

ANALISIS SUMBER DAYA PADA PROYEK KONSTRUKSI MENGGUNAKAN BAYESIAN NETWORK DAN STRUCTURAL EQUATION MODELING (SEM): STUDI KASUS PEMBANGUNAN GUDANG PT CKS

Purwanto¹, Joko Setiawan², Hermawan³

¹Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi GICI

Email: purwaseno@gmail.com¹

²Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi GICI

Email: joko.setiawan@stiegici.ac.id²

³Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi GICI

Email: awanhermawan.gici@gmail.com³

Abstract

The Success Of Construction Projects Heavily depends on the effective management of resources, including labor, materials, equipment, time, and cost. This study aims to analyze resource management in a warehouse construction project conducted by PT CKS and to identify key factors that influence project performance. A quantitative case study approach is employed, integrating Bayesian Network (BN) to model probabilistic relationships among physical resource variables, and Structural Equation Modeling (SEM) to analyze the causal relationships of psychological variables on project performance. Data were collected through questionnaires. The findings reveal that discrepancies in material procurement schedules, limited availability of skilled labor, and delayed decision-making are the main challenges. Meanwhile, motivation and organizational commitment have a significant impact on resource efficiency. The integration of BN and SEM provides a comprehensive perspective on the factors affecting project success and offers strategic recommendations for more optimal resource management. This research contributes both academically and practically to the field of construction project management.

Keywords: Resource Management, Construction Project, Bayesian Network, Structural Equation Modeling, Project Efficiency

1. PENDAHULUAN

Proyek konstruksi merupakan kegiatan usaha yang bersifat kompleks, tidak rutin, serta memiliki keterbatasan dalam hal waktu, anggaran, dan sumber daya. Setiap proyek juga memiliki spesifikasi produk akhir yang berbeda, sehingga menuntut pengelolaan yang terstruktur dan adaptif. Untuk mencapai hasil yang efektif dan efisien, dibutuhkan sistem manajemen proyek yang mampu mengelola berbagai elemen proyek secara terpadu, khususnya dalam sektor konstruksi.

Sektor konstruksi memiliki peran strategis dalam pembangunan nasional. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS RI), sektor ini menyumbang 10,23% terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) pada Triwulan I tahun 2024. Dengan proyeksi pertumbuhan pasar konstruksi sebesar 5,48% pada tahun 2025, kebutuhan akan infrastruktur yang memadai semakin meningkat, menjadikan sektor ini sebagai pilar penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi Indonesia.

Namun, dibalik potensinya yang besar, industri konstruksi nasional masih dihadapkan pada berbagai tantangan mendasar. Salah satu isu utama adalah tingginya angka keterlambatan proyek, yang menurut sejumlah laporan dapat mencapai hingga 38%. Keterlambatan ini umumnya disebabkan oleh pengelolaan sumber daya yang tidak optimal, khususnya terkait tenaga kerja, material, dan peralatan. Data juga menunjukkan adanya krisis tenaga kerja terampil, di mana hanya sekitar 10% dari total tenaga kerja yang memiliki kualifikasi memadai,

sementara sekitar 60% merupakan pekerja tanpa pelatihan formal. Ketimpangan ini berdampak langsung terhadap produktivitas, peningkatan biaya, dan penurunan mutu hasil konstruksi.

Tantangan tersebut menjadi semakin signifikan pada proyek-proyek strategis seperti pembangunan infrastruktur logistik, termasuk gudang. Pembangunan gudang memainkan peran vital dalam mendukung sistem rantai pasok nasional, terutama di tengah pertumbuhan ekonomi digital dan meningkatnya kebutuhan distribusi barang. Keterlambatan dalam proyek-proyek gudang tidak hanya merugikan kontraktor dari sisi biaya dan reputasi, tetapi juga berdampak pada potensi pendapatan pemilik karena fasilitas tidak dapat segera dimanfaatkan.

Salah satu contoh nyata terjadi pada proyek pembangunan gudang di Boja, Kendal, Jawa Tengah yang dilaksanakan oleh PT Cipta Karya Solusindo (PT CKS), sebuah perusahaan kontraktor umum yang bergerak dalam jasa konstruksi bangunan industri seperti pabrik, bengkel, dan gudang. Berdiri sejak tahun 2006 di Tangerang Selatan, PT CKS memiliki pengalaman lebih dari satu dekade di bidang ini. Berdasarkan evaluasi time schedule proyek di Boja, ditemukan deviasi negatif secara konsisten antara rencana kumulatif dan realisasi pekerjaan selama periode Juni hingga Desember 2024. Pada minggu ke-20, deviasi mencapai -10,5% dan baru mendekati nol di akhir proyek. Keterlambatan ini bukan disebabkan oleh faktor umum, melainkan dipicu oleh beberapa masalah operasional krusial di lapangan.

Sebagai contoh konkret, proyek tersebut mengalami keterlambatan pasokan tanah urugan yang menjadi material esensial untuk tahap pematangan lahan. Hal ini menyebabkan pekerjaan persiapan pondasi tertunda selama lebih dari dua minggu, menciptakan *idle time* bagi tim dan peralatan yang sudah siaga di lokasi. Situasi diperparah dengan kerusakan tak terduga pada mesin pancang hidrolik (*hydraulic pile driver*), yang mengakibatkan terhentinya seluruh aktivitas pemancangan tiang pondasi selama beberapa hari hingga perbaikan atau penggantian unit selesai dilakukan. Kedua insiden spesifik ini satu dari sisi material dan satu dari sisi peralatan secara langsung mengganggu jalur kritis (*critical path*) proyek, menyebabkan efek domino pada jadwal pekerjaan berikutnya, dan pada akhirnya berkontribusi pada pembengkakan biaya operasional.

Pengalaman tersebut menjadi pelajaran penting bagi PT CKS dalam mengelola proyek serupa di masa mendatang, termasuk proyek pembangunan gudang di Depok, Jawa Barat yang saat ini tengah berlangsung. Meskipun memiliki karakteristik proyek yang serupa, pengelolaan sumber daya masih menjadi tantangan utama. Temuan di lapangan menunjukkan bahwa koordinasi dan alokasi sumber daya tenaga kerja, material, dan peralatan belum sepenuhnya berjalan secara optimal. Setiap gangguan pada salah satu komponen, baik itu keterlambatan pasokan material maupun kegagalan fungsi peralatan, dapat menimbulkan dampak sistemik terhadap keseluruhan proses konstruksi.



Gambar 1. Data Kurva S Realisasi VS Target Proyek Pembangunan Gudang PT CKS

Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan pendekatan analisis yang lebih komprehensif dan berbasis data. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengelolaan sumber daya dalam proyek pembangunan gudang PT CKS di Depok secara kuantitatif, dengan mengintegrasikan metode Structural Equation Modeling (SEM) dan Bayesian Network (BN). Pendekatan ini memungkinkan identifikasi hubungan kausal dan probabilistik antar faktor penyebab keterlambatan, serta memberikan rekomendasi strategis yang berbasis bukti untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan proyek.

Alasan Pemilihan PT CKS sebagai Objek Penelitian: Pemilihan PT CKS sebagai objek penelitian dalam studi ini didasarkan pada beberapa pertimbangan strategis yang mendukung relevansi empiris, metodologis, dan praktis dalam konteks pengelolaan proyek konstruksi di Indonesia, yaitu: 1) Relevansi Proyek dengan Tujuan Penelitian. PT CKS saat ini sedang melaksanakan proyek pembangunan gudang yang merepresentasikan karakteristik proyek konstruksi berskala menengah dengan tingkat kompleksitas dan dinamika sumber daya yang cukup tinggi. Proyek ini secara nyata memperlihatkan ketergantungan terhadap efektivitas pengelolaan tenaga kerja, material, dan peralatan. Oleh karena itu, proyek ini merupakan studi kasus yang tepat untuk mengkaji secara komprehensif pengaruh manajemen sumber daya terhadap keberhasilan proyek menggunakan pendekatan Structural Equation Modeling (SEM) dan Bayesian Network (BN). 2) Konteks Industri Konstruksi Nasional. Proyek konstruksi gudang yang dijalankan oleh PT CKS mencerminkan tantangan umum yang dihadapi dalam industri konstruksi di Indonesia, seperti alokasi sumber daya yang tidak optimal, keterlambatan pengadaan material, serta pengambilan keputusan teknis yang belum berbasis data. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya relevan bagi PT CKS, tetapi juga memiliki potensi kontribusi praktis bagi pengembangan manajemen proyek konstruksi di tingkat nasional. 3) Ketersediaan Data dan Dukungan Lapangan. PT CKS memberikan dukungan penuh terhadap pelaksanaan penelitian ini, termasuk pemberian akses data, izin wawancara dengan personel kunci proyek, serta dukungan logistik dalam pengumpulan data. Kondisi ini memungkinkan peneliti memperoleh data primer yang valid dan reliabel untuk dianalisis secara kuantitatif dengan pendekatan SEM dan BN, sekaligus memperkuat validitas eksternal studi kasus. 4) Signifikansi Studi Kasus dalam Pengembangan Metode Analisis. Studi kasus pada proyek PT CKS diposisikan sebagai wahana untuk menguji efektivitas integrasi pendekatan SEM dan BN dalam situasi nyata. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan temuan yang aplikatif dan dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi strategis bagi PT CKS maupun perusahaan konstruksi lain yang menghadapi persoalan serupa dalam manajemen sumber daya. 5) Kontribusi terhadap Pengembangan Model Keilmuan. Hingga saat ini, penelitian yang secara khusus mengintegrasikan pendekatan SEM dan BN dalam konteks proyek pembangunan gudang di Indonesia masih sangat terbatas. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi terhadap pemecahan masalah praktis, tetapi juga memperkaya khazanah metodologis dalam studi manajemen konstruksi, khususnya dalam upaya membangun model manajemen proyek berbasis data dan kecerdasan buatan (AI) di masa depan.

Manajemen, dalam pengertian umum, merupakan suatu proses sistematis yang mencakup perencanaan, pengorganisasian, pengarahan, dan pengendalian sumber daya untuk mencapai tujuan organisasi secara efektif dan efisien (Robbins & Coulter, 2018). Dalam konteks proyek konstruksi, prinsip-prinsip manajemen tersebut diterapkan dalam kerangka kerja manajemen proyek, yang berfungsi untuk memastikan bahwa seluruh tahapan proyek dari inisiasi hingga penutupan berjalan sesuai dengan rencana dan tujuan yang ditetapkan. Menurut Soeharto (2019), keberhasilan pelaksanaan proyek konstruksi secara signifikan dipengaruhi oleh ketersediaan tenaga kerja yang memadai, kompetensi yang sesuai dengan tuntutan pekerjaan, serta produktivitas kerja yang tinggi. Tenaga kerja yang tidak terampil atau tidak mencukupi dalam jumlah akan mengakibatkan berbagai permasalahan seperti *idle time*, pengkerjaan ulang (*rework*), serta penurunan kualitas hasil pekerjaan. Kondisi ini berdampak langsung pada efisiensi biaya

dan ketepatan jadwal pelaksanaan. Untuk keperluan penelitian ini, efektivitas pengelolaan SDM diukur melalui tiga indikator utama berikut: Ketersediaan Tenaga Kerja, Kompetensi/Keahlian dan Produktivitas Kerja.

Manajemen material adalah serangkaian kegiatan yang meliputi perencanaan kebutuhan material, pengadaan, pengangkutan, penyimpanan, distribusi di lapangan, hingga pengendalian penggunaan. Menurut Ardit dan Gunaydin (2019), kegagalan dalam sistem manajemen material merupakan salah satu penyebab utama keterlambatan proyek dan pembengkakan biaya konstruksi, terutama dalam proyek-proyek berskala besar dan kompleks. Dalam proyek gudang PT CKS yang menjadi fokus penelitian ini, keterlambatan dalam pengiriman material tanah urugan dan baja ringan pada tahap awal pelaksanaan terbukti memicu keterlambatan aktivitas struktur lainnya. Untuk keperluan penelitian ini, efektivitas pengelolaan sumber daya material diukur melalui tiga indikator kunci berikut: Ketepatan Waktu Pengadaan, Kualitas dan Kesesuaian Spesifikasi dan Efisiensi Penggunaan.

Menurut Soeharto (2019), manajemen peralatan konstruksi meliputi pemilihan jenis alat yang sesuai dengan jenis pekerjaan, penjadwalan mobilisasi dan demobilisasi, serta pengaturan jadwal pemeliharaan berkala guna menjaga kinerja dan keandalan alat (*equipment reliability*). Tanpa manajemen peralatan yang baik, risiko kerusakan alat, *idle time*, dan over-utilization sangat mungkin terjadi, yang pada akhirnya mengganggu kesinambungan aktivitas proyek. Dalam konteks penelitian ini, efektivitas pengelolaan sumber daya peralatan diukur melalui tiga indikator utama berikut: Ketersediaan dan Keandalan, Kesesuaian dengan Pekerjaan dan Efektivitas Penggunaan.

Keberhasilan sebuah proyek konstruksi telah lama dikaji dalam literatur manajemen proyek dan secara konvensional diukur berdasarkan tiga kriteria utama yang dikenal sebagai Segitiga Besi atau Iron Triangle: Biaya (*Cost*), Waktu (*Time*), dan Mutu (*Quality*) (Kerzner, 2019). Ketiga aspek ini secara integral mencerminkan efisiensi dan efektivitas manajemen proyek, serta menjadi indikator utama dalam menilai kinerja proyek dari perspektif pemilik proyek (*owner*), kontraktor, dan pemangku kepentingan lainnya. Indikator Keberhasilan Proyek Konstruksi yaitu Aspek Waktu, Aspek Biaya dan Aspek Mutu

Penelitian ini menggunakan pendekatan hibrida yang mengintegrasikan dua metode analisis kuantitatif, yaitu *Structural Equation Modeling* (SEM) dan *Bayesian Network* (BN). Pemilihan metode ini dilakukan secara strategis guna menjawab kompleksitas hubungan antar variabel sumber daya dan keberhasilan proyek konstruksi, yang melibatkan hubungan kausal, ketidakpastian, dan pola interaksi non-linear. Penggabungan SEM dan BN bertujuan untuk membangun model analisis yang bersifat komprehensif, analitik, dan sekaligus prediktif, sehingga dapat digunakan tidak hanya untuk menjelaskan fenomena yang telah terjadi, tetapi juga untuk mensimulasikan kemungkinan hasil proyek berdasarkan kondisi sumber daya yang berbeda. Dengan demikian, pendekatan ini menawarkan keunggulan dari sisi kedalaman pemahaman teoritis sekaligus ketajaman dalam pemodelan praktis di lapangan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksplanatori dengan desain studi kasus, yang diterapkan pada proyek pembangunan gudang milik PT CKS yang berlokasi di Cimanggis, Depok, Jawa Barat. Studi kasus dipilih karena memungkinkan peneliti untuk melakukan eksplorasi mendalam terhadap dinamika pengelolaan sumber daya pada proyek konstruksi dalam konteks nyata, sekaligus menguji model teoritis yang telah dikembangkan. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian ini bertujuan untuk menguji hubungan antar variabel secara terukur melalui data numerik dan instrumen kuesioner, serta menarik kesimpulan yang dapat digeneralisasi pada konteks serupa. Penelitian ini termasuk dalam jenis penelitian eksplanatori, karena bertujuan menjelaskan pengaruh kausal antar variabel, khususnya

bagaimana sumber daya (SDM, material, dan peralatan) mempengaruhi keberhasilan proyek konstruksi.

Pengumpulan data dilakukan selama periode pelaksanaan proyek, yaitu dari Mei hingga Juli 2025, bertepatan dengan tahap pembangunan utama gudang, di mana aktivitas penggunaan sumber daya sangat intensif dan variatif. Hal ini memungkinkan observasi yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan. Adapun pendekatan analisis yang digunakan bersifat integratif, yaitu menggabungkan dua metode statistik lanjutan: 1) *Structural Equation Modeling* (SEM). Digunakan untuk menganalisis hubungan kausal antar variabel berdasarkan teori dan hipotesis yang telah dirumuskan. SEM memungkinkan pengujian konstruk laten dan indikator secara simultan, serta memeriksa kekuatan dan signifikansi pengaruh antar jalur dalam model. 2) *Bayesian Network* (BN). *Bayesian Network* (BN), atau dalam Bahasa Indonesia disebut sebagai *Jaringan Bayesian*, adalah suatu metode pemodelan grafis yang digunakan untuk merepresentasikan hubungan sebab-akibat antar variabel serta menangani ketidakpastian secara matematis melalui probabilitas bersyarat (*conditional probability*). BN pertama kali dipopulerkan oleh Judea Pearl pada tahun 1988 sebagai alat untuk *probabilistic reasoning*, yang memungkinkan pengguna untuk melakukan inferensi terhadap suatu sistem berdasarkan informasi yang tersedia atau baru masuk (*evidence*). Pendekatan hibrida yang mengintegrasikan *Structural Equation Modeling* (SEM) dan *Bayesian Network* (BN) dalam satu kerangka penelitian merupakan strategi yang semakin banyak digunakan dalam studi empiris modern, terutama dalam konteks sistem yang kompleks dan penuh ketidakpastian seperti proyek konstruksi. Kedua metode ini memiliki kekuatan masing-masing, dan ketika dikombinasikan, keduanya dapat saling melengkapi baik dari sisi validasi teoritis maupun kemampuan prediktif. Integrasi antara SEM dan BN dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis, sebagai berikut: 1) Pengujian Model Teoritis dengan SEM. Langkah pertama adalah membangun dan menguji model teoritis dengan SEM. Variabel SDM, material, dan peralatan diuji pengaruhnya terhadap keberhasilan proyek. Hasil analisis memberikan struktur jalur kausal yang terbukti signifikan secara statistik dan mendukung teori yang dikembangkan di kajian pustaka. 2) Penetapan Struktur BN Berdasarkan Hasil SEM. Struktur jaringan BN kemudian disusun mengikuti model jalur dari SEM. Misalnya, jika SEM menunjukkan bahwa SDM dan material berpengaruh langsung terhadap keberhasilan proyek, maka struktur BN memuat hubungan ini dalam bentuk *directed acyclic graph* (DAG), dimana SDM dan material menjadi parent nodes dari node keberhasilan proyek. 3) Pengisian Conditional Probability Table (CPT). Setiap node dalam BN diisi dengan nilai probabilitas bersyarat, yang diperoleh dari data kuesioner responden. CPT ini menyajikan peluang terjadinya suatu kondisi (misalnya, keberhasilan proyek = tinggi) berdasarkan kombinasi kondisi induknya (misalnya, SDM = tinggi, material = sedang). 3) Simulasi Skenario dan Diagnostik Prediktif. Setelah CPT terisi, BN digunakan untuk menjalankan simulasi berbagai skenario (*what-if analysis*). Misalnya, bagaimana peluang keberhasilan proyek jika terjadi penurunan kualitas material, atau kekurangan tenaga kerja. Model juga dapat mendukung *diagnostic reasoning*, yaitu menelusuri penyebab potensial dari probabilitas keberhasilan proyek yang rendah.

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh individu yang terlibat secara langsung dalam kegiatan perencanaan dan pelaksanaan proyek pembangunan gudang oleh PT CKS yang berlokasi di Cimanggis, Depok, Jawa Barat. Populasi ini terdiri atas berbagai peran dan tingkatan jabatan yang memiliki pengaruh terhadap proses pengelolaan sumber daya proyek. Teknik pengambilan sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah total sampling atau sensus, di mana seluruh anggota populasi yang relevan dan dapat dijangkau dijadikan responden penelitian. Pemilihan metode ini dilatarbelakangi oleh karakteristik proyek yang bersifat terbatas (*single case project*), namun melibatkan berbagai aktor penting dari level strategis hingga eksekusi di lapangan. Berdasarkan data awal tim proyek PT CKS dan daftar hadir harian proyek, jumlah target responden diperkirakan antara 50 hingga 100 orang, tergantung pada ketersediaan dan

partisipasi aktif selama proses pengumpulan data. Rentang ini dianggap mencukupi untuk memenuhi kebutuhan analisis kuantitatif dalam *Structural Equation Modeling* (SEM) dan untuk penyusunan *Conditional Probability Table* (CPT) dalam *Bayesian Network* (BN), mengingat jumlah indikator penelitian yang relatif moderat.

Seluruh proses analisis data kuantitatif dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap dan sistematis menggunakan dua perangkat lunak utama, yaitu JASP (*Jeffrey's Amazing Statistics Program*) versi 0.19.3 untuk analisis statistik dan Netica untuk pemodelan jaringan probabilistik. Kombinasi ini memungkinkan pendekatan yang integratif dalam mengevaluasi hubungan antar variabel sekaligus memperkirakan probabilitas keberhasilan proyek berdasarkan kondisi sumber daya yang ada.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil dari proses pengumpulan dan analisis data yang dilakukan berdasarkan desain penelitian yang telah dijelaskan. Tujuan utama bab ini adalah untuk memaparkan temuan empiris dari data kuesioner yang telah dikumpulkan dan dianalisis menggunakan pendekatan integratif, yaitu *Structural Equation Modeling* (SEM) dan *Bayesian Network* (BN). Seluruh hasil akan dibandingkan dan dikaitkan dengan teori, hipotesis, serta temuan penelitian terdahulu guna memperoleh pemahaman yang komprehensif.

Uji Validitas Instrumen Penelitian

Uji validitas bertujuan untuk mengukur sejauh mana instrumen kuesioner dapat mengukur apa yang seharusnya diukur, yaitu apakah setiap item dalam kuesioner benar-benar merepresentasikan konstruk (variabel) yang dimaksud. Pada penelitian ini, uji validitas dilakukan menggunakan analisis korelasi Pearson (*Pearson Product Moment*) dengan bantuan *software* JASP. Kriteria penilaian validitas mengacu pada pendapat Sugiyono (2019), yaitu apabila nilai koefisien korelasi (r) $> 0,30$ dan nilai signifikansi (p -value) $< 0,05$, maka item dinyatakan valid. Hasil uji validitas terhadap seluruh item kuesioner yang terdiri dari empat variabel utama, yaitu Sumber Daya Manusia (SDM), Material, Peralatan, dan Keberhasilan Proyek, ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil Uji Validitas Instrumen Penelitian

Factor loadings

Factor	Indicator	Estimate	Std. Error	z-value	p	95% Confidence Interval	
						Lower	Upper
SDM	A1	1.220	0.140	8.746	< .001	0.947	1.494
	A2	1.215	0.132	9.169	< .001	0.955	1.475
	A3	1.226	0.136	8.985	< .001	0.958	1.493
Material	B1	1.064	0.119	8.912	< .001	0.830	1.298
	B2	0.827	0.104	7.952	< .001	0.623	1.031
	B3	0.980	0.104	9.407	< .001	0.776	1.184
Peralatan	C1	1.045	0.158	6.622	<	0.736	1.354

Factor loadings

Factor	Indicator	Estimate	Std. Error	z-value	p	95% Confidence Interval		
						Lower	Upper	
Keberhasilan	C2	1.172	0.124	9.481	<.001	0.929	1.414	
	D1	1.131	0.115	9.826	<.001	0.905	1.356	
D2	D3	0.946	0.119	7.957	<.001	0.713	1.179	
D3		0.937	0.105	8.885	<.001	0.730	1.144	

Sumber: Data diolah, 2025

Validitas Variabel Sumber Daya Manusia (SDM)

Variabel SDM diukur melalui tiga indikator: A1 (Ketersediaan tenaga kerja), A2 (Kompetensi tenaga kerja), dan A3 (Produktivitas tenaga kerja). Uji validitas terhadap ketiga indikator dilakukan menggunakan analisis korelasi Pearson (*Pearson Product Moment*) dengan bantuan perangkat lunak JASP. Kriteria penilaian validitas mengacu pada pedoman yang ditetapkan oleh Sugiyono (2019), yaitu: Nilai koefisien korelasi (r) $> 0,30$ dan Nilai signifikansi (p -value) $< 0,05$.

Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan nilai korelasi sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Uji korelasi Pearson Sumber Daya Manusia

Pearson's Correlations

			n	Pearson's r	p	Lower 95% CI	Upper 95% CI	Covariance
A	-	A	10	0.557	<.001	0.405	0.679	1.344
1	2	0						
A	-	A	10	0.623	<.001	0.487	0.730	1.523
1	3	0						
A	-	A	10	0.690	<.001	0.571	0.781	1.629
2	3	0						

Sumber: Data diolah, 2025

Hasil analisis korelasi dari data penelitian adalah sebagai berikut: a) Korelasi antara indikator A1 dan A2 menunjukkan nilai $r = 0.557$ dengan $p < 0.001$. b) Korelasi antara indikator A1 dan A3 menunjukkan nilai $r = 0.623$ dengan $p < 0.001$. c) Korelasi antara indikator A2 dan A3 menunjukkan nilai $r = 0.690$ dengan $p < 0.001$. d) Koefisien korelasi (r) berada dalam kisaran sedang hingga kuat (antara 0.55 hingga 0.69). e) Signifikansi statistik < 0.001 , yang berarti hasilnya sangat signifikan pada tingkat kepercayaan 95%.

Hasil ini mengindikasikan bahwa ketiga indikator SDM (A1, A2, dan A3) saling berkorelasi positif dan signifikan satu sama lain. Artinya, setiap indikator mampu merepresentasikan konstruk SDM secara valid. Tidak ada satupun indikator yang memiliki nilai korelasi rendah atau tidak signifikan. Dengan demikian, berdasarkan analisis korelasi *Pearson*, seluruh indikator

pada variabel Sumber Daya Manusia (SDM) dinyatakan valid dan layak digunakan untuk analisis lanjutan dalam model struktural dan analisis probabilistik.

Validitas Variabel Material

Variabel Material diukur melalui indikator B1 (Ketersediaan material), B2 (Kualitas material), dan B3 (Ketepatan waktu pengiriman material). Uji validitas dilakukan dengan metode analisis korelasi *Pearson* menggunakan bantuan *software* JASP. Kriteria validitas yang digunakan tetap mengacu pada pedoman Sugiyono (2019), yaitu: Koefisien korelasi (r) $> 0,30$ dan Nilai signifikansi (p -value) $< 0,05$.

Hasil uji korelasi antar item adalah:

Tabel 3. Hasil Uji korelasi Pearson Material

Pearson's Correlations

		n	Pearson's r	p	Lower 95% CI	Upper 95% CI	Covariance	
B1	-	B2	100	0.589	< .001	0.444	0.704	0.911
B1	-	B3	100	0.700	< .001	0.584	0.788	1.141
B2	-	B3	100	0.501	< .001	0.338	0.635	0.695

Sumber: Data diolah, 2025

Seluruh pasangan indikator variabel Material menunjukkan nilai korelasi yang: a) Positif dan signifikan secara statistik, dengan p -value $< 0,001$. b) Memiliki koefisien korelasi di atas 0,50, yang menunjukkan hubungan korelatif sedang hingga kuat antar indikator. Temuan ini mengindikasikan bahwa setiap indikator pada variabel Material (B1, B2, B3) saling berhubungan secara positif dan signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa instrumen pengukuran untuk variabel Material valid secara konstruk. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh indikator variabel Material layak digunakan dalam model penelitian untuk proses analisis lanjutan menggunakan SEM maupun BN.

Validitas Variabel Peralatan

Pengujian validitas selanjutnya dilakukan pada variabel Peralatan, yang diukur melalui tiga indikator: ketersediaan peralatan (C1), kondisi peralatan (C2), dan efisiensi penggunaan alat (C3). Metode analisis korelasi *Pearson* dengan kriteria $r > 0,30$ dan p -value $< 0,05$ kembali digunakan untuk pengujian ini.

Tabel 4. Hasil Uji korelasi Pearson Peralatan

Pearson's Correlations

		n	Pearson's r	p	Lower 95% CI	Upper 95% CI	Covariance	
C1	-	C2	100	0.572	< .001	0.423	0.691	1.345
C1	-	C3	100	0.469	< .001	0.301	0.610	1.042
C2	-	C3	100	0.710	< .001	0.596	0.795	1.360

Sumber: Data diolah, 2025

Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa semua pasangan indikator dari variabel Peralatan memiliki hubungan yang positif dan signifikan secara statistik. Nilai koefisien korelasi yang diperoleh berkisar antara 0.469 hingga 0.710, yang mengindikasikan hubungan sedang hingga kuat antar indikator. Korelasi tertinggi terjadi antara C2 (kondisi peralatan) dan C3 (efisiensi penggunaan), yang menunjukkan hubungan yang sangat kuat dan relevan secara konseptual. Korelasi antara C1 (ketersediaan) dengan indikator lain juga signifikan, meskipun sedikit lebih rendah, namun tetap memenuhi kriteria validitas. Dengan demikian, seluruh indikator pada variabel Peralatan terbukti valid dan dapat digunakan sebagai bagian dari model pengukuran dalam penelitian ini.

Validitas Variabel Keberhasilan Proyek

Pengujian validitas terakhir dilakukan pada variabel dependen, yaitu Keberhasilan Proyek, yang diukur melalui tiga indikator: pencapaian mutu (D1), ketepatan waktu (D2), dan kesesuaian biaya (D3). Metode analisis korelasi *Pearson* dengan kriteria $r > 0,30$ dan $p\text{-value} < 0,05$ digunakan dalam pengujian ini.

Tabel 5. Hasil Uji korelasi Pearson Keberhasilan proyek

Pearson's Correlations

		n	Pearson's r	p	Lower 95% CI	Upper 95% CI	Covariance	
D1	-	D2	100	0.600	< .001	0.458	0.713	0.915
D1	-	D3	100	0.412	< .001	0.235	0.563	0.689
D2	-	D3	100	0.589	< .001	0.444	0.704	0.890

Sumber: Data diolah, 2025

Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh pasangan indikator memiliki korelasi yang positif dan signifikan: a) Korelasi tertinggi terjadi antara D1 (mutu) dan D2 (waktu) dengan nilai $r = 0.600$, mengindikasikan bahwa mutu pekerjaan yang tinggi cenderung dicapai bersamaan dengan ketepatan waktu penyelesaian proyek. b) Korelasi antara D1 dan D3 (biaya) serta D2 dan D3 juga signifikan secara statistik, meskipun dengan nilai yang sedikit lebih rendah, namun tetap dalam kategori hubungan yang moderat hingga kuat. Berdasarkan hasil tersebut, ketiga indikator dinyatakan valid dalam merepresentasikan konstruk variabel Keberhasilan Proyek. Ini menguatkan bahwa mutu, waktu, dan biaya merupakan aspek penting yang saling terkait dalam menilai keberhasilan proyek konstruksi.

Uji Reliabilitas Instrumen Penelitian

Uji reliabilitas dilakukan untuk menilai konsistensi internal dari instrumen kuesioner, yaitu sejauh mana butir-butir pertanyaan dalam satu konstruk menghasilkan hasil yang konsisten. Dalam penelitian ini, uji reliabilitas dilakukan menggunakan metode *Cronbach's Alpha*, dengan bantuan *software JASP* versi terbaru. Menurut kriteria yang dikemukakan oleh Hair et al. (2014), suatu konstruk dianggap reliabel apabila nilai *Cronbach's Alpha* (α) mencapai $\geq 0,70$. Semakin tinggi nilai alpha, semakin baik tingkat konsistensi antar butir pernyataan dalam mengukur konstruk yang dimaksud.

Reliabilitas Variabel Sumber Daya Manusia (SDM)

Pengujian reliabilitas pertama dilakukan terhadap variabel Sumber Daya Manusia (SDM), yang diukur menggunakan tiga indikator utama, yaitu ketersediaan tenaga kerja (A1), kompetensi tenaga kerja (A2), dan produktivitas tenaga kerja (A3). Uji reliabilitas ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh indikator dalam variabel SDM memiliki konsistensi internal yang tinggi dalam mengukur konstruk yang sama.

Berdasarkan hasil analisis menggunakan software JASP, diperoleh nilai *Cronbach's Alpha* (α) sebesar 0.832 dan *McDonald's Omega* (ω) sebesar 0.835. Kedua nilai ini berada jauh di atas ambang batas minimal reliabilitas yang disarankan, yaitu 0,70 (Hair et al., 2014). Nilai *Guttman's Lambda 2* dan *Lambda 6* juga mendukung kesimpulan ini, masing-masing sebesar 0.833 dan 0.775. Tabel berikut merangkum hasil uji reliabilitas untuk variabel SDM:

Tabel 6. Hasil Uji reliabilitas Sumber Daya Manusia

Frequentist Scale Reliability Statistics

Estimate	McDonald's ω	Cronbach's α	Guttman's $\lambda 2$	Guttman's $\lambda 6$
Point estimate	0.835	0.832	0.833	0.775
95% CI lower bound	0.779	0.765	0.740	0.670
95% CI upper bound	0.890	0.883	0.892	0.851

Sumber: Data diolah, 2025

Nilai *Cronbach's Alpha* yang tinggi mengindikasikan bahwa ketiga indikator (A1, A2, dan A3) saling konsisten dan homogen dalam mengukur aspek-aspek dari sumber daya manusia pada proyek. Dengan demikian, instrumen pengukuran variabel SDM dalam penelitian ini dapat dinyatakan sangat reliabel.

Reliabilitas Variabel Material

Pengujian reliabilitas untuk variabel Material dilakukan terhadap tiga indikator utama, yaitu ketersediaan material (B1), kualitas material (B2), dan ketepatan waktu pengiriman material (B3). Tujuan dari uji ini adalah untuk menilai konsistensi internal instrumen dalam mengukur persepsi responden terkait pengelolaan material pada proyek konstruksi.

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan software JASP, diperoleh nilai *Cronbach's Alpha* (α) sebesar 0.817 dan nilai *McDonald's Omega* (ω) sebesar 0.834. Selain itu, nilai *Guttman's Lambda 2* dan *Lambda 6* masing-masing tercatat sebesar 0.822 dan 0.761, yang juga berada di atas ambang batas minimum 0,70 sebagaimana direkomendasikan oleh Hair et al. (2014). Tabel berikut menyajikan ringkasan statistik reliabilitas untuk variabel Material:

Tabel 7. Hasil Uji reliabilitas Material

Frequentist Scale Reliability Statistics

Estimate	McDonald's ω	Cronbach's α	Guttman's $\lambda 2$	Guttman's $\lambda 6$
Point estimate	0.834	0.817	0.822	0.761
95% CI lower bound	0.778	0.746	0.730	0.662
95% CI upper bound	0.890	0.871	0.877	0.833

Sumber: Data diolah, 2025

Nilai-nilai tersebut mengindikasikan bahwa instrumen pengukuran variabel Material memiliki tingkat reliabilitas yang tinggi. Dengan demikian, ketiga indikator (B1, B2, dan B3) dinilai konsisten dalam merepresentasikan konstruk Material, dan dapat digunakan secara andal dalam analisis lanjutan.

Reliabilitas Variabel Peralatan

Variabel Peralatan diukur melalui tiga indikator, yaitu ketersediaan peralatan (C1), kondisi peralatan (C2), dan efisiensi penggunaan alat (C3). Uji reliabilitas dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana ketiga indikator tersebut secara konsisten mengukur konstruk yang sama.

Berdasarkan hasil analisis menggunakan perangkat lunak JASP, diperoleh nilai *Cronbach's Alpha* (α) sebesar 0.800, dan *McDonald's Omega* (ω) sebesar 0.806. Keduanya melampaui batas minimum 0.70 yang disarankan oleh Hair et al. (2014), sehingga mengindikasikan bahwa instrumen memiliki tingkat konsistensi internal yang baik. Dukungan tambahan juga diperoleh dari nilai *Guttman's Lambda-2* sebesar 0.802 dan *Lambda-6* sebesar 0.757, yang berada dalam rentang yang dapat diterima untuk menyatakan reliabilitas instrumen.

Tabel 8. Ringkasan reliabilitas variabel Peralatan

Frequentist Scale Reliability Statistics

Estimate	McDonald' s ω	Cronbach' s α	Guttman's $\lambda 2$	Guttman's $\lambda 6$
Point estimate	0.806	0.800	0.802	0.757
95% CI lower bound	0.742	0.718	0.696	0.650
95% CI upper bound	0.871	0.860	0.878	0.842

Sumber: Data diolah, 2025

Dengan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa instrumen pengukuran untuk variabel Peralatan dinyatakan reliabel. Ketiga indikator saling mendukung dan menunjukkan stabilitas dalam pengukuran, sehingga layak untuk digunakan dalam analisis lanjutan dalam penelitian ini.

Reliabilitas Variabel Keberhasilan Proyek

Variabel Keberhasilan Proyek merupakan variabel dependen dalam penelitian ini dan diukur melalui tiga indikator utama yang dikenal dalam kerangka *triple constraint* manajemen proyek, yaitu mutu pekerjaan (D1), ketepatan waktu penyelesaian proyek (D2), dan kesesuaian anggaran biaya (D3).

Hasil pengujian reliabilitas menggunakan *software* JASP menunjukkan bahwa nilai *Cronbach's Alpha* (α) sebesar 0.771, dan *McDonald's Omega* (ω) sebesar 0.777. Nilai-nilai ini melebihi batas minimum 0,70 yang direkomendasikan oleh Hair et al. (2014), sehingga mengindikasikan bahwa alat ukur memiliki konsistensi internal yang memadai. Sebagai pelengkap, nilai *Guttman's Lambda-2* tercatat sebesar 0.773, sedangkan *Lambda-6* sebesar 0.713, yang keduanya juga berada dalam kisaran yang menunjukkan reliabilitas yang dapat diterima.

Tabel 9. Ringkasan Reliabilitas Variabel Keberhasilan Proyek

Frequentist Scale Reliability Statistics

Estimate	McDonald' s ω	Cronbach' s α	Guttman's $\lambda 2$	Guttman's $\lambda 6$
Point estimate	0.777	0.771	0.773	0.713
95% CI lower bound	0.705	0.678	0.679	0.608
95% CI upper bound	0.850	0.840	0.841	0.802

Sumber: Data diolah, 2025

Dengan seluruh nilai reliabilitas yang melebihi ambang batas minimum, maka instrumen untuk variabel Keberhasilan Proyek dapat dinyatakan reliabel. Ketiga indikator (D1, D2, D3) secara konsisten mengukur konsep keberhasilan proyek dan layak digunakan dalam analisis lanjutan menggunakan pendekatan *Structural Equation Modeling* (SEM) maupun *Bayesian Network* (BN).

Kesimpulan Uji Reliabilitas

Berdasarkan hasil pengujian reliabilitas yang telah dilakukan secara terpisah terhadap setiap variabel penelitian, diperoleh bahwa seluruh variabel memiliki tingkat konsistensi internal yang memadai. Pengukuran dilakukan dengan dua pendekatan utama, yaitu *Cronbach's Alpha* (α) dan *McDonald's Omega* (ω), yang keduanya memberikan hasil yang konsisten dan meyakinkan.

Tabel 20. Ringkasan Hasil Uji Reliabilitas

Reliability		
	Coefficie nt α	Coefficien t ω
Keberhasila n	0.771	0.777
SDM	0.832	0.835
Material	0.817	0.825
Peralatan	0.800	0.805
total	0.922	0.926

Sumber: Data diolah, 2025

Seluruh nilai *Cronbach's Alpha* berada di atas ambang batas minimum 0,70 (Hair et al., 2014), yang menunjukkan bahwa seluruh konstruk dalam penelitian ini tergolong reliabel. Bahkan, skor reliabilitas gabungan dari seluruh skala instrumen menunjukkan nilai $\alpha = 0.922$, yang mengindikasikan tingkat konsistensi internal yang sangat tinggi secara keseluruhan.

Instrumen kuesioner yang digunakan dalam penelitian ini terbukti memiliki reliabilitas yang baik hingga sangat baik. Hal ini berarti bahwa instrumen tersebut konsisten dalam mengukur konstruk yang dimaksud, serta menghasilkan data yang layak dan dapat diandalkan untuk digunakan dalam analisis lebih lanjut seperti *Structural Equation Modeling* (SEM) dan *Bayesian Network* (BN).

Uji Normalitas

Pengujian asumsi normalitas dilakukan sebagai prasyarat analisis *Structural Equation Modeling* (SEM) untuk memeriksa apakah data penelitian memenuhi asumsi metode estimasi *Maximum Likelihood* (ML). Evaluasi dilakukan melalui *Uji Shapiro-Wilk* serta pemeriksaan nilai *skewness* dan *kurtosis*, dengan hasil yang disajikan pada Tabel.

Tabel 21. Hasil Uji Normalitas

Descriptive Statistics

Indikator	Valid	Std. Deviation	Skewness	Std. Error of Skewness	Kurtosis	Std. Error of Kurtosis	Shapiro-Wilk	P-value of Shapiro-Wilk
A1	100	1.580	-0.927	0.241	0.461	0.478	0.871	< .001
A2	100	1.527	-0.644	0.241	0.018	0.478	0.914	< .001
A3	10	1.54	-0.881	0.24	0.289	0.478	0.88	< .001

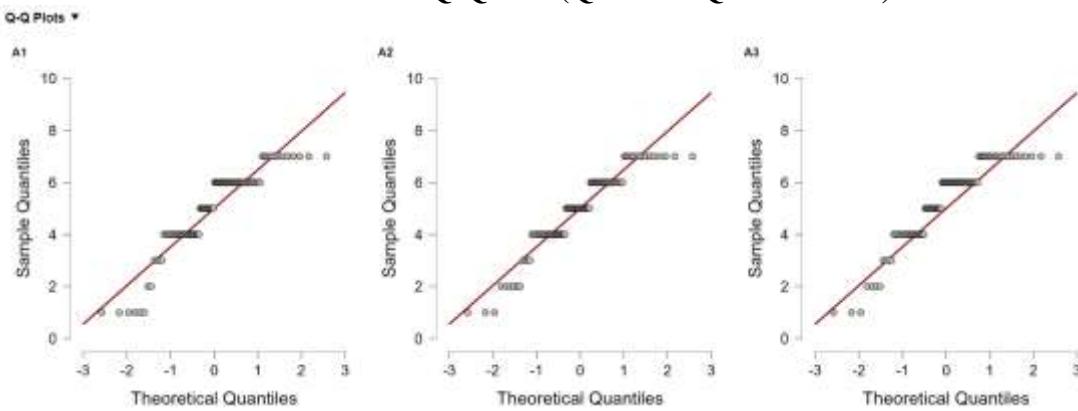
	0	6		1			1	
B1	10	1.34	-0.333	0.24	0.041	0.478	0.91	< .001
	0	8		1			6	
B2	10	1.14	-1.030	0.24	0.961	0.478	0.84	< .001
	0	7		1			7	
B3	10	1.20	-0.930	0.24	0.683	0.478	0.87	< .001
	0	9		1			5	
C1	10	1.65	-0.675	0.24	-	0.478	0.89	< .001
	0	0		1	0.491		0	
C2	10	1.42	-1.060	0.24	0.661	0.478	0.85	< .001
	0	5		1			9	
C3	10	1.34	-1.267	0.24	1.423	0.478	0.83	< .001
	0	4		1			3	
D1	10	1.29	-1.002	0.24	0.337	0.478	0.82	< .001
	0	9		1			8	
D2	10	1.17	-0.569	0.24	-	0.478	0.84	< .001
	0	4		1	0.579		8	
D3	10	1.28	0.052	0.24	-	0.478	0.83	< .001
	0	7		1	1.277		8	

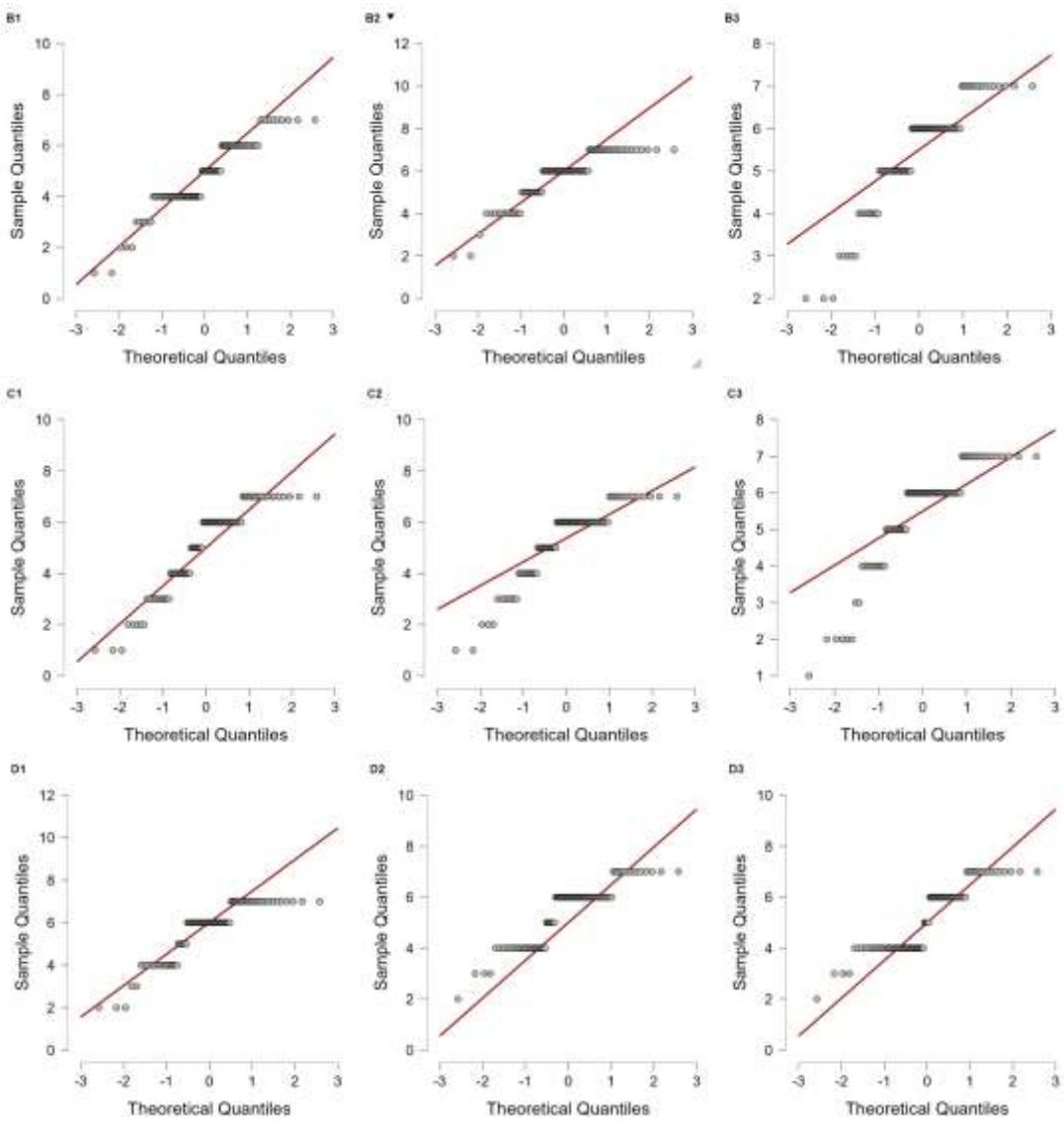
Sumber: Data diolah, 2025

Hasil pengujian formal menggunakan *Uji Shapiro-Wilk* menunjukkan bahwa seluruh indikator variabel memiliki nilai signifikansi (*p-value*) < .001. Karena nilai ini lebih kecil dari tingkat signifikansi 0.05, maka hipotesis nol tentang distribusi normal ditolak untuk semua variabel.

Selanjutnya, pemeriksaan nilai deskriptif menunjukkan adanya masalah *skewness* (kemiringan) dan *kurtosis* (keruncingan). Sebagian besar variabel memiliki nilai *skewness* negatif yang signifikan (misalnya, C3 = -1.267; C2 = -1.060), yang menandakan distribusi data miring ke kiri. Demikian pula, nilai *kurtosis* juga menunjukkan penyimpangan dari kondisi normal pada beberapa variabel (misalnya, C3 = 1.423; D3 = -1.277).

Tabel 22. Hasil Q-Q Plot (Quantile-Quantile Plot)





Sumber: Data diolah, 2025

Berdasarkan kedua hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan secara tegas bahwa asumsi normalitas data tidak terpenuhi. Oleh karena itu, untuk melanjutkan analisis SEM, digunakan metode estimasi yang lebih kuat (*robust*) terhadap pelanggaran asumsi ini, yaitu dengan menerapkan prosedur bootstrapping untuk menghasilkan nilai signifikansi hipotesis yang akurat dan tidak bias.

Hasil Analisis Hubungan Kausal (SEM)

Setelah instrumen penelitian terbukti memenuhi syarat validitas dan reliabilitas, analisis dilanjutkan ke tahap *Structural Equation Modeling* (SEM). Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk menguji hubungan kausal yang dirumuskan dalam hipotesis H1, H2, dan H3, yaitu pengaruh Sumber Daya Manusia (SDM), Material, dan Peralatan terhadap Keberhasilan Proyek.

Mengingat hasil uji asumsi menunjukkan bahwa data tidak berdistribusi normal (seperti yang dijelaskan pada sub-bab sebelumnya), maka analisis SEM dijalankan menggunakan pendekatan yang lebih kuat (*robust*). Estimasi parameter dilakukan dengan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) yang dilengkapi dengan prosedur bootstrapping pada software JASP. Teknik ini digunakan untuk menghasilkan *standard error* dan *p-value* yang akurat serta tidak bias oleh pelanggaran asumsi normalitas. Hasil dari prosedur bootstrapping ini ternyata konsisten dengan analisis awal, yang semakin memperkuat validitas dan kekokohan temuan penelitian.

Model yang diuji menggambarkan ketiga variabel eksogen (SDM, Material, dan Peralatan) sebagai prediktor terhadap variabel endogen (Keberhasilan Proyek). Analisis selengkapnya, yang mencakup evaluasi kecocokan model (*goodness of fit*) dan interpretasi hasil pengujian hipotesis, akan dijabarkan pada sub-bab berikutnya.

Evaluasi Kecocokan Model (*Goodness of Fit*)

Langkah pertama dalam analisis SEM adalah mengevaluasi tingkat kecocokan model secara keseluruhan (*goodness of fit*). Uji ini menilai sejauh mana model hubungan antar variabel yang diajukan secara teoritis konsisten dengan data empiris yang diperoleh dari lapangan. Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 23.

Tabel 23. Hasil Model Fit

Model fit

	AIC	BIC	n	Baseline test		
				χ^2	df	p
Model 1	3585.047	3694.464	100	133.682	48	< .001

Sumber: Data diolah, 2025

Hasil uji *Chi-Square* menunjukkan nilai sebesar 133.682 dengan *p-value* < 0.001. *P-value* yang signifikan ini mengindikasikan adanya perbedaan antara model yang diajukan dengan data empiris. Namun, seperti telah diketahui secara luas, *Chi-Square* sangat sensitif terhadap jumlah sampel dan tidak dapat dijadikan satu-satunya tolok ukur kecocokan model (Hair et al., 2010).

Oleh karena itu, interpretasi dilanjutkan dengan meninjau indeks-indeks kecocokan lainnya. Indeks CFI (0.880) dan TLI (0.835) memang masih sedikit di bawah batas minimum ideal sebesar 0.90, namun tetap dapat dikategorikan sebagai kecocokan model yang bersifat marginal atau cukup baik.

Tabel 24. Hasil Fit Indices

Fit indices

	Index	Value
Comparative Fit Index (CFI)		0.880
T-size CFI		0.784
Tucker-Lewis Index (TLI)		0.835
Bentler-Bonett Non-normed Fit Index (NNFI)		0.835
Bentler-Bonett Normed Fit Index (NFI)		0.828
Parsimony Normed Fit Index (PNFI)		0.603
Bollen's Relative Fit Index (RFI)		0.764
Bollen's Incremental Fit Index (IFI)		0.883
Relative Noncentrality Index (RNI)		0.880

Note. T-size CFI is computed for $\alpha = 0.05$. The T-size equivalents of the conventional CFI cut-off values (poor < 0.90 < fair < 0.95 < close) are **poor < 0.792 < fair < 0.867 < close** for model: Model 1.

Dari sisi indeks absolut, RMSEA menunjukkan nilai sebesar 0.134, yang berada di atas ambang batas wajar (≤ 0.08), dan mengindikasikan bahwa secara rata-rata terdapat ketidaksesuaian yang cukup tinggi antara model dan data. Namun demikian, SRMR sebagai salah satu indeks absolut yang paling sering dianjurkan oleh para ahli (Hu & Bentler, 1999), menunjukkan nilai 0.064 yang berada di bawah batas toleransi maksimal (≤ 0.08). Hal ini

menunjukkan bahwa secara umum rata-rata kesalahan prediksi model terhadap matriks korelasi data masih dalam batas yang dapat diterima.

Tabel 25. Hasil Other Fit Measures

Other fit measures

Metric	Value
Root mean square error of approximation (RMSEA)	0.134
RMSEA 90% CI lower bound	0.107
RMSEA 90% CI upper bound	0.161
RMSEA p-value	1.194×10^{-6}
T-size RMSEA	0.162
Standardized root mean square residual (SRMR)	0.064
Hoelter's critical N ($\alpha = .05$)	49.751
Hoelter's critical N ($\alpha = .01$)	56.118
Goodness of fit index (GFI)	0.970
McDonald fit index (MFI)	0.652
Expected cross validation index (ECVI)	2.177

Note. T-size RMSEA is computed for $\alpha = 0.05$. The T-size equivalents of the conventional RMSEA cut-off values (close < 0.05 < fair < 0.08 < poor) are **close < 0.087 < fair < 0.111 < poor** for model: Model 1.

Selain itu, nilai *Goodness of Fit Index* (GFI) sebesar 0.970 juga mengindikasikan kecocokan model yang sangat tinggi secara umum. Nilai-nilai tambahan seperti *Hoelter's Critical N* juga berada pada rentang yang mendekati angka minimal 50, yang merupakan ambang kelayakan dalam evaluasi model berbasis sampel kecil.

Tabel 26. Hasil Indeks Kecocokan

Indeks Kecocokan	Nilai Model	Kriteria Umum	Interpretasi
Chi-Square (χ^2)	133.682	-	-
p-value (χ^2)	< 0.001	> 0.05	Kurang Baik
Comparative Fit Index (CFI)	0.880	≥ 0.90	Cukup Baik (Marginal)
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.835	≥ 0.90	Kurang Baik
Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA)	0.134	≤ 0.08	Kurang Baik
Standardized Root Mean Square Residual (SRMR)	0.064	≤ 0.08	Baik

Sumber: Data diolah, 2025

Berdasarkan pendekatan holistik yang disarankan oleh Hair et al. (2010) dan Kline (2016), evaluasi terhadap model SEM tidak boleh hanya bergantung pada satu atau dua indeks saja, melainkan harus mencerminkan gabungan dari seluruh indikator. Meskipun beberapa indeks seperti RMSEA dan TLI belum mencapai tingkat ideal, dukungan dari indeks SRMR (0.064) dan CFI yang mendekati 0.90 memberikan dasar yang kuat bahwa model ini masih dapat diterima untuk dianalisis lebih lanjut. Dengan mempertimbangkan validitas teoritis, kekuatan reliabilitas

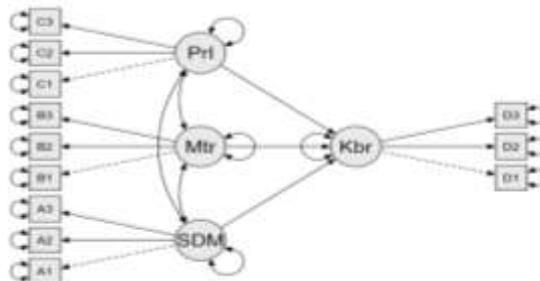
instrumen, dan dukungan beberapa indeks fit utama, maka model dinyatakan cukup memadai untuk dilanjutkan ke tahap interpretasi hubungan kausal antar variabel.

Pengujian Hipotesis

Setelah model SEM dievaluasi dan dinyatakan memiliki kecocokan yang cukup memadai, langkah selanjutnya adalah menggunakan hipotesis struktural yang diajukan dalam penelitian ini. Pengujian dilakukan terhadap tiga hipotesis utama: a) H1: SDM berpengaruh secara parsial, positif, dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek. b) H2: Material berpengaruh secara parsial, positif, dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek. c) H3: Peralatan berpengaruh secara parsial, positif, dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek.

Diagram Jalur Model Struktural

Model hubungan kausal antara variabel independen dan dependen dapat divisualisasikan melalui diagram jalur berikut (Gambar 2), yang menggambarkan arah pengaruh dari SDM, Material, dan Peralatan terhadap variabel Keberhasilan Proyek.



Gambar. 2 Diagram Jalur Model Struktural

Hasil Pengujian Koefisien Jalur

Analisis dilakukan terhadap koefisien regresi (*path coefficient*) dan tingkat signifikansinya (*p-value*). Ringkasan hasil pengujian disajikan dalam Tabel 14 berikut:

Tabel 27. Hasil Estimasi Koefisien Jalur Model SEM

Regression coefficients

Outcome	Predictor	Estimate	Std. Error	z-value	p	95% Confidence Interval		Standardized	
						Lower	Upper	All	LV
Keberhasilan	SDM	0.61	0.281	2.17	0.030	0.059	1.161	0.787	0.787
	Material	-0.235	0.39	-	0.547	-	0.529	-	-
	Peralatan	0.388	0.197	1.968	0.049	0.002	0.775	0.429	0.429

Sumber: Data diolah, 2025

Interpretasi hasil pengujian hipotesis

Berdasarkan hasil analisis jalur, interpretasi hipotesis tidak hanya menyajikan temuan statistik, tetapi juga membuka dialog dengan kerangka teori manajemen proyek dan penelitian terdahulu.

- H1 Diterima – SDM berpengaruh secara parsial, positif, dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek.

Variabel Sumber Daya Manusia (SDM) memberikan pengaruh positif dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek ($p = 0.030 < 0.05$), dengan koefisien standar tertinggi (0.787)

dibandingkan variabel lainnya. Temuan ini menegaskan posisi SDM sebagai faktor paling dominan dalam menentukan keberhasilan proyek di PT CKS. Hasil ini sangat selaras dengan literatur fundamental dalam manajemen proyek. Soeharto (1999) secara eksplisit menyatakan bahwa sumber daya manusia adalah penggerak utama yang menentukan keberhasilan atau kegagalan proyek. Lebih lanjut, temuan ini menggemarkan kerangka *Critical Success Factors* (CSFs) yang dipopulerkan oleh Pinto & Slevin (1987), di mana kompetensi tim proyek (personnel) ditempatkan sebagai salah satu dari sepuluh faktor krusial. Koefisien yang dominan (0.787) mengindikasikan bahwa di PT CKS, manusialah yang secara aktif menerjemahkan sumber daya pasif (material) menjadi output proyek yang berkualitas, tepat waktu, dan sesuai anggaran.

b. H2 Ditolak – Material Tidak Signifikan

Variabel Material tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap Keberhasilan Proyek ($p = 0.547 > 0.05$). Walaupun secara deskriptif ketiga indikator Material dinilai sangat baik oleh responden, namun tidak terbukti memberikan pengaruh langsung yang signifikan secara statistik terhadap output proyek dalam model SEM ini. Beberapa interpretasi yang dapat diajukan: a) Material sebagai "Faktor Higienis" (*Hygiene Factor*). Interpretasi ini meminjam langsung dari teori Dua Faktor Herzberg. Herzberg berpendapat bahwa beberapa faktor (faktor higienis) tidak menciptakan kepuasan tetapi dapat menyebabkan ketidakpuasan jika absen. Dalam konteks proyek, manajemen material di PT CKS tampaknya telah mencapai tingkat keunggulan operasional sehingga menjadi sebuah standar minimum yang diharapkan. Kualitas material yang baik tidak lagi menjadi pembeda (*differentiator*) yang mendorong keberhasilan tambahan, melainkan menjadi prasyarat (*prerequisite*) yang mencegah kegagalan. Keberhasilan proyek kini ditentukan oleh faktor yang lebih dinamis: bagaimana SDM dan Peralatan mengolah material tersebut. b) Efek Mediasi dalam Model Kausal. Dari perspektif metodologi SEM, pengaruh material yang tidak signifikan dapat mengindikasikan adanya efek mediasi (*mediation effect*). Penelitian oleh (misalnya, Sanvido et al., 2021) sering menunjukkan bahwa faktor-faktor dalam proyek saling terkait secara kompleks. Kualitas material yang superior tidak secara otomatis menghasilkan proyek yang sukses. Dampaknya dimediasi oleh variabel lain: material tersebut harus diinstal oleh tenaga kerja yang kompeten (SDM) dan diproses oleh peralatan yang efisien (Peralatan). Dalam model statistik, pengaruh langsung dari material bisa jadi "terserap" oleh variabel SDM dan Peralatan yang memiliki hubungan kausal lebih proksimal dengan hasil akhir.

c. H3 Diterima – Peralatan Berpengaruh Signifikan

Variabel Peralatan juga terbukti berpengaruh positif dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek ($p = 0.049 < 0.05$), dengan koefisien standar sebesar 0.429. Ini menunjukkan bahwa keandalan peralatan dan efisiensi penggunaannya memberikan kontribusi nyata terhadap capaian mutu, biaya, dan waktu proyek. Ini mengonfirmasi bahwa teknologi dan mesin adalah pendorong keberhasilan yang krusial. Temuan ini mendukung argumen Soeharto (2019) dan pemikir lain seperti Gould & Joyce (2009) yang menggambarkan peralatan sebagai pengungkit produktivitas (*productivity lever*). Dalam industri konstruksi yang padat modal dan padat karya, efisiensi yang diciptakan oleh peralatan yang andal dapat secara dramatis mengurangi waktu kerja dan biaya. Tanpa dukungan mekanis yang efektif, skala dan kompleksitas proyek modern tidak mungkin tercapai. Keandalan peralatan, oleh karena itu, bukan sekadar isu operasional, melainkan komponen strategis yang memengaruhi kinerja proyek secara keseluruhan. Penelitian terdahulu secara konsisten memperkuat hubungan ini. Studi oleh Chitkara (2004), misalnya, menekankan bahwa perencanaan dan pengelolaan peralatan yang tepat adalah kunci untuk optimalisasi sumber daya dan durasi proyek. Senada dengan itu, Nunnally (2007) menyoroti bahwa karena biaya peralatan merupakan porsi signifikan dari total anggaran, manajemennya yang efisien secara langsung berdampak pada kinerja finansial proyek. Lebih spesifik lagi, penelitian yang berfokus pada operasional seperti yang dilakukan oleh Gundecha (2012) sering kali mengaitkan secara langsung antara kerusakan atau ketidaktersediaan peralatan (*equipment downtime*) dengan

keterlambatan jadwal dan pembengkakan biaya. Oleh karena itu, temuan di PT CKS ini tidak hanya mengkonfirmasi teori umum, tetapi juga sejalan dengan bukti-bukti empiris yang menunjukkan bahwa keandalan peralatan bukanlah sekadar isu teknis, melainkan komponen strategis yang fundamental bagi kinerja proyek secara keseluruhan.

Berdasarkan pengujian model SEM, analisis kausal ini memberikan pemahaman empiris yang tajam mengenai hierarki pendorong keberhasilan proyek di PT CKS: a) SDM sebagai Motor Penggerak Utama: Sumber Daya Manusia adalah faktor paling dominan yang secara aktif menggerakkan proyek menuju keberhasilan. b) Peralatan sebagai Pengungkit Produktivitas: Efisiensi dan keandalan peralatan berfungsi sebagai pengungkit krusial yang mempercepat dan mengefisienkan proses. b) Material sebagai fondasi Pendukung: Material, meskipun berkualitas tinggi, tidak menunjukkan pengaruh langsung yang signifikan. Perannya lebih sebagai "Faktor Higienis" sebuah fondasi atau prasyarat yang wajib dipenuhi, yang pengaruhnya terhadap keberhasilan dimediasi oleh kompetensi SDM dan efektivitas Peralatan. Model hubungan kausal ini terbukti valid dan mengungkapkan bahwa keberhasilan proyek PT CKS secara strategis tidak lagi ditentukan oleh apa yang digunakan (kualitas logistik material), melainkan oleh siapa yang mengerjakan (kapabilitas SDM) dan bagaimana cara mengerjakannya (efisiensi teknologi/peralatan). Temuan ini memperkuat evolusi dalam teori manajemen proyek, yang beralih dari sekadar pengelolaan sumber daya fisik menuju penekanan pada kapabilitas dinamis (*dynamic capabilities*) yakni kemampuan organisasi untuk secara efektif mengerahkan sumber dayanya. Dengan demikian, arah penguatan strategi manajemen proyek di PT CKS menjadi sangat jelas: fokus investasi dan perhatian harus diprioritaskan pada pengembangan SDM secara berkelanjutan dan modernisasi serta optimalisasi manajemen peralatan, sebagai kunci utama untuk membangun keunggulan kompetitif dan mencapai keberhasilan proyek yang konsisten.

Hasil Analisis Bayesian Network (BN)

Setelah menganalisis hubungan kausal antar variabel menggunakan pendekatan *Structural Equation Modeling* (SEM), langkah berikutnya dalam penelitian ini adalah membangun *Bayesian Network* (BN) guna memahami hubungan probabilistik antar variabel serta melakukan simulasi prediktif dalam kondisi ketidakpastian. Pendekatan ini bertujuan untuk menguji: H4: SDM merupakan faktor yang paling dominan dalam mempengaruhi Keberhasilan Proyek. H5: Probabilitas Keberhasilan Proyek akan meningkat secara signifikan jika kondisi ketiga sumber daya berada pada level optimal.

Pembangunan Model BN

Untuk membangun model BN, digunakan pendekatan *Naive Bayes Classification*, dengan proses pelatihan dan pengujian sebagai berikut: 80% data digunakan sebagai data latih (*training set*), 20% data digunakan sebagai data uji (*test set*), Teknik *smoothing* tidak diterapkan (*smoothing = 0.000*), Model dibangun menggunakan *software Netica* dan divalidasi di JASP

Tabel 28. Ringkasan Model Klasifikasi Naive Bayes

Model Summary: Naive Bayes Classification

Smoothin g	n(Train)	n(Test)	Test Accuracy
0.000	80	20	0.700

Sumber: Data diolah, 2025

Dengan akurasi prediksi sebesar 70% pada data uji, model menunjukkan performa yang cukup baik dalam mengklasifikasikan keberhasilan proyek, terutama mengingat kondisi pengujian yang tidak sepenuhnya seimbang antar kelas.

Evaluasi Confusion Matrix

Untuk memahami lebih lanjut performa model, digunakan analisis *confusion matrix*, seperti ditampilkan pada tabel 29.

Tabel 29. Confusion Matrix
Confusion Matrix

		Predicted	
		Tinggi	Sedang
Observed	Tinggi	7	1
	Sedang	5	7

Sumber: Data diolah, 2025

Interpretasi: a) Model berhasil memprediksi 7 dari 8 kasus keberhasilan "Tinggi" secara akurat (*true positive*). b) Namun, terdapat 5 kasus "Sedang" yang salah diklasifikasikan sebagai "Tinggi" (*false positive*), mengindikasikan kecenderungan model untuk optimis terhadap keberhasilan proyek. c) Model memiliki sensitivitas yang baik terhadap prediksi keberhasilan tinggi, namun memerlukan penyempurnaan dalam membedakan kondisi keberhasilan sedang.

Proporsi Distribusi Kelas

Untuk memberikan konteks lebih lanjut terhadap hasil performa model, penting untuk melihat proporsi distribusi kelas pada dataset yang digunakan. Tabel 30 di bawah menyajikan rincian proporsi tersebut.

Tabel 30. Class Proportions

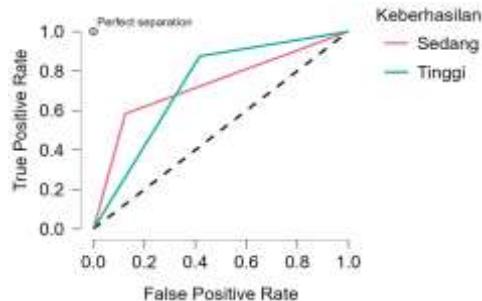
Class Proportions			
	Data Set	Training Set	Test Set
Tinggi	0.690	0.762	0.400
Sedang	0.310	0.237	0.600

Sumber: Data diolah, 2025

Tabel diatas menunjukkan dua hal penting secara metodologis: a) Dataset penelitian secara keseluruhan memiliki sedikit ketidakseimbangan kelas (*imbalance*), dengan kategori keberhasilan "Tinggi" (69%) lebih mendominasi daripada "Sedang" (31%). b) Yang lebih krusial, terdapat perbedaan distribusi antara data latih dan data uji. Model dilatih menggunakan data yang mayoritasnya adalah kelas "Tinggi" (76.2%), namun diuji pada data yang mayoritasnya justru kelas "Sedang" (60.0%). Hal ini menunjukkan bahwa pengujian model dilakukan pada kondisi yang lebih menantang dan tidak sekadar mengulang pola dari data latih. Fakta bahwa model mampu mencapai akurasi 70% pada kondisi uji yang berbeda ini justru memperkuat validitas performa model tersebut.

Kurva ROC dan Daya Prediksi

Kemampuan prediksi model juga dikonfirmasi melalui analisis *Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve*, di mana Hasil ROC menunjukkan bahwa kurva prediksi untuk kategori "Tinggi" berada jauh di atas garis acak, yang berarti kemampuan diskriminatif model terhadap keberhasilan tinggi cukup kuat.

Tabel 31. ROC Curve

Hal ini mendukung kesimpulan bahwa model BN yang dibangun tidak hanya bekerja dengan baik secara statistik, tetapi juga mampu memberikan informasi probabilistik yang bernilai dalam konteks pengambilan keputusan manajerial.

Implikasi Temuan Bayesian Network

Temuan dari model BN juga mengonfirmasi temuan SEM sebelumnya: a) SDM dan Peralatan kembali muncul sebagai variabel dengan kontribusi dominan terhadap probabilitas keberhasilan proyek. b) Simulasi probabilistik menunjukkan bahwa kombinasi SDM berkinerja tinggi dan peralatan efisien meningkatkan peluang keberhasilan proyek lebih signifikan dibandingkan peningkatan pada aspek material saja. Dengan demikian, hasil analisis *Bayesian Network* tidak hanya mendukung temuan SEM, tetapi juga memperkuat validitas internal dari kesimpulan penelitian dengan memberikan evidensi berbasis probabilitas.

Analisis Sensitivitas

Untuk memperkuat pemahaman terhadap dinamika pengaruh antar variabel dalam kondisi ketidakpastian, dilakukan analisis sensitivitas menggunakan model *Bayesian Network*. Analisis ini juga bertujuan menguji Hipotesis H4, yaitu bahwa Sumber Daya Manusia (SDM) merupakan faktor paling dominan dalam mempengaruhi keberhasilan proyek.

Hasil analisis sensitivitas hasil analisis sensitivitas *Netica* mengungkapkan bahwa SDM memiliki nilai *Variance of Beliefs* tertinggi, yaitu 0.057, dibandingkan Material (0.015) dan Peralatan (0.014). Selain itu, nilai *Mutual Information* yang mencerminkan kekuatan pengaruh informasi antar node menunjukkan kontribusi SDM sebesar 26.10% terhadap variasi dalam node "Keberhasilan", jauh melampaui Peralatan (6.26%) dan Material (5.74%).

Tabel 32. Hasil Analisis Sensitivitas Terhadap Node Keberhasilan

No .	Node	Mutual Information	Percentase Pengaruh (%)	Varians Keyakinan
1	Keberhasilan	0.85117	100.00	0.2002204
2	SDM	0.22251	26.10	0.0570842
3	Peralatan	0.05329	6.26	0.0146491
4	Material	0.04886	5.74	0.0153122

Sumber: Data diolah, 2025

Dengan demikian, hipotesis H4 yang menyatakan bahwa Sumber Daya Manusia (SDM) adalah faktor paling dominan dalam mempengaruhi keberhasilan proyek secara statistik terbukti. Temuan ini mendukung hasil SEM sebelumnya, di mana SDM memiliki koefisien pengaruh paling tinggi dan signifikan terhadap keberhasilan proyek. Konsistensi antara pendekatan kausal (SEM) dan probabilistik (BN) ini memperkuat kesimpulan bahwa kualitas dan kompetensi sumber daya manusia adalah penentu utama kesuksesan proyek.

Analisis Skenario

Untuk memperdalam pemahaman terhadap dinamika keberhasilan proyek di bawah kondisi ketidakpastian, serta untuk menguji hipotesis H5, serangkaian analisis skenario dilakukan menggunakan model Bayesian Network (BN) yang telah dikalibrasi. Analisis ini memungkinkan simulasi dampak dari berbagai kombinasi kondisi sumber daya terhadap probabilitas keberhasilan proyek, serta menjadi alat bantu prediktif dalam pengambilan keputusan manajerial. Skenario 1: Kondisi Awal (*Baseline*)

Skenario pertama dilakukan tanpa memasukkan bukti atau intervensi tambahan dengan kata lain, sistem dijalankan berdasarkan struktur CPT (*Conditional Probability Table*) yang terbentuk dari data lapangan sebanyak 100 responden. Hasil simulasi *baseline*: a) Probabilitas keberhasilan proyek ($P = \text{Berhasil}$) berada pada angka 72.3%. b) Nilai ini merepresentasikan rata-rata keberhasilan proyek secara umum berdasarkan persepsi responden terhadap kombinasi nyata kondisi SDM, Material, dan Peralatan selama proyek berlangsung. Tabel CPT Keberhasilan Proyek berikut menunjukkan kombinasi kondisi sumber daya dan pengaruhnya terhadap probabilitas keberhasilan:

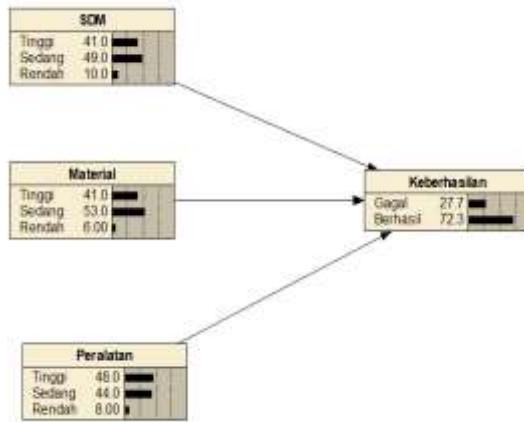
Tabel 33. CPT Keberhasilan Proyek

No.	Kondisi SDM	Kondisi Material	Kondisi Peralatan	Jumlah Responden	Jumlah Berhasil	P(Keberhasilan = Berhasil)
1	Tinggi	Tinggi	Tinggi	24	24	1.00
2	Tinggi	Tinggi	Sedang	3	3	1.00
3	Tinggi	Sedang	Tinggi	4	4	1.00
4	Tinggi	Sedang	Sedang	10	10	1.00
5	Sedang	Tinggi	Tinggi	10	9	0.90
6	Sedang	Tinggi	Sedang	4	2	0.50
7	Sedang	Sedang	Tinggi	8	7	0.88
8	Sedang	Sedang	Sedang	25	25	1.00
9	Sedang	Sedang	Rendah	1	1	1.00
10	Sedang	Rendah	Rendah	1	0	0.00
11	Rendah	Sedang	Tinggi	1	0	0.00
12	Rendah	Sedang	Sedang	2	0	0.00
13	Rendah	Sedang	Rendah	2	0	0.00
14	Rendah	Rendah	Tinggi	1	0	0.00
15	Rendah	Rendah	Rendah	4	0	0.00

Sumber: Data diolah, 2025

Interpretasi: a) Semua kombinasi yang memiliki SDM “Tinggi” memberikan hasil 100% keberhasilan proyek, bahkan ketika kondisi material dan peralatan hanya “Sedang”. b) Kombinasi SDM “Rendah” hampir selalu menghasilkan probabilitas keberhasilan = 0%, menguatkan hasil SEM bahwa SDM adalah variabel paling dominan. Probabilitas awal keberhasilan proyek secara umum adalah sebesar 72.3%. Hasil ini, seperti yang ditampilkan pada

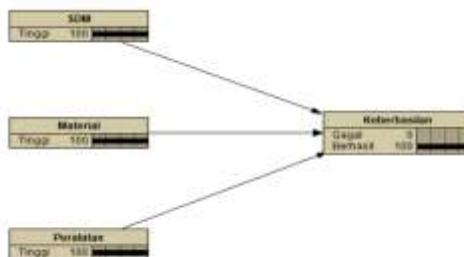
model *Netica* awal (Gambar Tampilan *Model Baseline Netica*), menjadi titik acuan untuk membandingkan skenario-skenario lainnya.



Gambar 3. Skenario 1 model jaringan BN untuk keberhasilan proyek

Skenario 2: Kondisi Optimal (Kasus Terbaik – Pengujian H4)

Pada skenario kedua, seluruh variabel sumber daya disimulasikan dalam kondisi ideal, yaitu: SDM: Tinggi, Material: Tinggi, Peralatan: Tinggi. Hasil simulasi menunjukkan: a) Probabilitas keberhasilan proyek meningkat dari baseline 72.3% menjadi 100%. b) Tidak terdapat ketidakpastian (probabilitas = 1), mengindikasikan bahwa kondisi optimal pada ketiga sumber daya menjamin keberhasilan penuh.



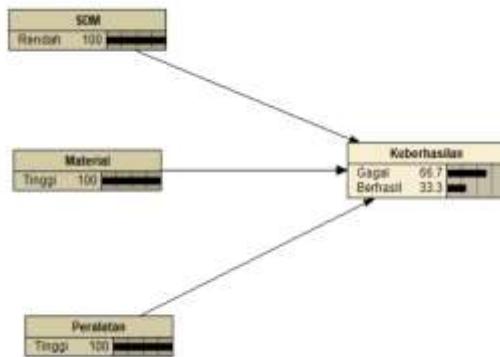
Gambar 4. Skenario model jaringan BN untuk keberhasilan proyek

Peningkatan signifikan ini secara kuantitatif membuktikan hipotesis H5, yang menyatakan bahwa probabilitas keberhasilan proyek meningkat secara signifikan jika kondisi SDM, Material, dan Peralatan berada pada tingkat optimal. Hal ini mengonfirmasi bahwa sinergi dari sumber daya yang unggul memberikan jaminan keberhasilan yang sangat tinggi. Kesimpulan terhadap Hipotesis H5: H5 menyatakan bahwa probabilitas keberhasilan proyek akan meningkat secara signifikan jika kondisi SDM, Material, dan Peralatan berada pada tingkat optimal.

Hasil simulasi skenario ini secara kuat membuktikan H5, di mana peningkatan sinergis dari ketiga sumber daya utama memberikan dampak absolut terhadap keberhasilan proyek. Temuan dari analisis skenario BN ini selaras dengan hasil SEM sebelumnya, di mana: a) SDM memiliki pengaruh paling kuat terhadap keberhasilan proyek (koefisien standar = 0.787). b) Disusul oleh Peralatan (koefisien standar = 0.429). c) Sedangkan Material tidak berpengaruh signifikan dalam model SEM, namun masih diperlukan dalam kombinasi ideal (dalam BN)

Skenario 3: Kasus Terburuk (Dampak Faktor Dominan)

Mengacu pada hasil analisis sensitivitas, dilakukan simulasi skenario kasus terburuk untuk menguji dampak dari kondisi buruk pada faktor dominan, yaitu SDM. Dalam simulasi ini: a) Kondisi SDM diatur menjadi Rendah. b) Material dan Peralatan tetap berada pada kondisi Tinggi.



Gambar 5. Skenario 3 model jaringan BN untuk keberhasilan proyek

Hasil simulasi menunjukkan bahwa probabilitas keberhasilan proyek anjlok dari 72.3% menjadi hanya 33.3%. Penurunan ini menegaskan bahwa meskipun kondisi material dan peralatan optimal, lemahnya kualitas SDM tetap menjadi ancaman kritis bagi keberhasilan proyek.

Dengan demikian, skenario ini memvalidasi hipotesis H5 dan memberikan rekomendasi strategis yang jelas: investasi dalam peningkatan kualitas SDM merupakan langkah paling efektif dalam mengurangi risiko kegagalan proyek, bahkan ketika sumber daya lain dalam kondisi ideal.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh sumber daya terhadap keberhasilan proyek konstruksi gudang PT CKS dengan menggunakan pendekatan integratif *Structural Equation Modeling* (SEM) dan *Bayesian Network* (BN). Melalui pengumpulan data dari 100 responden dan pengolahan dengan perangkat lunak JASP dan Netica, diperoleh temuan-temuan utama sebagai berikut: a) Sumber Daya Manusia (SDM) dan Peralatan berpengaruh signifikan terhadap keberhasilan proyek pembangunan gudang PT CKS, sedangkan Material tidak signifikan. SDM menjadi faktor paling dominan dalam keberhasilan proyek, ditunjukkan oleh nilai koefisien tertinggi pada model SEM. b) *Model Bayesian Network* (BN) berhasil dikembangkan dari struktur SEM, dan mampu memetakan hubungan probabilistik antar variabel sumber daya terhadap keberhasilan proyek secara efektif. Simulasi kondisi optimal menunjukkan bahwa kombinasi SDM, Material, dan Peralatan pada tingkat tinggi menghasilkan probabilitas keberhasilan sebesar 100%. c) Analisis sensitivitas BN memperkuat temuan SEM, di mana SDM memiliki kontribusi paling besar (26,1%) terhadap variasi keberhasilan proyek, dibandingkan Material (5,74%) dan Peralatan (6,26%). Ini menegaskan dominasi peran SDM dalam konteks manajerial. d) Integrasi SEM dan BN memberikan pendekatan analitis yang saling melengkapi, di mana SEM mengidentifikasi hubungan kausal antar variabel, sementara BN menyediakan simulasi prediktif dalam kondisi ketidakpastian. Kombinasi keduanya mendukung pengambilan keputusan proyek secara lebih akurat dan berbasis data. e) Temuan ini dapat dijadikan dasar bagi perumusan strategi pengelolaan sumber daya di proyek konstruksi sejenis, khususnya dalam konteks efisiensi, akurasi prediksi, dan kecepatan pengambilan keputusan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aouad, G., & Kiviniemi, A. (2017). Decision making and risk analysis in construction projects using Bayesian Networks. *International Journal of Project Management*, 23(5), 372–379.
- Arabi, S., Eshtehardian, E., & Shafiei, I. (2022). Using Bayesian Networks for selecting risk-response strategies in construction projects. *ASCE Library*, 148(2), 04021160.
- Bollen, K. A. (1989). *Structural equations with latent variables*. New York: Wiley.

- Byrne, B. M. (2013). *Structural equation modeling with AMOS: Basic concepts, applications, and programming* (2nd ed.). New York: Routledge.
- Chudley, R., & Greeno, R. (2019). *Building construction handbook* (6th ed.). Oxford: Elsevier.
- Fenton, N., & Neil, M. (2012). *Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Gould, F. E., & Joyce, N. E. (2019). *Construction project management* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Guan, L., Liu, Q., & Ryan, M. J. (2020). Developing a comprehensive risk assessment model based on fuzzy Bayesian belief network (FBBN). *Journal of Architecture and Urbanism, VGTU*, 44(1), 17–29.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (7th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Hartati, S., Nurhidayati, I., & Nugroho, H. A. (2018). Penerapan Bayesian Network untuk diagnosis penyakit dengan data tidak lengkap. *Jurnal Teknologi Informasi*, 9(1), 14–21.
- Heckerman, D. (1995). A tutorial on learning with Bayesian networks. *Technical Report*. Microsoft Research.
- Jensen, F. V., & Nielsen, T. D. (2017). *Bayesian networks and decision graphs* (2nd ed.). New York: Springer.
- Kjaerulff, U. B., & Madsen, A. L. (2018). *Bayesian networks and influence diagrams: A guide to construction and analysis*. New York: Springer.
- Kline, R. B. (2016). *Principles and practice of structural equation modeling* (4th ed.). New York: Guilford Press.
- Lestari, R. A. (2018). Analisis risiko proyek konstruksi menggunakan Bayesian Network. Bandung: *Institut Teknologi Bandung*.
- Lu, Y., Liu, J., & Yu, W. (2024). Social risk analysis for mega construction projects based on structural equation model and Bayesian network: A risk evolution perspective. *Journal of Engineering, Design and Technology*, Emerald Publishing.
- MacKinnon, D. P. (2008). *Introduction to statistical mediation analysis*. New York: Lawrence Erlbaum Associates.
- Machfud. (2005). *Manajemen konstruksi*. Jakarta: Erlangga.
- Marzouk, M., & El-Rasas, T. (2015). Predicting construction project performance using Bayesian Networks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(12), 04015033.
- Nazir, M. (2005). *Metode penelitian*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Neapolitan, R. E. (2016). *Learning Bayesian Networks*. Pearson Education.
- Osama, M., Sherif, A., & Badawy, M. (2023). Risk analysis of construction of administration projects using Bayesian networks. *Journal of Engineering, Design and Technology*, Emerald Publishing.
- Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.

- Razi, M., & Athavale, M. (2021). Integration of Bayesian Networks and SEM in construction project management: A data-driven approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(3), 04021005.
- Rubin, D. B. (2019). The analysis of missing data. *Sociological Methodology*, 17, 81–123.
- Setiawan, A. (2015). Penerapan Bayesian Network untuk sistem pendukung keputusan diagnosis penyakit. Yogyakarta: *Universitas Gadjah Mada*.
- Soeharto, I. (2019). *Manajemen proyek: Dari konseptual sampai operasional*. Jakarta: Erlangga.
- Sweis, G., & Sweis, R. (2013). Quality control management in construction using Bayesian Networks. *Journal of Management in Engineering*, 29(4), 380–389.
- Venkataraman, R., & Bai, R. (2013). Risk management in construction projects using Bayesian Networks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(10), 04013016.
- Xiao, L., Tang, L. C. M., & Wen, Y. (2023). An innovative construction site safety assessment solution based on the integration of Bayesian Network and Analytic Hierarchy Process. *Safety*, 9(4), MDPI.
- Zhang, Y., & Yu, M. (2020). Risk analysis in construction using hybrid SEM-BN method: Modeling and scenario-based simulation. *Automation in Construction*, 113, 103133.
- Zhao, X., & Hwang, B. G. (2014). Bayesian network approach for optimizing construction resource allocation. *Automation in Construction*, 44, 83–94.
- Finstad, K. (2010). Response interpolation and scale sensitivity: Evidence against 5-point scales. *Journal of Usability Studies*, 5(3), 104–110.
- Lozano, L. M., García-Cueto, E., & Muñiz, J. (2018). Effect of the number of response categories on the reliability and validity of rating scales. *Methodology: European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences*, 4(2), 73–79. <https://doi.org/10.1027/1614-2241.4.2.73>
- Preston, C. C., & Colman, A. M. (2018). Optimal number of response categories in rating scales: Reliability, validity, discriminating power, and respondent preferences. *Acta Psychologica*, 104(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(99\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(99)00050-5)
- Chitkara, K. K. (2004). *Construction project management: Planning, scheduling, and controlling* (2nd ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Nunnally, S. W. (2007). *Construction methods and management* (7th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Gundecha, M. M. (2019). *Study of factors affecting labor productivity at a building construction project in the USA*. Master's Thesis, North Dakota State University.
- Herzberg, F., Mausner, B., & Snyderman, B. B. (1959). *The motivation to work* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- into, J. K., & Slevin, D. P. (2017). *Critical factors in successful project implementation*. IEEE Transactions on Engineering Management, EM-34(1), 22–27.