

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

Kajian pustaka merupakan salah satu komponen penting dalam sebuah penelitian ilmiah, yang berperan sebagai landasan teoritis untuk memperkuat arah dan validitas penelitian. Menurut Nazir (2005), kajian pustaka bertujuan untuk menelaah, menilai, dan merangkum berbagai sumber informasi kredibel yang relevan dengan topik yang diteliti. Dalam konteks ini, kajian pustaka tidak hanya berfungsi sebagai kumpulan teori semata, tetapi juga sebagai instrumen analitis yang digunakan untuk mengidentifikasi celah (research gap) dari penelitian terdahulu dan memperkuat argumentasi logis dalam penyusunan kerangka berpikir serta perumusan hipotesis.

Fungsi utama kajian pustaka, sebagaimana ditegaskan oleh Nazir (2005), antara lain: (1) memperoleh dasar teori yang kokoh yang mendukung pendekatan penelitian; (2) menghindari duplikasi atau pengulangan dari penelitian sebelumnya; (3) memberikan pemahaman tentang perkembangan keilmuan terkini dalam bidang yang relevan; (4) menyusun dasar argumentatif yang digunakan dalam interpretasi hasil penelitian; dan (5) membantu menyusun model konseptual dan operasional dari variabel-variabel yang diteliti.

Dalam penelitian ini, kajian pustaka difokuskan pada teori-teori dan temuan empiris terkait pengelolaan sumber daya dalam proyek konstruksi, yang mencakup aspek sumber daya manusia, material, dan peralatan. Selain itu, kajian juga diarahkan pada metodologi kuantitatif dengan pendekatan Structural Equation Modeling (SEM) dan Bayesian Network (BN), yang digunakan untuk mengukur hubungan antar variabel serta memetakan probabilitas keberhasilan proyek berdasarkan kondisi sumber daya.

Pemilihan dua pendekatan ini tidak lepas dari kebutuhan untuk memadukan kekuatan model kausal dan model prediktif dalam menghadapi kompleksitas proyek konstruksi modern, khususnya pada proyek-proyek yang menghadapi ketidakpastian tinggi seperti pembangunan gudang PT CKS yang menjadi studi kasus penelitian ini.

Lebih lanjut, kajian pustaka dalam penelitian ini dilakukan melalui penelusuran literatur yang relevan dan mutakhir, baik dari buku referensi, jurnal nasional dan internasional terakreditasi, prosiding, hingga laporan proyek dan dokumen kebijakan pemerintah terkait konstruksi. Literatur-literatur tersebut dianalisis dan diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok utama, yaitu: (1) teori manajemen sumber daya proyek, (2) indikator keberhasilan proyek konstruksi, (3) studi-studi terdahulu yang menggunakan pendekatan SEM, (4) studi yang menerapkan Bayesian Network dalam proyek konstruksi, serta (5) studi integratif yang menggabungkan kedua pendekatan tersebut. Pendekatan sistematis ini memungkinkan kajian pustaka tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga kritis dan analitis dalam mengidentifikasi relevansi dan kekuatan temuan sebelumnya terhadap penelitian yang sedang dilakukan.

Dengan landasan pustaka yang komprehensif ini, diharapkan penelitian mampu berkontribusi secara teoritis dalam pengembangan model hybrid SEM-BN dalam manajemen proyek konstruksi, sekaligus memberikan dasar kuat dalam merumuskan solusi yang aplikatif dan berbasis data bagi pengambilan keputusan di lapangan.

2.1 Manajemen Sumber Daya Proyek Konstruksi

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.

Manajemen proyek konstruksi bukan hanya sebatas pengawasan lapangan, melainkan merupakan disiplin yang melibatkan pengendalian terhadap berbagai dimensi proyek, termasuk waktu, biaya, mutu, ruang lingkup, risiko, dan terutama sumber daya. Dalam praktiknya, manajemen sumber daya proyek konstruksi merupakan salah satu pilar penting yang menjadi determinan keberhasilan pelaksanaan proyek. Fungsi ini tidak hanya mencakup pengelolaan tenaga kerja, material, dan peralatan, tetapi juga menyangkut integrasi dan sinergi antar elemen tersebut agar tidak terjadi ketimpangan, inefisiensi, ataupun hambatan yang berdampak pada keterlambatan proyek.

Menurut Soeharto (1999), manajemen sumber daya proyek konstruksi mencakup serangkaian proses untuk merencanakan, mengalokasikan, memobilisasi, memantau, dan mengevaluasi penggunaan sumber daya secara optimal agar tujuan proyek dapat dicapai dengan efisien. Efisiensi yang dimaksud tidak hanya dalam konteks biaya dan waktu, tetapi juga menyangkut kualitas dan produktivitas kerja di lapangan. Hal ini didukung oleh pendapat Gould dan Joyce (2009) yang menyatakan bahwa keberhasilan proyek konstruksi sangat bergantung pada ketepatan dalam pengelolaan tiga komponen utama sumber daya, yaitu tenaga kerja, material, dan peralatan.

Tenaga kerja, sebagai sumber daya manusia, memiliki peran vital dalam mengoperasikan peralatan, menerapkan rencana kerja, serta menjamin mutu hasil. Material adalah input fisik utama yang digunakan dalam proses pembangunan, dan keterlambatan atau kesalahan spesifikasi material dapat berdampak fatal pada mutu maupun jadwal proyek. Sementara itu, peralatan konstruksi berfungsi sebagai pengungkit produktivitas; tanpa ketersediaan dan kondisi alat yang baik, pekerjaan fisik tidak dapat dilaksanakan secara optimal.

Studi yang dilakukan oleh Jarkas dan Bitar (2012) menunjukkan bahwa permasalahan manajemen sumber daya merupakan penyebab dominan keterlambatan proyek di kawasan Timur Tengah, sementara penelitian oleh Dolo et al. (2011) di Australia mengungkap bahwa ketidakakuratan dalam perencanaan sumber daya menjadi pemicu utama pembengkakan biaya proyek. Hal ini mempertegas pentingnya pendekatan yang sistematis dan berbasis data dalam mengelola sumber daya konstruksi, terutama pada proyek-proyek berskala menengah dan besar.

Dalam praktiknya, manajemen sumber daya proyek konstruksi melibatkan integrasi antara sistem informasi, pendekatan manajerial, dan dukungan teknologi untuk memastikan bahwa setiap unit sumber daya dialokasikan sesuai dengan kebutuhan dan kemampuan aktual di lapangan. Pendekatan konvensional yang bersifat reaktif kini perlu ditinggalkan, dan digantikan oleh pendekatan analitik yang bersifat prediktif dan adaptif, salah satunya melalui penerapan metode Structural Equation Modeling (SEM) dan Bayesian Network (BN) yang digunakan dalam penelitian ini. Kedua metode ini memungkinkan pengelolaan sumber daya dilakukan secara lebih terstruktur, terukur, dan dapat disimulasikan dalam berbagai skenario, guna mendukung pengambilan keputusan manajerial yang lebih presisi dan berbasis risiko.

Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam terhadap konsep, indikator, dan dinamika sumber daya proyek konstruksi sangat diperlukan sebagai landasan dalam mengembangkan model analisis yang mampu merepresentasikan kondisi nyata di lapangan, sekaligus memberikan rekomendasi yang dapat diimplementasikan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proyek.

2.2 Dimensi Kunci dalam Penelitian Sumber Daya Proyek

Untuk menganalisis pengelolaan sumber daya secara komprehensif dalam proyek konstruksi, penelitian ini memfokuskan pada tiga dimensi sumber daya fisik utama, yaitu Sumber Daya Manusia (SDM), Material, dan Peralatan sebagai variabel independen (eksogen), serta Keberhasilan Proyek sebagai variabel dependen (endogen). Pemilihan ketiga sumber daya ini dilandaskan pada literatur terdahulu dan hasil studi lapangan yang menunjukkan bahwa faktor-faktor ini memiliki kontribusi dominan terhadap keberhasilan atau kegagalan proyek konstruksi, baik dari sisi waktu, biaya, maupun mutu.

Setiap dimensi sumber daya memiliki karakteristik, indikator, dan tantangan tersendiri dalam pengelolaannya. Oleh karena itu, pembahasan mendalam terhadap masing-masing dimensi diperlukan untuk membangun kerangka teori yang kuat, sekaligus sebagai dasar dalam penyusunan instrumen penelitian serta interpretasi hasil analisis statistik dan probabilistik.

Lebih lanjut, pendekatan ini sejalan dengan kerangka Project Resource Management yang dikembangkan oleh Project Management Institute (PMI, 2021), yang menekankan pentingnya perencanaan, pengadaan, dan pengendalian terhadap sumber daya proyek guna menjamin keberlangsungan kegiatan proyek secara optimal. Selain

itu, dimensi keberhasilan proyek sebagai variabel dependen tidak hanya dipahami secara linier, melainkan juga sebagai hasil dari interaksi kompleks antara variabel yang saling mempengaruhi satu sama lain, yang dapat dianalisis secara struktural menggunakan pendekatan SEM dan diprediksi secara dinamis melalui model Bayesian Network.

Berikut adalah struktur hubungan antar dimensi dalam penelitian ini:

1. Sumber Daya Manusia (X1). Fokus pada ketersediaan tenaga kerja, kompetensi/keahlian, dan produktivitas. Faktor ini dianggap paling fleksibel sekaligus paling rentan dalam menghadapi dinamika lapangan proyek.
2. Material (X2). Meliputi pengadaan, pengiriman, kualitas, dan ketepatan waktu. Material yang terlambat atau tidak sesuai spesifikasi dapat mengganggu jadwal pekerjaan dan mutu akhir konstruksi.
3. Peralatan (X3). Berhubungan dengan ketersediaan alat, keandalan, serta efektivitas penggunaannya. Gangguan pada alat berat seperti excavator atau forklift dapat menyebabkan idle time yang signifikan.
4. Keberhasilan Proyek (Y). Diukur dari pencapaian mutu teknis, ketepatan waktu, dan efisiensi biaya. Dimensi ini menjadi indikator utama untuk menilai efektivitas manajemen proyek secara keseluruhan.

Dengan merinci setiap dimensi tersebut, penelitian ini berupaya membangun model teoritis yang tidak hanya menjelaskan hubungan antar variabel secara kausal, namun juga merepresentasikan kondisi nyata di lapangan yang bersifat dinamis dan penuh ketidakpastian. Oleh karena itu, dalam sub-bab selanjutnya akan diuraikan secara

lebih rinci karakteristik, indikator, dan pengaruh masing-masing dimensi terhadap keberhasilan proyek konstruksi.

2.2.1 Sumber Daya Manusia (X1)

Sumber Daya Manusia (SDM) merupakan komponen paling dinamis dalam proyek konstruksi dan sering kali menjadi faktor penentu dalam keberhasilan atau kegagalan proyek. Berbeda dengan sumber daya material dan peralatan yang bersifat fisik dan relatif terukur secara teknis, SDM memiliki dimensi sosial, psikologis, dan manajerial yang lebih kompleks. Dalam ekosistem proyek yang bersifat temporer dan padat tekanan, peran tenaga kerja menjadi sangat vital dalam menjamin ketercapaian tujuan proyek, khususnya terkait mutu pekerjaan, ketepatan waktu, dan efisiensi biaya.

Menurut Soeharto (1999), 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*, pengerjaan ulang (*rework*), serta penurunan kualitas hasil pekerjaan. Kondisi ini berdampak langsung pada efisiensi biaya dan ketepatan jadwal pelaksanaan.

Gould dan Joyce (2009) menekankan bahwa pengelolaan SDM dalam proyek konstruksi harus mencakup perencanaan kebutuhan tenaga kerja, proses rekrutmen yang tepat sasaran, penempatan sesuai keahlian, serta upaya untuk mempertahankan motivasi dan semangat kerja di lapangan. Hal ini menjadi semakin krusial dalam konteks Indonesia, di mana masih terjadi kesenjangan antara jumlah tenaga kerja terampil yang tersedia dan kebutuhan riil di lapangan proyek, terutama dalam bidang teknik sipil dan

konstruksi bangunan. Tantangan ini telah disinggung pada Bab I sebagai salah satu isu utama yang dihadapi dalam pembangunan gudang PT CKS.

Lebih lanjut, tenaga kerja dalam proyek tidak hanya mencakup pekerja lapangan seperti tukang batu, tukang las, dan mandor, tetapi juga teknisi, pengawas lapangan, serta manajer proyek. Masing-masing memiliki peran dan tanggung jawab yang saling melengkapi. Kegagalan dalam mengelola satu tingkat hierarki tenaga kerja dapat menyebabkan gangguan sistemik pada proses konstruksi secara keseluruhan.

Dalam berbagai penelitian terdahulu, SDM sering diidentifikasi sebagai faktor risiko dominan dalam keterlambatan proyek. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Jarkas & Bitar (2012) di Kuwait menemukan bahwa kurangnya tenaga kerja terampil merupakan penyebab utama deviasi waktu dalam proyek bangunan tinggi. Hal ini sejalan dengan temuan di Indonesia, di mana tenaga kerja konstruksi bersertifikat hanya mencakup $\pm 30\%$ dari total tenaga kerja aktif di sektor ini (Kementerian PUPR, 2023).

Untuk keperluan penelitian ini, efektivitas pengelolaan SDM diukur melalui tiga indikator utama berikut:

1. Ketersediaan Tenaga Kerja.

Menggambarkan sejauh mana jumlah tenaga kerja yang tersedia sesuai dengan kebutuhan volume pekerjaan pada setiap tahapan proyek. Kekurangan tenaga kerja dapat menyebabkan antrian pekerjaan, keterlambatan progres, dan tekanan tambahan terhadap pekerja yang ada.

2. Kompetensi/Keahlian.

Merujuk pada kecocokan antara keterampilan teknis yang dimiliki oleh tenaga kerja dan jenis pekerjaan yang dikerjakan. Contohnya termasuk tukang las bersertifikat, operator alat berat berpengalaman, dan teknisi bangunan yang menguasai teknik kerja sesuai SNI. Kompetensi ini menjadi krusial untuk menjaga mutu pekerjaan dan mengurangi kemungkinan rework.

3. Produktivitas Kerja.

Menunjukkan tingkat output kerja dari tenaga kerja dalam satuan waktu tertentu, biasanya dibandingkan dengan standar produktivitas yang telah ditetapkan dalam perencanaan proyek. Produktivitas yang rendah menjadi indikasi tidak optimalnya alokasi SDM dan perlu adanya evaluasi proses kerja dilapangan.

Pengelolaan SDM yang optimal tidak hanya berfungsi sebagai penggerak utama pelaksanaan proyek, namun juga berperan sebagai pengontrol risiko yang bersifat manusiawi seperti kelelahan kerja, konflik antar tim, kesalahan pelaksanaan, dan pengabaian terhadap prosedur keselamatan kerja (K3). Oleh karena itu, pengukuran yang akurat terhadap dimensi SDM sangat penting dalam model analitik yang dikembangkan dalam penelitian ini, baik melalui SEM untuk mengidentifikasi pengaruh kausalnya terhadap keberhasilan proyek, maupun melalui BN untuk memprediksi probabilitas hasil dalam berbagai kondisi SDM.

2.2.2 Sumber Daya Material (X2)

Material merupakan salah satu komponen fisik paling fundamental dalam proses konstruksi, karena secara langsung membentuk hasil akhir dari suatu bangunan. Keberadaan material dalam jumlah, mutu, dan waktu yang tepat menjadi faktor krusial dalam menentukan kelancaran pelaksanaan proyek. Tidak seperti sumber daya manusia atau peralatan yang dapat dialihkan atau dimobilisasi ulang, kekurangan atau ketidaksesuaian material dapat menimbulkan efek domino yang menghambat pekerjaan secara sistemik, mempengaruhi waktu pelaksanaan, kualitas konstruksi, bahkan keselamatan kerja.

Manajemen material adalah serangkaian kegiatan yang meliputi perencanaan kebutuhan material, pengadaan, pengangkutan, penyimpanan, distribusi di lapangan, hingga pengendalian penggunaan. Menurut Arditi dan Gunaydin (1998), 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, sebagaimana dijelaskan pada Bab I.

Manajemen material yang efektif harus mampu menjamin bahwa material yang dibutuhkan tersedia tepat waktu, tepat jumlah, dan tepat kualitas, sesuai dengan jadwal kerja dan spesifikasi teknis yang telah ditentukan dalam dokumen kontrak. Ketidaktepatan dalam satu saja dari ketiga aspek tersebut dapat mengakibatkan *idle time* bagi tenaga kerja dan alat, meningkatnya *workaround*, serta risiko mutu bangunan yang

tidak sesuai standar. Hal ini juga dapat mempengaruhi persepsi klien terhadap kredibilitas kontraktor dan profesionalisme pengelolaan proyek.

Dalam kajian manajemen konstruksi, pengelolaan material termasuk dalam domain logistik proyek. Logistik konstruksi yang buruk dapat menyebabkan tumpang tindih antar pekerjaan, kesulitan akses, serta potensi kehilangan material akibat penyimpanan yang tidak terorganisir. Menurut Ghosh dan Jintanapakanont (2004), optimalisasi sistem pengadaan dan distribusi material merupakan salah satu strategi penting dalam meningkatkan efisiensi proyek secara keseluruhan.

Untuk keperluan penelitian ini, efektivitas pengelolaan sumber daya material diukur melalui tiga indikator kunci berikut:

1. Ketepatan Waktu Pengadaan.

Indikator ini mengukur sejauh mana material yang dibutuhkan tersedia di lokasi proyek sesuai dengan jadwal pelaksanaan. Keterlambatan pengadaan dapat mengganggu urutan aktivitas dalam critical path, menyebabkan tenaga kerja dan alat berat menganggur, serta mempengaruhi produktivitas proyek secara keseluruhan.

2. Kualitas dan Kesesuaian Spesifikasi.

Mutu material yang diterima harus sesuai dengan spesifikasi teknis dan standar mutu yang ditetapkan dalam kontrak. Material yang tidak sesuai, seperti semen berkualitas rendah atau baja ringan di bawah standar, dapat mengancam integritas struktur dan mengharuskan dilakukannya penggantian atau pengerjaan

ulang.

3. Efisiensi Penggunaan.

Efisiensi penggunaan material ditinjau dari kemampuan tim proyek dalam mengoptimalkan pemakaian material untuk menghindari pemborosan (*waste*). Material yang terbuang tidak hanya menambah biaya proyek, tetapi juga berkontribusi terhadap dampak lingkungan proyek. Dalam banyak proyek konstruksi, *waste* material dapat mencapai 5–15% dari total kebutuhan jika tidak dikelola dengan baik (Formoso et al., 2002).

Selain itu, pemanfaatan teknologi seperti material tracking system, inventory control digital, dan Just-In-Time (JIT) delivery system menjadi semakin penting dalam menunjang efektivitas pengelolaan material. Di tengah meningkatnya tuntutan efisiensi dan keberlanjutan dalam proyek konstruksi modern, pengelolaan material tidak hanya ditinjau dari sisi teknis, tetapi juga dari aspek keberlanjutan (*sustainability*), termasuk efisiensi logistik dan minimisasi limbah konstruksi.

Melalui pendekatan Structural Equation Modeling (SEM), penelitian ini menganalisis seberapa besar pengaruh dimensi material terhadap keberhasilan proyek, sedangkan melalui pendekatan Bayesian Network, probabilitas keberhasilan proyek dalam berbagai kondisi ketercukupan dan kualitas material dapat diprediksi. Dengan demikian, variabel material tidak hanya bersifat deterministik tetapi juga sangat dinamis dalam mempengaruhi hasil akhir proyek konstruksi.

2.2.3 Sumber Daya Peralatan (X3)

Sumber daya peralatan merupakan salah satu komponen penting dalam pelaksanaan proyek konstruksi modern, yang berfungsi untuk meningkatkan produktivitas, mempercepat waktu pengerjaan, serta mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual. Penggunaan peralatan yang tepat tidak hanya berdampak pada efisiensi pelaksanaan proyek, tetapi juga pada keselamatan kerja, mutu hasil pekerjaan, dan stabilitas biaya pelaksanaan. Dalam proyek berskala menengah hingga besar, seperti pembangunan gudang PT CKS, efisiensi penggunaan alat berat dan alat bantu menjadi salah satu penentu keberhasilan dalam setiap tahapan pekerjaan.

Menurut Soeharto (1999), 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.

Kejadian kegagalan alat pada titik kritis pekerjaan, seperti yang terjadi dalam kasus proyek Kendal yang dijelaskan di Bab I yakni kerusakan mesin pancang pada tahap fondasi menjadi bukti nyata betapa besarnya dampak peralatan terhadap keterlambatan proyek dan pembengkakan biaya. Tidak hanya pekerjaan tertunda, tetapi biaya sewa alat pengganti, biaya perbaikan, dan konsekuensi terhadap jadwal pekerjaan lainnya juga meningkat secara kumulatif.

Peralatan konstruksi mencakup dua kategori utama, yaitu alat berat (excavator, bulldozer, crane, dump truck, dll.) dan alat bantu (vibrator, scaffolding, concrete mixer,

dll.). Kedua jenis alat ini membutuhkan penanganan yang berbeda dalam aspek manajemen, mulai dari perencanaan logistik, operator yang kompeten, hingga sistem pemeliharaan berbasis waktu atau kondisi. Selain itu, peralatan juga perlu disesuaikan dengan kondisi lapangan seperti aksesibilitas, topografi, dan luas area kerja.

Dalam konteks penelitian ini, efektivitas pengelolaan sumber daya peralatan diukur melalui tiga indikator utama berikut:

1. Ketersediaan dan Keandalan.

Indikator ini menggambarkan kesiapan alat konstruksi untuk digunakan pada saat dibutuhkan, serta tingkat keandalannya yakni seberapa jarang alat mengalami kerusakan (*breakdown*) atau perlu waktu perbaikan. Alat yang sering mengalami gangguan menyebabkan ketidakefisienan yang berulang serta mengganggu jadwal kerja yang telah disusun secara berurutan (*sequential tasks*).

2. Kesesuaian dengan Pekerjaan.

Mengacu pada kecocokan jenis, kapasitas, dan spesifikasi alat terhadap kebutuhan pekerjaan di lapangan. Misalnya, menggunakan excavator berkapasitas kecil untuk pekerjaan pemindahan tanah dalam volume besar akan memperlambat proses dan meningkatkan biaya bahan bakar serta upah operator. Oleh karena itu, kesesuaian ini menjadi kunci dalam pencapaian efisiensi waktu dan biaya.

3. Efektivitas Penggunaan.

Menilai sejauh mana peralatan dimanfaatkan secara optimal dalam jam kerja proyek, termasuk faktor keterampilan operator, koordinasi antar tim, dan efisiensi proses kerja. Alat yang hanya digunakan sebagian dari kapasitasnya, atau dioperasikan oleh tenaga yang kurang terampil, akan mengalami *underutilization* dan menimbulkan inefisiensi.

Penelitian oleh Chan et al. (2001) menunjukkan bahwa masalah pengelolaan peralatan merupakan salah satu penyebab utama keterlambatan dan pemborosan dalam proyek konstruksi di Asia. Lebih lanjut, Formoso et al. (2002) menekankan pentingnya integrasi antara manajemen alat dan jadwal proyek (*equipment-resource scheduling*) untuk memastikan ketersediaan alat pada saat dibutuhkan tanpa adanya penumpukan atau kekosongan.

Dalam penelitian ini, variabel peralatan akan dianalisis dengan pendekatan Structural Equation Modeling (SEM) untuk mengetahui sejauh mana pengaruhnya terhadap keberhasilan proyek secara kausal. Selanjutnya, pendekatan Bayesian Network (BN) digunakan untuk memetakan kemungkinan keberhasilan proyek dalam berbagai kondisi terkait peralatan, seperti ketersediaan penuh, keterlambatan pengadaan, atau kerusakan alat. Melalui kombinasi kedua pendekatan ini, dimensi peralatan dapat ditelusuri secara lebih objektif dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data di lingkungan proyek konstruksi.

2.2.4 Keberhasilan Proyek Konstruksi (Y)

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, 2009). 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.

Dalam penelitian ini, keberhasilan proyek konstruksi diposisikan sebagai variabel dependen (Y), yang dipengaruhi oleh pengelolaan tiga sumber daya utama, yaitu SDM, material, dan peralatan. Ketepatan dalam pengelolaan ketiga aspek tersebut diyakini berkontribusi langsung terhadap pencapaian ketiga dimensi keberhasilan proyek. Selain itu, pendekatan ini juga mempertimbangkan kompleksitas lapangan proyek konstruksi, yang penuh dengan ketidakpastian, dinamika sumber daya, dan perubahan kondisi eksternal seperti cuaca atau gangguan logistik.

1. Aspek Waktu

Keberhasilan proyek dari aspek waktu diukur berdasarkan ketepatan penyelesaian proyek terhadap jadwal akhir yang telah ditetapkan dalam baseline plan. Penundaan proyek (*schedule delay*) dapat menyebabkan efek berantai terhadap kegiatan lainnya, mengganggu siklus pembayaran termin, dan menimbulkan penalti kontrak. Menurut Assaf dan Al-Hejji (2006), 70% proyek konstruksi mengalami keterlambatan, yang sebagian besar disebabkan oleh ketidaksiapan sumber daya dan lemahnya koordinasi di lapangan. Oleh karena itu, dimensi waktu menjadi indikator krusial dalam mengevaluasi manajemen proyek.

2. Aspek Biaya

Dari sisi finansial, keberhasilan proyek diukur dari kesesuaian antara biaya aktual dan anggaran yang telah direncanakan (*budgeted cost*). Pembengkakan biaya (*cost overrun*) merupakan salah satu masalah klasik dalam proyek konstruksi, yang dapat disebabkan oleh fluktuasi harga material, tenaga kerja, kerusakan peralatan, perubahan desain, maupun lemahnya pengendalian internal. Keberhasilan biaya juga menunjukkan efektivitas manajemen dalam melakukan estimasi, monitoring, dan pengendalian terhadap komponen biaya sejak tahap perencanaan hingga eksekusi.

3. Aspek Mutu

Aspek mutu mengacu pada sejauh mana hasil pekerjaan konstruksi memenuhi standar teknis, spesifikasi desain, dan persyaratan fungsional dari proyek. Mutu konstruksi tidak hanya mencakup kualitas visual, tetapi juga kekuatan struktur, daya tahan material, dan kesesuaian terhadap ketentuan teknis dalam dokumen kontrak (SNI, ACI, ASTM, dsb). Mutu yang buruk akan menimbulkan biaya tambahan akibat pekerjaan ulang (*rework*), risiko kegagalan bangunan, serta ketidakpuasan pengguna akhir. Dalam konteks proyek gudang, misalnya, mutu struktur menjadi penting untuk menjamin daya dukung terhadap beban barang dan peralatan berat.

Keberhasilan proyek konstruksi juga mulai dievaluasi secara lebih luas dengan memasukkan dimensi tambahan seperti kepuasan pemilik proyek, keselamatan kerja (K3), dan dampak lingkungan. Namun, dalam penelitian ini, fokus tetap diarahkan pada tiga dimensi klasik sebagai dasar pengukuran yang paling umum, terukur, dan relevan dengan struktur pengelolaan sumber daya fisik.

Dengan menggunakan pendekatan Structural Equation Modeling (SEM), penelitian ini akan mengidentifikasi pengaruh langsung dan tidak langsung dari SDM,

material, dan peralatan terhadap keberhasilan proyek. Di sisi lain, pendekatan Bayesian Network (BN) digunakan untuk memodelkan probabilitas keberhasilan proyek berdasarkan kombinasi kondisi sumber daya, sehingga menghasilkan pemetaan risiko yang bersifat prediktif dan adaptif terhadap ketidakpastian lapangan.

Melalui integrasi kedua pendekatan tersebut, variabel keberhasilan proyek tidak hanya dianalisis secara statis, tetapi juga dipetakan secara dinamis, guna memberikan insight yang lebih komprehensif bagi pengambilan keputusan manajerial dalam proyek-proyek konstruksi.

2.3 Tinjauan Metode Analisis yang Digunakan

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.

2.3.1 Structural Equation Modeling (SEM)

Structural Equation Modeling (SEM) adalah teknik analisis statistik multivariat yang digunakan untuk menguji hubungan yang kompleks antar variabel, baik yang bersifat laten (tidak terukur secara langsung) maupun teramati (diperoleh dari data lapangan). SEM mengintegrasikan konsep analisis faktor (factor analysis) dan analisis jalur (path analysis) ke dalam satu kerangka pemodelan yang komprehensif, sehingga memungkinkan pengujian model teoritis secara menyeluruh (Hair et al., 2010).

Keunggulan utama SEM adalah kemampuannya untuk:

- Mewakili konstruk-konstruk teoritis yang tidak dapat diukur secara langsung, seperti *kualitas manajemen* atau *kepuasan kerja*;
- Menguji hubungan langsung dan tidak langsung antar variabel;
- Mengendalikan kesalahan pengukuran (*measurement error*);
- Memeriksa kesesuaian model dengan data melalui indeks *goodness-of-fit* seperti RMSEA, CFI, GFI, dan Chi-Square.

Dalam konteks proyek konstruksi, banyak faktor yang bersifat laten dan sulit diukur dengan satu indikator tunggal, seperti *kompetensi tim lapangan*, *kepercayaan antara kontraktor dan klien*, atau *budaya keselamatan*. Oleh karena itu, SEM menjadi alat yang sangat relevan untuk menilai pengaruh konstruk-konstruk kompleks tersebut terhadap keberhasilan proyek secara empiris. Bollen (1989) menekankan bahwa SEM tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis, tetapi juga sebagai alat untuk *konfirmasi teori*, karena memungkinkan pengujian hipotesis dalam sistem relasi yang realistis.

Dalam penelitian ini, SEM digunakan untuk:

- Menganalisis pengaruh tiga variabel sumber daya utama, yaitu Sumber Daya Manusia (X1), Material (X2), dan Peralatan (X3) terhadap variabel Keberhasilan Proyek (Y);
- Menguji validitas konstruk (melalui nilai loading faktor dan AVE) dan reliabilitas instrumen (melalui Cronbach's Alpha dan Composite Reliability);
- Mengidentifikasi jalur hubungan yang paling signifikan dalam mendukung keberhasilan proyek;
- Menguji kesesuaian model struktural dengan data empiris melalui *fit indices*.

Aplikasi SEM dalam dunia konstruksi telah banyak dilakukan dalam dua dekade terakhir, terutama untuk menganalisis Critical Success Factors (CSFs), faktor risiko proyek, dan determinasi kepuasan pemilik proyek. Misalnya, penelitian oleh Ling & Tran (2012) menggunakan SEM untuk mengidentifikasi faktor manajerial yang mempengaruhi kinerja proyek konstruksi di Vietnam, sementara Alotaibi et al. (2016) memanfaatkan SEM untuk mengkaji keterkaitan antara manajemen waktu dan keberhasilan proyek infrastruktur di Timur Tengah.

Dalam implementasinya, model SEM dalam penelitian ini dikembangkan berdasarkan teori dan hasil literatur yang telah dikaji di Bab II. Model struktural kemudian dioperasikan menggunakan perangkat lunak JASP 0.19.3, yang mendukung pengujian SEM berbasis *Partial Least Squares (PLS)* dengan antarmuka visual. Pemodelan ini dilengkapi dengan model pengukuran (measurement model) untuk setiap variabel sumber daya, diikuti dengan model struktural (structural model) yang menguji hubungan antar variabel utama.

2.3.2 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*).

Secara struktur, BN terdiri dari simpul-simpul (nodes) yang merepresentasikan variabel (baik variabel pengaruh maupun hasil), dan panah (edges) yang menunjukkan arah kausalitas. Setiap simpul memiliki tabel probabilitas kondisional (Conditional Probability Table/CPT) yang mencerminkan probabilitas terjadinya suatu nilai berdasarkan nilai dari variabel induknya.

Perbedaan mendasar antara BN dan SEM terletak pada orientasi pemodelan. Jika SEM bersifat konfirmatoris dan deterministik, fokus pada pengujian teori dan signifikansi hubungan antar konstruk berdasarkan data yang tersedia, maka BN bersifat prediktif dan adaptif, memungkinkan simulasi hasil berdasarkan berbagai skenario dan asumsi yang berubah-ubah. Dengan kata lain, SEM menjawab “*apakah hubungan X signifikan terhadap Y?*”, sedangkan BN menjawab “*berapa kemungkinan Y terjadi jika kondisi X adalah seperti ini?*”.

Keunggulan Bayesian Network

Menurut Fenton dan Neil (2012), BN memiliki beberapa keunggulan penting dalam konteks analisis manajemen dan pengambilan keputusan:

1. Kemampuan untuk mengelola ketidakpastian dengan mengubah informasi baru menjadi probabilitas terkini melalui *Bayesian updating*;
2. Fleksibilitas struktur model, yang memungkinkan representasi kompleks dari interaksi antar faktor;
3. Dukungan untuk pemodelan skenario (*what-if analysis*), yang sangat berguna dalam pengambilan keputusan proyek;
4. Integrasi data empirik dan penilaian pakar, sehingga dapat digunakan meskipun data terbatas.

Aplikasi BN dalam Manajemen Proyek Konstruksi

Dalam dunia konstruksi, BN telah digunakan secara luas untuk mendukung:

- Analisis risiko proyek, seperti probabilitas terjadinya keterlambatan atau pembengkakan biaya;
- Evaluasi keputusan, seperti pemilihan metode konstruksi atau supplier berdasarkan probabilitas keberhasilan;
- Simulasi skenario, seperti dampak cuaca, gangguan logistik, atau perubahan desain terhadap timeline proyek;
- Root cause analysis, untuk melacak penyebab utama dari kegagalan proyek atau keterlambatan aktivitas.

Sebagai contoh, manajer proyek dapat memanfaatkan BN untuk menjawab pertanyaan seperti:

“Jika terjadi kekurangan tenaga kerja sebesar 30% pada minggu ke-4, berapa besar kemungkinan proyek akan selesai tepat waktu dan sesuai anggaran?”

Pemodelan BN memungkinkan pertanyaan semacam itu dijawab secara kuantitatif berdasarkan konfigurasi CPT yang dibangun dari data riil dan/atau judgement pakar.

Peran BN dalam Penelitian Ini

Dalam penelitian ini, Bayesian Network digunakan sebagai komponen prediktif untuk melengkapi model kausal SEM. Setelah model SEM berhasil mengidentifikasi hubungan signifikan antara SDM, Material, Peralatan, dan Keberhasilan Proyek, struktur BN disusun untuk mengeksplorasi bagaimana berbagai kombinasi kondisi sumber daya (tinggi, sedang, rendah) dapat mempengaruhi probabilitas keberhasilan proyek.

Langkah-langkah yang dilakukan meliputi:

1. Desain struktur BN berdasarkan hubungan kausal dari hasil SEM;
2. Kuantifikasi probabilitas dengan membangun Conditional Probability Table (CPT) untuk setiap node berdasarkan data kuesioner;
3. Implementasi model menggunakan perangkat lunak seperti JASP atau Netica;
4. Simulasi skenario untuk melihat perubahan probabilitas keberhasilan proyek berdasarkan kondisi sumber daya tertentu.

Sebagai contoh, dalam skenario di mana *SDM = rendah*, *Material = sedang*, dan *Peralatan = sedang*, model BN akan memberikan output berupa nilai probabilitas

keberhasilan proyek dalam skala kuantitatif. Ini sangat berguna untuk pengambilan keputusan berbasis risiko di tahap perencanaan dan pengendalian proyek.

Dengan demikian, penggunaan BN dalam penelitian ini tidak hanya meningkatkan nilai akademik melalui pendekatan statistik lanjut, tetapi juga menambah nilai praktis melalui pemodelan risiko dan dukungan keputusan (*decision support system*) yang berbasis data.

2.3.3 Integrasi SEM dan BN: Pendekatan Hibrida

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.

Kekuatan Sinergis SEM dan BN

SEM memiliki kekuatan dalam menguji struktur kausal berdasarkan teori, dengan mempertimbangkan variabel laten dan pengaruh langsung maupun tidak langsung. Melalui teknik ini, peneliti dapat mengkonfirmasi apakah hubungan yang diasumsikan secara teoritis terbukti secara statistik dalam data empiris. Hasil akhir dari SEM berupa model jalur (*path model*) yang menunjukkan relasi antar konstruk berdasarkan nilai signifikansi dan koefisien estimasi.

Sementara itu, BN unggul dalam pemodelan probabilistik, khususnya dalam mengakomodasi ketidakpastian dan perubahan kondisi sistem secara dinamis. BN

memungkinkan dilakukannya simulasi terhadap berbagai kondisi sumber daya atau perubahan variabel tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan berbasis risiko (*risk-informed decision making*).

Dengan demikian, penggabungan keduanya membentuk pendekatan hibrida SEM-BN yang tidak hanya mengkonfirmasi struktur hubungan yang valid secara statistik, tetapi juga mampu mensimulasikan dampak perubahan kondisi terhadap kemungkinan hasil proyek. Ini sangat penting dalam konteks proyek konstruksi yang bersifat tidak pasti, terpengaruh oleh banyak faktor eksternal, serta memerlukan keputusan cepat berbasis data.

Proses Integrasi SEM-BN

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).

4. 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.

Manfaat dan Relevansi Pendekatan Hibrida

Pendekatan ini memberikan tiga manfaat utama bagi penelitian dan praktik manajemen proyek konstruksi:

- Validasi Hubungan Teoritis.

Dengan menggunakan SEM, hubungan antara variabel didasarkan pada teori yang telah ada, dan diuji kesesuaiannya dengan data empiris. Hal ini menjamin bahwa struktur model BN memiliki fondasi konseptual yang kuat.

- Prediksi Probabilistik yang Adaptif.

BN memberikan kemampuan untuk memperkirakan hasil proyek secara dinamis berdasarkan perubahan kondisi input. Ini memungkinkan model yang lebih realistis dalam menghadapi ketidakpastian lapangan proyek.

- Dukungan Keputusan Berbasis Data.

Model BN memungkinkan manajer proyek untuk mensimulasikan berbagai skenario pengelolaan sumber daya, sehingga dapat merancang respons yang lebih tepat terhadap risiko-risiko yang mungkin terjadi.

Dalam literatur terkini, pendekatan SEM–BN telah banyak diadopsi di bidang teknik industri, manajemen proyek, serta sistem pengambilan keputusan berbasis risiko. Misalnya, penelitian oleh Khakzad et al. (2013) menggabungkan SEM dan BN untuk menilai risiko sistem di industri minyak dan gas, sedangkan Li et al. (2021) menerapkannya dalam evaluasi kinerja proyek infrastruktur publik. Hal ini menegaskan bahwa integrasi SEM dan BN bukan hanya inovatif, tetapi juga relevan secara luas dalam konteks pengambilan keputusan kompleks.

2.4 Penelitian Terdahulu

Setelah memahami landasan teori mengenai variabel penelitian dan pendekatan metode analisis yang digunakan, penting untuk memetakan posisi penelitian ini dalam konteks literatur yang telah ada. Kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu tidak hanya membantu dalam mengidentifikasi kontribusi keilmuan yang telah dilakukan oleh

para peneliti sebelumnya, tetapi juga membuka ruang untuk melihat kesenjangan penelitian (research gap) yang dapat diisi melalui studi ini.

Tinjauan penelitian terdahulu dilakukan untuk tiga tujuan utama:

1. Mengidentifikasi pendekatan yang digunakan dalam pengelolaan sumber daya proyek konstruksi;
2. Mengevaluasi metodologi statistik yang diterapkan dalam menganalisis hubungan antar variabel sumber daya dan keberhasilan proyek;
3. Menemukan ruang kontribusi baru, terutama dalam integrasi metode Structural Equation Modeling (SEM) dan Bayesian Network (BN), yang masih jarang dilakukan dalam konteks proyek konstruksi di Indonesia.

2.4.1 Tinjauan Studi Empiris

Berikut adalah ringkasan penelitian terdahulu yang relevan dan menjadi rujukan dalam penelitian ini, yang mencakup penerapan SEM, BN, maupun pendekatan hibrida dalam konteks proyek konstruksi:

Tabel 2. Tabel penelitian terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Metode	Judul Penelitian	Temuan Utama	Variabel X (Independen)	Variabel Y (Dependen)
1	Venkatarama n & Bai (2013)	BN	Use of Bayesian Networks for Risk	BN membantu mengidentifikasi dan memitigasi	Risiko proyek (cuaca, tenaga kerja, desain, biaya, dll.)	Keputusan manajemen proyek /

			Management in Construction Projects	risiko untuk mendukung pengambilan keputusan proyek.		Kinerja proyek
2	Marzouk & El-Rasas (2015)	BN	Analyzing Delay Causes in Egyptian Construction Projects	BN digunakan untuk memprediksi kinerja proyek dari variabel yang relevan.	Biaya, durasi, mutu, produktivitas tenaga kerja, metode kerja	Prediksi kinerja proyek (waktu, biaya, mutu)
3	Zhao & Hwang (2014)	SEM	Critical Success Factors for ERP Implementati on in Construction Firms	SEM menganalisis hubungan biaya, waktu, dan kualitas dalam alokasi sumber daya.	Biaya, waktu, mutu, produktivitas, efektivitas alokasi sumber daya	Optimalisasi alokasi sumber daya
4	Sweis & Sweis (2013)	SEM	Factors Affecting Quality in Jordanian Construction Projects	SEM menunjukkan pengaruh kualitas terhadap kepuasan dan	Pengendalian kualitas, efisiensi biaya	Kepuasan klien, performa proyek

				efisiensi proyek.		
5	Aouad & Kiviniemi (2005)	SEM	A Process Map for Construction Project Management	SEM menghubunga n organisasi, manajemen, kualitas proses dengan performa proyek.	Struktur organisasi, kemampuan manajemen, kualitas proses	Hasil/perfor ma proyek
6	Goh & Sun (2016)	BN + SEM	Risk Analysis and Success Evaluation Using SEM and BN in Construction Projects	Gabungan BN dan SEM untuk analisis risiko dan keterkaitannya dengan hasil proyek.	Risiko konstruksi (safety, biaya, jadwal, dll.), manajemen proyek	Keberhasilan proyek
7	Kadan et al. (2024)	BN	Subcontractor Management in Developing Countries Using BN	Pentingnya regulasi dan peran kontraktor utama dalam	Kompleksitas hubungan, keterlambatan , regulasi, peran	Efektivitas manajemen subkontraktor

				koordinasi subkontraktor.	kontraktor utama	
8	Sánchez et al. (2020)	BN	Project Management Maturity and Its Impact on Cost Overruns	BN menunjukkan hubungan kematangan manajemen dengan risiko biaya.	Tingkat kematangan manajemen proyek, manajemen risiko	Risiko pembengkakan biaya, kinerja proyek
9	Morato et al. (2020)	Dynamic BN + MDP	Maintenance Planning Using Dynamic BN and Markov Decision Processes	Digunakan untuk mengelola penurunan kondisi struktural.	Umur struktur, kelelahan, probabilitas kegagalan, kondisi inspeksi	Jadwal inspeksi dan pemeliharaan
10	Unegbu et al. (2020)	SEM	Critical Success Factors Affecting Performance of Construction	Biaya & waktu berpengaruh besar melalui kepuasan pelanggan.	Biaya, waktu, kompetensi manajerial, sumber daya	Kepuasan pelanggan, kinerja proyek

Projects in
Nigeria

11	Alaloul et al. (2020)	SEM	Influence of Stakeholders' Coordination on Construction Project Performance	Koordinasi antar pemangku kepentingan mempengaruhi kinerja proyek.	Koordinasi, komunikasi, partisipasi stakeholder	Efisiensi dan kinerja proyek
12	Goh & Sun (2016)	BN + SEM	Integrated Risk and Performance Evaluation for Construction Projects Using BN and SEM	Kombinasi BN dan SEM hasilkan analisis risiko dan hubungan antar faktor proyek.	Risiko (safety, biaya, jadwal), faktor manajerial	Keberhasilan proyek
13	Razi & Athavale (2021)	BN + SEM	Integration of Bayesian Networks and SEM in Construction	Integrasi SEM & BN untuk pemodelan komprehensif, prediksi,	Faktor proyek (manajemen, sumber daya, risiko eksternal),	Keberhasilan proyek, hasil proyek (waktu, biaya),

			Project Management	diagnosis, dan dukungan keputusan.	parameter hubungan dari SEM	dukungan keputusan
14	Zhang & Yu (2020)	SEM + BN	Risk Analysis in Construction Using Hybrid SEM-BN Method	Metode hibrid SEM-BN untuk analisis risiko, pemodelan hubungan antar risiko, dan simulasi skenario.	Faktor risiko konstruksi, interdependensi antar risiko (dari SEM)	Dampak risiko terhadap tujuan proyek (biaya, waktu, kualitas), profil risiko proyek
15	Pinto & Slevin (1987)	Survei empiris (CSFs)	Critical Success Factors in Effective Project Implementation	Mengidentifikasi 10 faktor kunci keberhasilan proyek (CSFs) yang mempengaruhi implementasi proyek secara efektif	Faktor keberhasilan kritis (CSFs)	Keberhasilan proyek

16	Gundecha (2012)	Peneliti an empiris	Study of Factors Affecting Productivity of Labour in Construction Projects	Mengaitkan kerusakan/ke- dakersediaan peralatan dengan keterlambatan jadwal dan pembengkakan biaya	Keandalan peralatan	Waktu proyek, biaya proyek
----	--------------------	---------------------------	--	--	------------------------	----------------------------------

Analisis Naratif terhadap Tabel Penelitian Terdahulu

Dari tabel di atas, terlihat bahwa metode Bayesian Network (BN) banyak digunakan untuk menganalisis risiko proyek, khususnya dalam hal penjadwalan, biaya, mutu, dan keputusan manajerial dalam kondisi ketidakpastian. BN dipilih karena kemampuannya untuk memperbarui probabilitas dan mensimulasikan skenario yang kompleks, seperti ditunjukkan dalam studi oleh Marzouk & El-Rasas (2015) dan Sánchez et al. (2020).

Sementara itu, SEM lebih dominan digunakan dalam penelitian yang menekankan pada pengujian hubungan kausal antara variabel berdasarkan teori manajemen proyek. Penelitian oleh Zhao & Hwang (2014), Sweis & Sweis (2013), dan Unegbu et al. (2020) memperlihatkan penggunaan SEM untuk menganalisis hubungan antara pengelolaan sumber daya, biaya, waktu, dan hasil akhir proyek.

Pendekatan hibrida SEM–BN mulai mendapatkan perhatian lebih dalam beberapa tahun terakhir karena mampu menjembatani kekuatan SEM dalam validasi

teori dan BN dalam pemodelan probabilistik. Penelitian Goh & Sun (2016), Zhang & Yu (2020), serta Razi & Athavale (2021) menjadi contoh bagaimana integrasi kedua metode tersebut dapat menghasilkan analisis yang lebih komprehensif, realistis, dan responsif terhadap ketidakpastian proyek.

2.4.2 Celah Penelitian (Research Gap) dan Posisi Penelitian Ini

Berdasarkan kajian pustaka dan penelusuran terhadap berbagai studi empiris terdahulu, terdapat sejumlah kesenjangan penelitian (research gap) yang berhasil diidentifikasi. Kesenjangan ini menjadi dasar bagi formulasi kebaruan (novelty) dan penentuan posisi ilmiah dari penelitian ini dalam ranah keilmuan manajemen konstruksi, khususnya dalam pengelolaan sumber daya berbasis pendekatan kuantitatif.

1. Fokus Penelitian Terdahulu yang Masih Parsial

Sebagian besar literatur terdahulu mengkaji satu aspek atau satu jenis sumber daya secara terpisah, seperti hanya menganalisis SDM, atau hanya membahas dampak keterlambatan material terhadap waktu proyek. Meskipun temuan-temuan tersebut bermanfaat, pendekatan yang digunakan masih belum menyentuh interaksi komprehensif dan simultan antar sumber daya fisik utama: tenaga kerja (SDM), material, dan peralatan. Padahal, dalam praktiknya, ketiga komponen tersebut saling terkait erat dalam mempengaruhi keberhasilan proyek. Penelitian ini hadir untuk mengisi kekosongan tersebut dengan memodelkan hubungan ketiganya dalam satu kerangka struktural dan probabilistik secara bersamaan.

2. Minimnya Integrasi SEM dan BN dalam Konteks Manajemen Sumber Daya

Meskipun sudah terdapat beberapa studi yang mengintegrasikan Structural Equation Modeling (SEM) dan Bayesian Network (BN), sebagian besar masih terbatas pada analisis risiko proyek atau evaluasi performa secara umum. Belum banyak ditemukan penelitian yang secara spesifik memanfaatkan integrasi kedua metode tersebut untuk menganalisis efektivitas pengelolaan sumber daya fisik proyek konstruksi. Penelitian ini berupaya untuk memperluas cakupan metodologis tersebut dengan menggabungkan validasi struktural dari SEM dan simulasi probabilistik dari BN secara langsung pada elemen-elemen sumber daya proyek.

3. Kurangnya Studi Empiris pada Proyek Konstruksi Gudang di Indonesia

Literatur yang ada umumnya fokus pada proyek-proyek besar berskala nasional atau internasional, seperti infrastruktur publik, gedung perkantoran, atau proyek mega-konstruksi lainnya. Sementara itu, proyek pembangunan gudang—yang menjadi bagian penting dalam sistem logistik industri modern—masih belum banyak diangkat dalam studi akademis, terutama dalam konteks proyek konstruksi di Indonesia. Dinamika lokal seperti ketergantungan terhadap pemasok material, ketersediaan alat berat di daerah terpencil, serta keterbatasan tenaga kerja terampil menjadi tantangan khas yang belum banyak terdokumentasi dalam penelitian sebelumnya. Studi kasus pembangunan gudang PT CKS memberikan konteks lokal yang kuat untuk memperkaya temuan ilmiah.

4. Kurangnya Model untuk Mendukung Keputusan Adaptif di Lapangan

Kebanyakan model analisis dalam studi terdahulu bersifat deskriptif atau konfirmatori, dan belum mampu dikembangkan menjadi alat bantu pengambilan keputusan yang bersifat adaptif dan prospektif. Dalam praktiknya, manajer proyek seringkali menghadapi perubahan mendadak di lapangan seperti kekurangan material,

kerusakan peralatan, atau keterlambatan tenaga kerja. Namun, belum banyak penelitian yang menyediakan model analitik berbasis simulasi probabilistik untuk menjawab skenario-skenario tersebut. Dengan memasukkan Bayesian reasoning ke dalam struktur model SEM yang telah tervalidasi, penelitian ini menyajikan alat bantu pengambilan keputusan yang lebih responsif dan berbasis data.

Posisi dan Kontribusi Penelitian Ini

Berdasarkan keempat celah tersebut, posisi penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

- Kontribusi Teoritis: Menawarkan pendekatan integratif baru dalam analisis sumber daya fisik proyek konstruksi menggunakan gabungan SEM dan BN, yang memperluas model teoritis terkait determinan keberhasilan proyek.
- Kontribusi Metodologis: Mengembangkan model struktural berbasis SEM yang tervalidasi secara statistik, dan mengintegrasikannya dengan BN untuk membentuk model prediktif berbasis simulasi yang adaptif terhadap perubahan kondisi lapangan.
- Kontribusi Praktis: Menyediakan kerangka kerja analitis yang dapat digunakan oleh praktisi proyek konstruksi, khususnya dalam pengambilan keputusan strategis berbasis probabilitas ketika menghadapi risiko terkait pengelolaan SDM, material, dan peralatan.
- Kontribusi Kontekstual: Memberikan studi berbasis data lokal di Indonesia dengan fokus pada proyek gudang industri, yang dapat menjadi referensi dalam pengembangan model serupa untuk sektor logistik dan manufaktur.

Dengan kontribusi tersebut, penelitian ini tidak hanya memperkuat pemahaman teoritis mengenai manajemen sumber daya konstruksi, tetapi juga memberikan nilai praktis tinggi bagi pengembangan sistem pengambilan keputusan yang berbasis bukti (*evidence-based project management*).

2.5 Pengembangan Hipotesis dan Kerangka Pemikiran

Berdasarkan pembahasan teoritis yang telah dijelaskan dalam subbab-subbab sebelumnya serta temuan dari penelitian terdahulu, maka dapat dibangun suatu kerangka pemikiran yang menjelaskan hubungan logis antara variabel sumber daya proyek konstruksi dan keberhasilan proyek.

Teori manajemen konstruksi secara konsisten menekankan bahwa efektivitas dalam pengelolaan sumber daya fisik yang terdiri dari Sumber Daya Manusia (SDM), material, dan peralatan berkontribusi langsung terhadap tercapainya sasaran proyek, yaitu ketepatan waktu, efisiensi biaya, dan kualitas hasil pekerjaan. Dalam praktiknya, kelalaian atau keterbatasan dalam mengelola satu jenis sumber daya seringkali berdampak sistemik terhadap keseluruhan proses proyek. Hal ini memperkuat asumsi bahwa ketiga sumber daya tersebut perlu dianalisis secara simultan dan integratif.

2.5.1 Hubungan Antar Variabel dan Pengembangan Hipotesis

Dalam penelitian ini, tiga variabel bebas utama yang merepresentasikan sumber daya fisik dalam proyek konstruksi yaitu Sumber Daya Manusia (SDM), Material, dan Peralatan diasumsikan memiliki pengaruh langsung terhadap Keberhasilan Proyek Konstruksi sebagai variabel terikat. Berdasarkan teori dan hasil temuan empiris

sebelumnya, maka dikembangkan lima hipotesis utama yang akan diuji dalam dua tahap pendekatan: secara kausal menggunakan SEM, dan secara probabilistik melalui BN.

Pengaruh Sumber Daya Manusia terhadap Keberhasilan Proyek (H1)

Tenaga kerja yang kompeten dan produktif merupakan aset strategis dalam pelaksanaan proyek konstruksi. Literatur manajemen proyek seperti yang disampaikan oleh Gould & Joyce (2009) menyebutkan bahwa ketersediaan tenaga kerja dengan keterampilan yang sesuai akan meningkatkan efisiensi operasional serta mengurangi risiko rework, keterlambatan, dan konflik di lapangan. Di sisi lain, kelangkaan tenaga kerja terampil, sebagaimana telah diidentifikasi pada studi kasus pembangunan gudang PT CKS, dapat menyebabkan gangguan signifikan terhadap alur pelaksanaan proyek.

Dengan demikian, dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

H1: SDM berpengaruh secara parsial, positif, dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek.

Pengaruh Material terhadap Keberhasilan Proyek (H2)

Material merupakan komponen fisik yang langsung membentuk produk konstruksi. Ketepatan pengadaan dan kecocokan spesifikasi material memiliki efek langsung terhadap kualitas hasil akhir, serta efisiensi biaya dan waktu. Keterlambatan distribusi material atau penerimaan bahan yang tidak sesuai dapat menimbulkan waktu tunggu (*idle time*) dan membebani biaya akibat pengadaan ulang atau remediasi. Hal ini sangat nyata pada proyek-proyek di mana pasokan material sangat bergantung pada rantai pasok yang panjang dan kompleks.

Berdasarkan hal tersebut, maka hipotesis kedua dirumuskan sebagai berikut:

H2: Material berpengaruh secara parsial, positif, dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek.

Pengaruh Peralatan terhadap Keberhasilan Proyek (H3)

Peralatan kerja terutama alat berat berperan krusial dalam menyelesaikan pekerjaan-pekerjaan berskala besar dan teknis. Efektivitas alat diukur tidak hanya dari kapasitas teknis, tetapi juga dari keandalan (*reliability*) dan kesesuaian penggunaannya. Kerusakan alat atau keterlambatan mobilisasi alat akan berpotensi menghentikan kegiatan konstruksi, terutama pada jalur kritis proyek (*critical path*). Hal ini akan berdampak pada keterlambatan progres dan pembengkakan biaya operasional akibat downtime.

Dengan mempertimbangkan pentingnya faktor ini, hipotesis ketiga dirumuskan sebagai berikut:

H3: Peralatan berpengaruh secara parsial, positif, dan signifikan terhadap Keberhasilan Proyek.

Pengembangan Hipotesis Berbasis Probabilitas.

Selain menguji pengaruh parsial, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis dinamika sumber daya dalam kondisi ketidakpastian. Keterkaitan antar variabel di lapangan tidak bersifat deterministik, melainkan probabilistik. Untuk menangkap interaksi ini, digunakan model *Bayesian Network* (BN) guna mengidentifikasi faktor paling berpengaruh dan mensimulasikan berbagai skenario. Oleh karena itu, dikembangkan dua hipotesis lanjutan:

Hipotesis Faktor Dominan (H4).

Dalam sebuah sistem yang kompleks, seringkali terdapat satu faktor yang pengaruhnya lebih besar dibandingkan yang lain. Analisis sensitivitas pada model BN memungkinkan untuk mengidentifikasi variabel mana yang paling krusial. Berdasarkan observasi awal dan tinjauan pustaka, dirumuskan hipotesis keempat:

H4: Sumber Daya Manusia (SDM) merupakan faktor yang paling dominan dalam mempengaruhi Keberhasilan Proyek.

Hipotesis Skenario Optimal (H5).

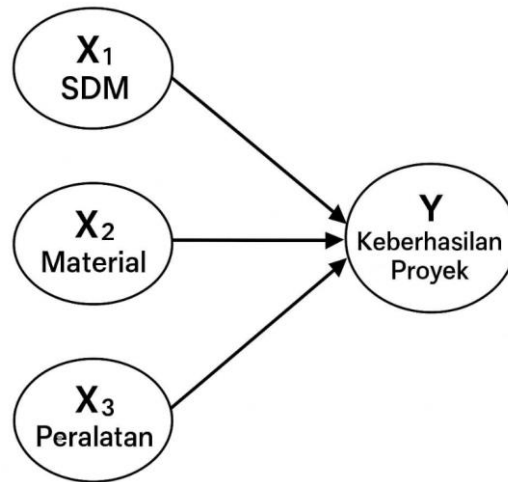
Penelitian ini juga ingin mengukur dampak sinergis dari pengelolaan semua sumber daya secara ideal. Simulasi *what-if analysis* pada model BN dapat digunakan untuk memprediksi hasil dari skenario terbaik ini. Dengan demikian, dirumuskan hipotesis kelima:

H5: Probabilitas Keberhasilan Proyek akan meningkat secara signifikan jika kondisi ketiga sumber daya (SDM, Material, dan Peralatan) berada pada level optimal secara bersamaan.

2.5.2 Kerangka Pemikiran dan Definisi Operasional Variabel

Berdasarkan tinjauan pustaka dan hipotesis yang telah dikembangkan, penelitian ini membangun sebuah kerangka pemikiran konseptual. Kerangka ini bertujuan untuk memvisualisasikan alur hubungan kausal yang dihipotesiskan antara variabel independen (SDM, Material, dan Peralatan) dengan variabel dependen (Keberhasilan Proyek). Kerangka ini menjadi landasan utama untuk pengembangan model *Structural Equation Modeling* (SEM) serta menjadi acuan dalam penyusunan instrumen penelitian dan analisis data.

Secara visual, kerangka pemikiran konseptual dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1 Kerangka Pemikiran Konseptual Penelitian

Untuk mengukur setiap variabel dalam kerangka konseptual tersebut, dilakukan proses operasionalisasi yang mengubah konsep abstrak menjadi indikator yang dapat diukur. Definisi operasional, indikator, serta metode pengukuran untuk setiap variabel dirangkum secara sistematis dalam tabel di bawah ini.

Tabel 3. Definisi Operasional dan Pengukuran Variabel

Jenis Variabel	Definisi Operasional	Indikator Utama (Sesuai Item Kuesioner)	Alat Ukur / Sumber Data	Skala Pengukuran
Independen (X1) – SDM	Persepsi responden terhadap ketersediaan,	1. Kecukupan ketersediaan tenaga kerja (A1)	Kuesioner kepada seluruh karyawan	Likert 1–7

	kompetensi, dan produktivitas tenaga kerja proyek.	2. Kesesuaian kompetensi/keahlian tenaga kerja (A2)	proyek PT CKS	
		3. Tingkat produktivitas tenaga kerja (A3)		
Independen (X2) – Material	Persepsi responden terhadap ketepatan waktu, kualitas, dan efisiensi pengadaan material proyek.	1. Ketersediaan material yang tepat waktu (B1)	Kuesioner kepada seluruh karyawan proyek PT CKS	Likert 1–7
		2. Kualitas material yang sesuai standar (B2)		
		3. Efisiensi pengadaan material (bebas dari pemborosan) (B3)		
Independen (X3) – Peralatan	Persepsi responden terhadap ketersediaan, kondisi, dan optimalisasi penggunaan alat kerja proyek.	1. Ketersediaan peralatan saat dibutuhkan (C1)	Kuesioner kepada seluruh karyawan proyek PT CKS	Likert 1–7
		2. Kondisi peralatan yang baik dan layak pakai (C2)		
		3. Optimalisasi penggunaan alat sesuai fungsinya (C3)		

Dependen (Y) – Persepsi	1. Pencapaian mutu Kuesioner Likert 1–7
Keberhasilan responden	hasil pekerjaan kepada
Proyek terhadap	sesuai standar (D1) seluruh
pencapaian	2. Penyelesaian proyek karyawan
sasaran mutu,	yang tepat waktu proyek PT
waktu, dan biaya	sesuai jadwal (D2) CKS
proyek.	3. Penyelesaian proyek
	yang sesuai dengan
	anggaran biaya (D3)

Seluruh indikator di atas diukur menggunakan **Skala Likert 7 poin**. Pemilihan skala 7 poin ini didasarkan pada pertimbangan metodologis yang kuat untuk meningkatkan kualitas data yang diperoleh. Berbagai studi dalam bidang psikometri dan metodologi survei menunjukkan bahwa skala dengan 7 titik respons memiliki beberapa keunggulan dibandingkan skala yang lebih pendek (misalnya, 5 poin):

- Peningkatan Sensitivitas dan Granularitas: Skala 7 poin memberikan rentang pilihan yang lebih luas, memungkinkan responden untuk mengekspresikan tingkat persepsi atau persetujuan mereka secara lebih detail dan bernuansa. Hal ini dapat menangkap perbedaan kecil dalam opini yang mungkin hilang pada skala 5 poin (Preston & Colman, 2000).
- Keandalan (Reliability) yang Lebih Tinggi: Penelitian menunjukkan bahwa keandalan pengukuran (seringkali diukur dengan Cronbach's Alpha) cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah titik skala, dan mencapai titik optimal di sekitar 7 poin (Lozano, García-Cueto, & Muñiz, 2008).

- Distribusi Data yang Lebih Baik: Skala 7 poin menghasilkan distribusi data yang lebih mendekati kurva normal. Hal ini sangat menguntungkan untuk analisis statistik parametrik seperti *Structural Equation Modeling* (SEM) yang akan digunakan dalam penelitian ini, karena asumsi normalitas data lebih mungkin terpenuhi (Finstad, 2010).

Dalam kuesioner ini, skala tersebut direpresentasikan sebagai berikut:

1 = Sangat Tidak Setuju

2 = Tidak Setuju

3 = Agak Tidak Setuju

4 = Netral

5 = Agak Setuju

6 = Setuju

7 = Sangat Setuju

Data yang diperoleh dari skala ini akan digunakan untuk dua tahap analisis utama. Pertama, data akan diperlakukan sebagai data interval untuk memenuhi asumsi dalam pengujian hipotesis kausal menggunakan *Structural Equation Modeling* (SEM). Kedua, untuk membangun model Bayesian Network (BN) yang memerlukan variabel dalam bentuk diskrit, skor rata-rata dari setiap variabel akan di diskritisasi (diubah dari data kontinu menjadi kategori). Proses kategorisasi ini dilakukan berdasarkan rentang skor yang telah ditetapkan secara spesifik sebagai berikut:

- Rendah: Jika skor rata-rata variabel berada di bawah 3.5.
- Sedang: Jika skor rata-rata variabel berada di rentang 3.5 hingga 5.5.
- Tinggi: Jika skor rata-rata variabel berada di atas 5.5.

Proses diskritisasi yang terdefinisi dengan jelas ini merupakan langkah krusial yang memungkinkan data yang sama dapat diintegrasikan dan dianalisis secara sistematis menggunakan dua pendekatan metode yang berbeda (SEM dan BN).

2.6 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan uraian teoritis, kajian pustaka, dan kerangka pemikiran konseptual, penelitian ini merumuskan lima hipotesis utama yang akan diuji secara empiris. Tiga hipotesis pertama difokuskan pada pengujian pengaruh parsial dari setiap variabel sumber daya terhadap keberhasilan proyek menggunakan *Structural Equation Modeling* (SEM). Dua hipotesis berikutnya dirancang untuk diuji dalam konteks probabilistik menggunakan *Bayesian Network* (BN) guna mengidentifikasi faktor dominan dan menganalisis skenario.

Adapun perumusan hipotesis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 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.

- d. H4: SDM merupakan faktor yang paling dominan dalam mempengaruhi Keberhasilan Proyek.
- e. H5: Probabilitas Keberhasilan Proyek akan meningkat secara signifikan jika kondisi ketiga sumber daya berada pada level optimal.

Pengujian hipotesis H1 hingga H3 akan dilakukan melalui analisis model kausal dalam SEM, sementara H4 dan H5 akan diuji menggunakan pendekatan probabilistik melalui model BN. Dengan demikian, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan konfirmatori dan prediktif untuk memperoleh pemahaman yang menyeluruh terhadap hubungan antar sumber daya dan keberhasilan proyek konstruksi.