C., & Yeh, C. D. 2021. Risk Analysis and Management of Construction and Operations in Offshore Wind Power Project. *Sustainability* (Vol. 13, Issue 13). <https://doi.org/10.3390/su13137473>
- Dunovic, I., Radujkovic, M., & Vukomanovic, M. 2016. Internal and external risk based assesment and evaluation for the large infrastructure projects. *Journal of Civil Engineering and Management*. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1128479>
- Huang, H., Zhang, Q., Xu, H., Li, Z., Tian, X., Fang, S., Zheng, J., Zhang, E., & Yang, D. 2024. Risk Identification and Safety Evaluation of Offshore Wind Power Submarine Cable Construction. *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 12, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/jmse12101718>

- Mustafa, M. A., & Al-Bahar, J. F. 1991. Project Risk Assessment Using the Analytic Hierarchy Process. IEEE Transactions on Engineering Management.
- Nugroho, W. 2020. Study on determining priority of Base Transceiver Station (BTS) construction. *Advances in Business, Management and Entrepreneurship* (pp. 167-171). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003131465-35>
- Nugroho, W, Astarini, S. D., & Prihartanto, E. 2025. Hierarchical Risk Assessment on the Construction Project of Base Transceiver Station. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 145–157. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v11i2.145>
- Osei-Kyei, R., Narbaev, T., & Ampratwum, G. 2022. A Scientometric Analysis of Studies on Risk Management in Construction Projects. *Buildings* (Vol. 12, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/buildings12091342>
- Refsdal, A., Solhaug, B., & Stølen, K. 2015. Risk identification. *SpringerBriefs in Computer Science*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23570-7_7
- Tereso, A., Santos, C., & Faria, J. 2025. Risk Management Practices in the Purchasing System of an Automotive Company. *Systems* (Vol. 13, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/systems13060444>
- Widyatmoko, & Mauludiyanto, A. 2015. Perencanaan Jumlah dan Lokasi Menara Base Transceiver Station (BTS) Baru pada Telekomunikasi Seluler di Kabupaten Lumajang Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process-TOPSIS (AHP-TOPSIS). *Jurnal Teknik ITS*.
- Zhang, Q., Huang, H., Xu, H., Li, Z., Tian, X., Fang, S., Wang, J., Xie, C., & Yang, D. 2024. A Hierarchical Analysis Method for Evaluating the Risk Factors of Pile Foundation Construction for Offshore Wind Power. *Sustainability* (Vol. 16, Issue 18). <https://doi.org/10.3390/su16187906>