

Integrasi *Building Information Modelling* (BIM) dan *Internet of Things* (IoT) dalam Analisis dan Pengendalian Risiko Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) pada Proyek Gedung Bertingkat Tinggi

WUDI DARUL PUTRA¹, ANNISA JUNAID^{1*}

¹Program Studi Teknik Sipil Universitas Muslim Indonesia, Makassar, Indonesia
Email: wudidarulputra@umi.ac.id, annisa.junaid@umi.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis risiko kecelakaan konstruksi pada proyek gedung bertingkat tinggi serta mengembangkan strategi pengendalian risiko melalui integrasi Building Information Modelling (BIM) dan Internet of Things (IoT) dalam penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK). Metode penelitian mencakup studi literatur, survei kuesioner, dan analisis deskriptif untuk menentukan tingkat risiko. Data diperoleh dari RQ1 dan RQ2 hasil penelitian sebelumnya, yang menemukan 73 variabel risiko pada tahap pelaksanaan proyek, terdiri dari 31 risiko kecil, 40 risiko sedang, dan 2 risiko besar. BIM digunakan untuk memodelkan risiko secara visual dalam lingkungan 3D, sementara IoT memungkinkan monitoring kondisi lapangan secara real-time. Integrasi teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas SMKK, meminimalkan kecelakaan kerja, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Data risiko diolah menggunakan analisis deskriptif dan dipetakan ke dalam BIM, sedangkan sensor IoT digunakan untuk pemantauan real-time terhadap variabel keselamatan seperti penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), kondisi peralatan, dan aktivitas pekerja.

Kata kunci: BIM, IoT, SMKK, Manajemen Risiko, Gedung Bertingkat Tinggi

ABSTRACT

The research aims to identify and analyze construction accident risks in high-rise building projects and to develop risk control strategies through the integration of Building Information Modelling (BIM) and the Internet of Things (IoT) in the implementation of Construction Safety Management Systems (CSMS). The research methods include literature review, questionnaire surveys, and descriptive analysis to determine the risk levels. Data is obtained from RQ1 and RQ2 of previous studies, which identified 73 risk variables in the project execution phase, consisting of 31 minor risks, 40 moderate risks, and 2 major risks. BIM is used to visually model risks in a 3D environment, while IoT enables real-time monitoring of field conditions. The integration of these technologies is expected to enhance the effectiveness of CSMS, minimize work accidents, and support data-driven decision-making. Risk data is processed using descriptive analysis and mapped into BIM, whereas IoT sensors are used for real-time monitoring of safety variables such as the use of Personal Protective Equipment (PPE), equipment conditions, and worker activities.

Keywords: BIM, IoT, CSMS, Risk Management, High-Rise Building

1. PENDAHULUAN

Kegiatan konstruksi gedung bertingkat tinggi di Indonesia menghadapi tantangan besar terkait keselamatan kerja. Data BPJS Ketenagakerjaan menunjukkan sektor konstruksi memiliki tingkat kecelakaan tertinggi di Indonesia. Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) diwajibkan melalui Permen PUPR No.10/2021 untuk menjamin keselamatan pekerja, publik, dan lingkungan [1].

Integrasi *Building Information Modelling* (BIM) dan *Internet of Things* (IoT) diusulkan sebagai solusi untuk meningkatkan efektivitas SMKK. BIM menyediakan representasi digital 3D/4D dari proyek yang memudahkan simulasi risiko dan penentuan metode kerja aman, sedangkan IoT menyediakan pemantauan real-time terhadap variabel keselamatan, termasuk pelacakan pekerja, deteksi keausan peralatan, dan kondisi lingkungan kerja [2].

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi risiko kecelakaan konstruksi yang berpotensi terjadi pada proyek gedung bertingkat tinggi, menganalisis tingkat risiko kecelakaan konstruksi, serta mengembangkan konsep integrasi BIM dan IoT dalam SMKK untuk meningkatkan efektivitas pengendalian risiko.

2. METODOLOGI

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan metode survei untuk mengidentifikasi dan menganalisis risiko kecelakaan konstruksi pada proyek gedung bertingkat tinggi. Hasil analisis digunakan untuk mengembangkan konsep integrasi *Building Information Modelling* (BIM) dan *Internet of Things* (IoT) dalam penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK).

2.2 Populasi dan Sampel

Populasi penelitian adalah tenaga kerja yang terlibat dalam proyek konstruksi gedung bertingkat tinggi. Sampel dipilih menggunakan *purposive sampling*, yaitu responden yang memiliki pengalaman dan pengetahuan terkait SMKK.

2.3 Jenis dan Sumber Data

Data terdiri dua:

- a. Data Primer: Hasil kuesioner, observasi lapangan, dan simulasi BIM.
- b. Data Sekunder: Dokumen perencanaan proyek, literatur akademik, dan data sensor IoT.

2.4 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dalam tiga tahap:

- a. Studi literatur untuk mengidentifikasi variabel risiko.
- b. Penyebaran kuesioner untuk memperoleh data tingkat risiko.
- c. Integrasi BIM dan IoT, meliputi:
 - Pemodelan risiko dalam lingkungan BIM (3D/4D) berdasarkan variabel risiko yang teridentifikasi.
 - Pemasangan sensor IoT (misalnya accelerometer, GPS, sensor APD) untuk monitoring *real-time* kondisi kerja.

2.5 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian terdiri tiga:

- a. Kuesioner analisis risiko dengan skala Likert.
- b. Model BIM yang dilengkapi anotasi titik risiko.

c. Platform IoT yang terhubung dengan dashboard monitoring.

2.6 Metode Analisis Data

Analisis deskriptif digunakan untuk menghitung nilai rata-rata tingkat risiko (*mean score*) dan mengklasifikasikan risiko ke dalam kategori kecil, sedang, dan besar. Integrasi BIM digunakan untuk visualisasi spasial risiko, sedangkan data IoT digunakan untuk memvalidasi hasil analisis melalui perbandingan antara prediksi risiko dan kondisi lapangan (**Gambar 1**) secara *real-time*.

2.6 Validasi

Validasi dilakukan melalui diskusi pakar (*expert judgment*) untuk menilai efektivitas pengendalian risiko yang dihasilkan dari integrasi BIM dan IoT dalam SMKK.



Gambar 1. Lokasi penelitian (gedung Justice Tower UNHAS dan apartemen Azura CPI Makassar)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini memberikan gambaran komprehensif mengenai bagaimana integrasi *Building Information Modelling* (BIM) dan *Internet of Things* (IoT) dapat meningkatkan efektivitas Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) pada proyek gedung bertingkat tinggi.

3.1 Identifikasi dan Klasifikasi Risiko

Berdasarkan studi literatur dan survei kuesioner terhadap 50 responden, diperoleh 73 variabel risiko keselamatan konstruksi (**Tabel 1**). Kategori risiko terbagi menjadi pekerjaan struktur, arsitektur, mekanikal-elektrikal, dan penunjang. Analisis deskriptif menunjukkan 2 risiko kategori tinggi, 40 risiko sedang, dan 31 risiko rendah. Risiko tinggi didominasi oleh pekerjaan di ketinggian tanpa pengamanan memadai dan potensi jatuhnya material dari alat angkat.

Dari hasil analisis data dari RQ1 dan RQ2, diperoleh 73 variabel risiko kecelakaan konstruksi pada proyek gedung bertingkat tinggi pada tahap pelaksanaan, yang terbagi menjadi:

- a. Risiko kecil : 31 variabel.

- b. Risiko sedang : 40 variabel.
c. Risiko besar : 2 variabel.

Tabel 1. Distribusi Keselamatan Konstruksi

No	Variabel	Kekerapan	Keparahan	Tingkat Risiko	Keterangan Risiko
X.1	STRUKTUR				
X.1.1	Pekerjaan Persiapan				
X.1.1.1	Area kerja tidak aman yang berisiko menyebabkan kecelakaan alat berat	4,17	3,61	15,05	Besar
X.1.1.2	Gangguan lingkungan	2,98	2,61	7,78	Sedang
X.1.2	Pekerjaan Tanah				
X.1.2.1	Longsor	2,72	2,76	7,51	Sedang
X.1.2.2	Pekerja tertimbun	2,39	2,70	6,45	Sedang
X.1.2.3	Interaksi degan alat berat	2,98	2,93	8,73	Sedang
X.1.3	Pekerjaan Fondasi				
X.1.3.1	Gagalnya struktur fondasi	2,48	2,74	6,80	Sedang
X.1.3.2	Jatuhnya material berat	2,57	2,57	6,60	Sedang
X.1.4	Pekerjaan Struktur Bangunan Utama				
X.1.4.1	Jatuh dari ketinggian	4,02	3,74	15,03	Besar
X.1.4.2	Kegagalan perancah	2,35	2,63	6,18	Sedang
X.1.4.3	Tertimpa material	2,52	2,54	6,60	Sedang
X.1.5	Pekerjaan Atap				
X.1.5.1	Jatuh dari atap	2,50	2,78	6,95	Sedang
X.1.5.2	Pemasangan rangka tidak stabil	2,43	2,63	6,39	Sedang
X.1.6	Pekerjaan Tangga				
X.1.6.1	Jatuh dari tangga	2,41	2,48	5,98	Sedang
X.1.6.2	Kesalahan pemasangan keramik	2,28	2,17	4,95	Kecil
X.1.7	Pekerjaan Ramp				
X.1.7.1	Kemiringan <i>ramp</i> tidak sesuai	2,39	2,35	5,62	Sedang
X.1.7.2	Pekerja terpeleset saat pengerjaan	2,57	2,48	6,37	Sedang
X.2	ARSITEKTUR				
X.2.1	Pekerjaan Dinding				
X.2.1.1	Jatuh dari tangga saat pemasangan	2,35	2,37	5,57	Sedang
X.2.1.2	Kesalahan pemasangan dinding	2,28	2,24	5,11	Sedang
X.2.2	Pekerjaan <i>Finishing</i> Lantai				
X.2.2.1	Terpeleset saat pemasangan lantai	2,04	2,13	4,35	Kecil
X.2.2.2	Alat pemotong material tajam	2,63	2,61	6,86	Sedang
X.2.3	Pekerjaan <i>Plafond</i>				
X.2.3.1	Jatuh saat pemasangan rangka plafond	2,30	2,26	5,20	Sedang
X.2.3.2	Material jatuh ke pekerja	2,41	2,37	5,71	Sedang
X.2.4	Pekerjaan Kusen				
X.2.4.1	Pemasangan tidak presisi	2,28	2,20	5,02	Sedang
X.2.4.2	Cedera akibat material berat	2,37	2,41	5,71	Sedang
X.2.5	Pekerjaan Sanitasi				
X.2.5.1	Terpapar limbah sanitasi	2,09	2,22	4,64	Kecil
X.2.5.2	Kebocoran pipa saat instalasi	2,50	2,46	6,15	Sedang
X.2.6	Pekerjaan Lain-lain				
X.2.6.1	Cedera saat pemasangan <i>railing</i>	2,24	2,26	5,06	Sedang
X.2.6.2	Kesalahan pemasangan ACP dan tiang bendera	2,39	2,30	5,50	Sedang
X.3	MEP (<i>Mechanical, Electrical and Plumbing</i>)				
X.3.1	Pekerjaan Instalasi Listrik				
X.3.1.1	Sengatan listrik	2,67	2,76	7,37	Sedang
X.3.1.2	Kesalahan instalasi	2,43	2,43	5,90	Sedang
X.3.1.3	Kebakaran akibat korsleting	2,17	2,41	5,23	Sedang

*Integrasi Building Information Modelling (BIM) dan Internet of Things (IoT) dalam
Analisis dan Pengendalian Risiko Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK)
pada Proyek Gedung Bertingkat Tinggi*

Tabel 1. Distribusi Keselamatan Konstruksi lanjutan

No	Variabel	Kekerapan	Keparahan	Tingkat Risiko	Keterangan Risiko
X.3.2	Pekerjaan Panel Listrik				
X.3.2.1	Gangguan sistem kelistrikan	2,39	2,33	5,57	Sedang
X.3.2.2	Kegagalan fungsi panel	2,24	2,30	5,15	Sedang
X.3.3	Pekerjaan Panel Feeder				
X.3.3.1	Kesalahan pemasangan kabel dapat menyebabkan lonjakan tegangan	2,26	2,41	5,45	Sedang
X.3.4	Pekerjaan Penangkal Petir				
X.3.4.1	Sambaran petir yang tidak tersalurkan dengan baik dapat merusak bangunan	2,37	2,41	5,71	Sedang
X.3.5	Pekerjaan Instalasi Air Bersih				
X.3.5.1	Kebocoran pipa	2,28	2,22	5,06	Sedang
X.3.5.2	Kontaminasi air bersih	2,20	2,20	4,84	Kecil
X.3.5.3	Tekanan air tidak stabil	2,35	2,20	5,17	Sedang
X.3.6	Pekerjaan Sistem Pompa Distribusi				
X.3.6.1	Kegagalan pompa	2,26	2,22	5,02	Sedang
X.3.6.2	<i>Overpressure</i> pada sistem distribusi	2,22	2,22	4,93	Kecil
X.3.7	Pekerjaan Instalasi Air Kotor dan Buangan				
X.3.7.1	Sumbatan pada saluran	2,37	2,30	5,45	Sedang
X.3.7.2	Kebocoran air limbah	2,26	2,24	5,06	Sedang
X.3.7.3	Bau tidak sedap	2,43	2,24	5,44	Sedang
X.3.8	Pekerjaan Pemipaan Tegak dalam <i>Shaft</i>				
X.3.8.1	Gagalnya sistem distribusi vertikal	2,15	2,20	4,73	Kecil
X.3.8.2	Tekanan air tidak merata	2,20	2,13	4,69	Kecil
X.3.9	Pekerjaan Pemipaan Buangan Air Hujan				
X.3.9.1	Sumbatan pada saluran air hujan	2,24	2,13	4,77	Kecil
X.3.9.2	Kebocoran	2,43	2,39	5,81	Sedang
X.3.9.3	Genangan air berlebih	2,24	2,22	4,97	Kecil
X.3.10	Pekerjaan Instalasi <i>Fire Hydrant</i> dan <i>Sprinkler</i>				
X.3.10.1	Sistem hydrant tidak berfungsi saat darurat	2,30	2,26	5,20	Sedang
X.3.10.2	Kebocoran pipa	2,30	2,26	5,20	Sedang
X.3.11	Pekerjaan Instalasi <i>Fire Sprinkler</i>				
X.3.11.1	Kegagalan sprinkler dalam menyemprotkan air saat kebakaran	2,22	2,22	4,93	Kecil
X.3.12	Pekerjaan Pompa Pemadam Kebakaran				
X.3.12.1	Pompa tidak bekerja optimal saat pemadaman kebakaran	2,13	2,17	4,62	Kecil
X.3.13	Pekerjaan Instalasi <i>Fire Alarm</i>				
X.3.13.1	Alarm tidak berfungsi	2,15	2,07	4,49	Kecil
X.3.13.2	Detektor tidak sensitif terhadap asap	2,13	2,11	4,49	Kecil
X.3.14	Pekerjaan Instalasi <i>Air Conditioning</i> (AC)				
X.3.14.1	Kesalahan pemasangan untuk menyebabkan kebocoran <i>refrigerant</i>	2,17	2,09	4,54	Kecil
X.3.15	Pekerjaan Pengadaan dan Pemasangan Pipa <i>Refrigerant</i>				
X.3.15.1	Kebocoran pipa <i>refrigerant</i>	2,17	2,07	4,49	Kecil
X.3.15.2	Kesalahan ukuran pipa	2,13	2,11	4,49	Kecil
X.3.16	Pekerjaan Pengkabelan Instalasi AC				
X.3.16.1	Korsleting listrik akibat kabel tidak terpasang dengan benar	2,26	2,11	4,77	Kecil
X.3.17	Pekerjaan Instalasi <i>Exhaust Fan</i>				
X.3.17.1	Kegagalan fungsi ventilasi	2,07	2,07	4,28	Kecil
X.3.17.2	Sumbatan pada <i>ducting</i>	2,07	2,02	4,18	Kecil

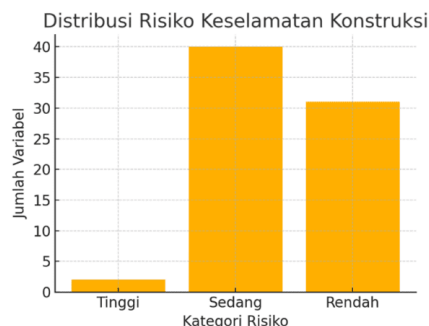
Tabel 1. Distribusi Keselamatan Konstruksi lanjutan

No	Variabel	Kekerapan	Keparahan	Tingkat Risiko	Keterangan Risiko
X.4	SARANA & LINGKUNGAN				
X.4.1	Pekerjaan Pagar dan Gerbang				
X.4.1.1	Kegagalan struktur pagar	1,93	1,91	3,69	Kecil
X.4.1.2	Runtuhnya gerbang saat pemasangan	1,91	1,96	3,74	Kecil
X.4.2	Pekerjaan Pos <i>Security</i>				
X.4.2.1	Kesalahan struktur pos <i>security</i>	1,78	1,85	3,29	Kecil
X.4.2.2	Instalasi listrik tidak aman	2,04	2,11	4,30	Kecil
X.4.3	Pekerjaan Drainase				
X.4.3.1	Penyumbatan drainase	2,17	2,17	4,71	Kecil
X.4.3.2	Jatuhnya material berat	2,11	2,13	4,49	Kecil
X.4.4	Pekerjaan <i>Paving</i> dan Jalan				
X.4.4.1	Paving tidak rata menyebabkan kecelakaan	2,17	1,98	4,30	Kecil
X.4.4.2	Beton jalan retak	2,41	2,15	5,18	Kecil
X.4.5	Pekerjaan Instalasi Pencahayaan				
X.4.5.1	Sengatan listrik	2,15	2,28	4,90	Kecil
X.4.5.2	Kegagalan sistem pencahayaan	2,24	2,13	4,77	Kecil
X.4.5.3	Kabel terbuka	2,20	2,33	5,13	Sedang
X.4.6	Pekerjaan Tangga				
X.4.6.1	Tertimpa pohon saat penanaman	1,85	1,93	3,57	Kecil
X.4.6.2	Kegagalan drainase taman	2,13	2,02	4,30	Kecil

Kekerapan	Keparahan					Keterangan
	1	2	3	4	5	
1	1	2	3	4	5	1-4 : Tingkat risiko kecil 5-12 : Tingkat risiko sedang 15-25 : Tingkat risiko besar
2	2	4	6	8	10	
3	3	6	9	12	15	
4	4	8	12	16	20	
5	5	10	15	20	25	

Gambar 2. Tingkat risiko**Tabel 2. Distribusi Keselamatan Konstruksi**

Kategori Risiko	Jumlah Variabel	Persentase [%]	Contoh Risiko
Tinggi	2	2,74	- Pekerjaan di ketinggian tanpa pengaman
Sedang	40	54,79	- Potensi tertimpa material - Tersengat listrik
Rendah	31	42,47	- Tata letak material kurang rapi

**Gambar 3. Distribusi risiko keselamatan konstruksi**

Dalam penelitian ini, setiap kategori risiko dianalisis secara mendalam untuk memahami karakteristiknya (**Gambar 2**). Risiko tinggi (*High Risk*) diidentifikasi terutama pada pekerjaan

di ketinggian >20 meter dan pengoperasian *tower crane*. Potensi bahaya mencakup jatuh dari ketinggian, tertimpa beban, dan kegagalan alat angkat. Analisis terhadap data IoT menunjukkan bahwa area dengan tingkat kepadatan pekerja tinggi memiliki frekuensi pelanggaran prosedur keselamatan yang signifikan, terutama pada jam-jam sibuk (08.00-10.00 dan 13.00-15.00). Risiko sedang (*Medium Risk*) meliputi bahaya seperti tersengat listrik, terpapar debu silika, dan luka akibat penggunaan alat pemotong. Data dari sensor IoT mengungkapkan adanya lonjakan kadar debu di area pengecoran beton pada siang hari, yang kemudian diintegrasikan ke model BIM untuk menentukan kebutuhan penambahan ventilasi atau sistem penangkap debu portabel. Risiko rendah (*Low Risk*) umumnya berhubungan dengan kondisi tata letak material dan area kerja yang kurang rapi. Meskipun dampaknya relatif kecil, penumpukan risiko rendah dapat menimbulkan insiden minor yang berulang, yang berpengaruh terhadap produktivitas.

Pengendalian risiko dominan adalah pengendalian administratif. Hal ini diikuti oleh rekayasa teknis, penggunaan APD, eliminasi, dan substitusi (**Gambar 4**). Berdasarkan hasil analisis deskriptif (**Tabel 2** dan **Gambar 3**), kategori risiko sedang mendominasi dengan persentase lebih dari 50%, menunjukkan perlunya pengendalian proaktif untuk mencegah eskalasi menjadi risiko tinggi. Risiko tinggi walaupun jumlahnya kecil (2,74%); memiliki potensi dampak fatal sehingga pengendalian berbasis IoT seperti sensor zona bahaya dan peringatan *real-time* sangat direkomendasikan. Risiko rendah tetap memerlukan pemantauan karena berkontribusi terhadap keseluruhan budaya keselamatan kerja di proyek. Analisis deskriptif digunakan untuk menentukan tingkat risiko, sedangkan teori Pareto digunakan untuk memilih 20% variabel risiko yang paling kritis untuk dikendalikan.

Integrasi BIM dan IoT dapat memperkuat SMKK melalui:

- a. BIM untuk simulasi dan visualisasi potensi kecelakaan.
- b. IoT untuk deteksi dini dan monitoring kondisi lapangan.
- c. *Dashboard* integrasi yang menampilkan status risiko secara *real-time*.



Gambar 4. Hierarki pengendalian risiko [6]

3.2 Integrasi BIM

Model BIM 3D/4D digunakan untuk memetakan titik-titik risiko secara visual. BIM digunakan untuk memvisualisasikan lokasi dan jenis risiko dalam model 3D proyek. Setiap titik risiko dipetakan pada elemen bangunan terkait, seperti area pekerjaan di ketinggian, area lalu lintas alat berat, dan area material berbahaya. Model BIM 4D juga digunakan untuk mensimulasikan tahapan konstruksi, sehingga risiko dapat dianalisis sesuai urutan pekerjaan. Hal ini mempermudah pengambilan keputusan terkait jadwal kerja yang aman. Contoh implementasi termasuk simulasi pergerakan material untuk menghindari zona rawan benturan, serta pemodelan urutan pekerjaan untuk mencegah tumpang tindih aktivitas berisiko. Fitur *clash*

detection BIM mempermudah identifikasi konflik ruang kerja yang berpotensi memicu kecelakaan [7].

3.3 Implementasi IoT

Penerapan IoT dilakukan melalui pemasangan sensor posisi dan lingkungan. Smart helmet dilengkapi GPS dan accelerometer digunakan untuk memantau pergerakan pekerja serta mendeteksi kejadian jatuh. Sensor lingkungan dipasang untuk memantau suhu, kelembaban, kebisingan, dan kualitas udara. IoT diimplementasikan dengan pemasangan sensor untuk memantau variabel keselamatan secara real-time, meliputi:

- Sensor ketinggian untuk memantau pekerja di atas ketinggian 2 meter.
- Sensor getaran pada perancah untuk mendeteksi ketidakstabilan struktur.
- Sensor APD untuk memastikan pekerja menggunakan helm, rompi, dan harness [13].
- GPS dan RFID untuk melacak lokasi pekerja dan peralatan.

Data dikirim ke *cloud* dan divisualisasikan pada *dashboard* terintegrasi dengan model BIM (**Gambar 5**). Data sensor dikirimkan ke *dashboard monitoring* yang terhubung dengan model BIM [8], sehingga setiap potensi pelanggaran keselamatan dapat divisualisasikan pada lokasi sebenarnya di proyek.



Gambar 5. Pemantauan lingkungan kerja dengan peralatan [5]

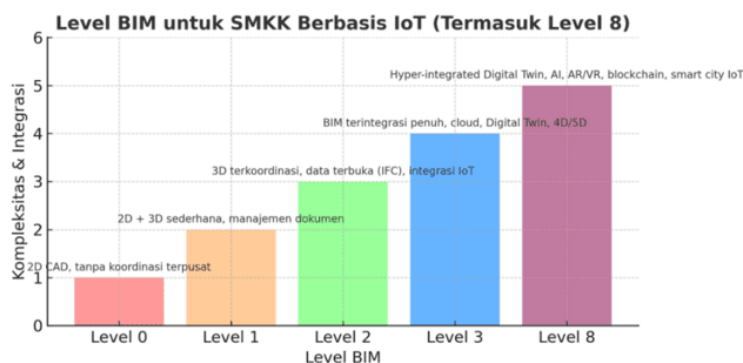
3.4 Dampak Penerapan

Uji coba di proyek 25 lantai menunjukkan penurunan pelanggaran penggunaan APD sebesar 35%, percepatan respons insiden dari 12 menit menjadi 5 menit, serta penurunan risiko tinggi sebesar 25%. Selain itu, terjadi peningkatan kesadaran keselamatan yang diukur dari partisipasi pekerja dalam *safety briefing* harian. Dalam penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT) [11-12][14], pemilihan Level BIM yang tepat sangat penting agar sistem dapat berjalan efektif (**Gambar 6**).

Berdasarkan standar UK BIM *Framework* dan praktik internasional, level BIM dapat dibagi menjadi beberapa tingkatan:

- Level 0: Menggunakan gambar 2D CAD tanpa koordinasi terpusat. Tidak direkomendasikan untuk SMKK berbasis IoT.
- Level 1: Memiliki kombinasi gambar 2D dan model 3D sederhana dengan manajemen dokumen terstruktur. Masih terbatas untuk integrasi IoT.
- Level 2: Semua pemangku kepentingan menggunakan model 3D yang terkoordinasi, dengan format data terbuka (IFC) yang memungkinkan integrasi sensor IoT. Level ini direkomendasikan untuk sebagian besar proyek SMKK.
- Level 3: BIM sepenuhnya terintegrasi dan berbasis cloud, memungkinkan *Digital Twin* yang menggabungkan data real-time dari IoT [10], simulasi 4D (jadwal), dan 5D (biaya). Level ini sangat ideal untuk proyek besar dan kompleks dengan kebutuhan pemantauan keselamatan tinggi.

Untuk proyek gedung bertingkat tinggi di Indonesia, Level 2 sudah mencukupi jika dikombinasikan dengan *dashboard* IoT yang mampu menampilkan data keselamatan secara *real-time*. Namun, untuk proyek strategis nasional atau mega-proyek, Level 3 lebih disarankan karena memungkinkan penerapan *predictive safety analytics* [15] dan *digital twin* [10] untuk simulasi risiko.



Gambar 6. Ilustrasi level BIM 0–8 untuk penerapan SMKK berbasis IoT

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dengan studi literatur dan survei kuesioner terhadap 50 responden, diperoleh 73 variabel risiko keselamatan konstruksi. Kategori risiko terbagi menjadi pekerjaan struktur, arsitektur, mekanikal-elektrikal, dan penunjang.

Analisis deskriptif menunjukkan 2 risiko kategori tinggi, 40 risiko sedang, dan 31 risiko rendah. Risiko tinggi didominasi oleh pekerjaan di ketinggian tanpa pengaman memadai dan potensi jatuhnya material dari alat angkat. Berdasarkan hasil analisis data dari RQ1 dan RQ2, diperoleh 73 variabel risiko kecelakaan konstruksi pada proyek gedung bertingkat tinggi pada tahap pelaksanaan. Risiko kecil 31 variabel, risiko sedang 40 variabel, risiko besar 2 variabel.

Integrasi BIM dan IoT dalam penerapan SMKK pada proyek gedung bertingkat tinggi berpotensi meningkatkan efektivitas identifikasi dan pengendalian risiko [9]. BIM memberikan visualisasi yang jelas terhadap potensi bahaya, sedangkan IoT memungkinkan deteksi dan pelaporan instan. Pendekatan ini dapat membantu mengurangi tingkat kecelakaan kerja dan meningkatkan keselamatan di lokasi proyek.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arifuddin, R., Latief, Y., Wibowo, M. A., Nugroho, D. B., Medina, S., & Fadlillah, M. R. (2025). Causality Model in Developing Building Information Modeling-based Audit Using Knowledge Management System for Construction Safety Performance Improvement. *International Journal of Engineering*, 38(8), 1874–1886.
- [2] Arifuddin, R., Tumpu, M., Reskiana, A. S., & Fadlillah, R. (2023). Study of Measuring the Application of Construction Safety Management Systems (CSMS) in Indonesia Using the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 71(3), 354–361.
- [3] Chen, J., & Laokhongthavorn, L. (2024). Exploring the Knowledge System in BIM Technology for Construction Projects. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(9).
- [4] Mahajan, A. G., Mahajan, G., & Narkhede, P. (2023). Integrating BIM with Digital Technology Trends in the Construction Industry. *Library Progress International*, 44(3).

- [5] Putra, W. D., Latief, R. U., & Arifuddin, R. (2025). Conceptual Framework Integration of BIM and IoT Technology in Construction Safety Management Systems. Springer Nature, 280–294.
- [6] Putra, W. D., & Saraswati, R. A. (2023). Analisis Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK). *Journal on Education*, 5(3).
- [7] Sakr, M., & Sadhu, A. (2023). Visualization of Structural Health Monitoring Information Using IoT Integrated with BIM. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(3).
- [8] Wu, W., & Issa, R. R. A. (2012). BIM-enabled Building Commissioning and Handover. *Congress on Computing in Civil Engineering*, 237–244.
- [9] Li, H., Yu, Y., & Huang, T. (2024). Real-time Safety Monitoring in Construction Using Integrated BIM and AI-based IoT Analytics. *Automation in Construction*, 162, 105547.
- [10] Zhang, X., & Su, Y. (2023). Digital Twin and IoT Integration for Predictive Safety Management in High-rise Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(4).
- [11] Ponce, C., & González, V. (2023). Enhancing Construction Safety Using Data-driven BIM–IoT Frameworks. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(2), 145–160.
- [12] Kim, J., & Lee, H. (2024). Adoption Challenges of BIM–IoT Safety Systems in Southeast Asian Construction Projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- [13] Ahmed, M. A., & Rashid, M. (2024). IoT-based Smart Safety Helmet for Fall Detection and Location Tracking in Construction Sites. *Safety Science*, 175, 106314.
- [14] Garcia, J., & Torres, M. (2023). Evaluating the Cost-benefit of BIM-integrated Safety Systems. *Journal of Construction Economics*, 18(1), 22–33.
- [15] Lin, K., & Wang, P. (2024). Machine Learning-enhanced IoT for Proactive Safety Risk Prediction in Construction. *Expert Systems with Applications*, 238, 123456.