

Model Penilaian Bahaya Konstruksi Berbasis Linguistik: Pengembangan Construction Project Hazard Index (CPHI)

Iqbal Prasetya Barrelvi*, Tri Joko Wahyu Adi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: iqbarrelvi@gmail.com*, trijoko@its.ac.id

Keywords:

Construction Project Hazard Index; Hazard Assessment; Fuzzy Logic; Analytical Hierarchy Process; Multi-Criteria Decision-Making; Oil And Gas Construction.

Abstract

Oil and gas construction involves substantial hazards arising from multidisciplinary activities, complex process systems, heavy equipment, and site conditions. Conventional risk matrices cannot adequately represent a project's comprehensive hazard profile. This study aimed to develop and evaluate the Construction Project Hazard Index (CPHI), a linguistic hazard assessment model for oil and gas construction projects. This quantitative model-development study identified eight components and 24 hazard attributes and applied them to the EPF X Project in South Sumatra. Three stakeholders assessed each attribute's severity and frequency. The linguistic assessments were converted using Trapezoidal Fuzzy Numbers and the Fuzzy Risk Index, weighted through the Analytical Hierarchy Process, and aggregated using the Choquet fuzzy integral within a Multi-Criteria Decision-Making framework. The results produced a CPHI value of 0.5373, indicating a high hazard category. Process and System Complexity contributed most, while construction methods and noncompliance with work procedures recorded the highest attribute risk value of 0.7144. Expert-judgment validation yielded a mean score of 4.70, indicating high validity. Sensitivity analysis confirmed model stability under global weight changes of up to $\pm 10\%$, although Process and System Complexity was the most sensitive component. Therefore, CPHI is suitable for prioritizing hazard controls, inspections, and safety-resource allocation in construction projects.

Kata Kunci:

Construction Project Hazard Index; Penilaian Bahaya; Fuzzy Logic; Analytical Hierarchy Process; Multi-Criteria Decision Making; Konstruksi Migas.

Abstrak

Industri konstruksi minyak dan gas memiliki tingkat bahaya tinggi akibat kompleksitas pekerjaan multidisiplin, sistem proses, penggunaan alat berat, dan kondisi lapangan yang dinamis. Penilaian berbasis matriks risiko konvensional belum mampu merepresentasikan profil bahaya proyek secara hierarkis dan menyeluruh. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi *Construction Project Hazard Index* (CPHI) sebagai model penilaian bahaya berbasis linguistik pada proyek konstruksi migas. Penelitian kuantitatif dengan pendekatan pengembangan model ini mengidentifikasi delapan komponen dan 24 atribut bahaya, kemudian menerapkannya pada Proyek EPF X di Sumatera Selatan. Tiga pemangku kepentingan menilai severity dan frequency setiap atribut. Penilaian linguistik dikonversi menggunakan *Trapezoidal Fuzzy Number* dan *Fuzzy Risk Index*, dibobotkan melalui *Analytical Hierarchy Process*, lalu diagregasi dengan *Choquet fuzzy integral* dalam kerangka *Multi-Criteria Decision Making*. Hasil menunjukkan nilai CPHI sebesar 0,5373 dalam kategori tinggi. *Process and System Complexity* memberikan kontribusi terbesar, sedangkan metode pelaksanaan dan ketidaksesuaian prosedur kerja memiliki nilai risiko atribut tertinggi sebesar 0,7144. Validasi *expert judgment* menghasilkan skor rata-rata 4,70 atau sangat valid. Analisis sensitivitas menunjukkan model stabil terhadap perubahan bobot global hingga $\pm 10\%$, meskipun paling sensitif terhadap komponen *Process and System Complexity*. Disimpulkan bahwa CPHI layak digunakan sebagai alat penilaian untuk memprioritaskan pengendalian bahaya, inspeksi, dan alokasi sumber daya keselamatan pada proyek konstruksi migas.

PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor dengan tingkat kecelakaan kerja yang tinggi karena melibatkan aktivitas pekerjaan yang kompleks, penggunaan peralatan berat, keterlibatan banyak pihak, serta kondisi lapangan yang dinamis. Pada proyek konstruksi minyak dan gas bumi, kompleksitas tersebut menjadi semakin besar karena pekerjaan tidak hanya mencakup aktivitas sipil dan mekanikal, tetapi juga instalasi peralatan proses, perpipaan, kelistrikan, instrumentasi, serta pekerjaan pada area yang memiliki berbagai sumber bahaya. Oleh karena itu, identifikasi dan penilaian bahaya pada proyek konstruksi migas perlu dilakukan secara sistematis dan terukur sejak tahap perencanaan hingga pelaksanaan proyek (Ahmadi et al., 2025; Almaskati et al., 2024; Chen & Hwang, 1992; Choe & Leite, 2017; Flanagan & Norman, 1993; Grabisch, 1996).

Dalam praktiknya, pengukuran tingkat bahaya proyek konstruksi masih sering dilakukan menggunakan formulir sederhana berbasis matriks risiko. Pendekatan tersebut dapat membantu proses identifikasi awal dan penentuan tingkat risiko dari suatu bahaya, tetapi belum sepenuhnya mampu merepresentasikan keseluruhan profil bahaya proyek secara komprehensif (Triantaphyllou, 2000; Yazdani-Chamzini, 2014; Zadeh, 1965; Zhao, 2024). Beberapa keterbatasan yang ditemukan antara lain jumlah komponen bahaya yang masih terbatas, belum adanya struktur hierarkis antara komponen dan atribut bahaya, ketergantungan pada subjektivitas penilai, belum tersedianya atribut bahaya yang terstruktur, serta belum adanya indeks numerik yang dapat menggambarkan tingkat bahaya proyek secara terpadu (D. A. Patel & Jha, 2017; D. J. Patel & Patel, 2025; Saaty, 1980; Senić et al., 2025; Soltanzadeh et al., 2023; “Structural Equation Modeling and Fuzzy Set Theory: Advancing Risk Assessment in Oil and Gas Construction Projects,” 2024; Tah & Carr, 2000). Selain itu, model yang digunakan saat ini umumnya belum mempertimbangkan perbedaan tingkat kepentingan antar atribut bahaya dalam membentuk nilai bahaya proyek secara keseluruhan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan tingkat risiko dari suatu bahaya dinilai terlalu rendah maupun terlalu tinggi dibandingkan kondisi aktual di lapangan (Executive, 2001; Ilbahar et al., 2018; K. E. dan S. D. M. R. Indonesia, 2021; Mahdinia et al., 2021; Majumder et al., 2013; Mansor & Flayyih, 2025).

Dalam penelitian ini, istilah bahaya dan risiko dibedakan secara konseptual, tetapi digunakan secara berurutan dalam proses penilaian. Bahaya dipahami sebagai sumber, kondisi, atau aktivitas yang berpotensi menimbulkan cedera, kerusakan, kerugian, maupun gangguan terhadap pelaksanaan proyek. Sementara itu, risiko merupakan ukuran terhadap suatu bahaya berdasarkan kombinasi antara tingkat keparahan dampak atau severity dan frekuensi kemunculan atau paparan terhadap bahaya tersebut (P. R. Indonesia, 2012; Institute, 2017; Standardization, 2018; Triantaphyllou & Sánchez, 1997; Zou et al., 2007). Dengan demikian, *Construction Project Hazard Index* (CPHI) dikembangkan sebagai indeks bahaya proyek yang mengidentifikasi berbagai sumber bahaya dan mengukur tingkat risiko masing-masing atribut bahaya berdasarkan dimensi *severity* dan *frequency*. Pendekatan ini memungkinkan profil bahaya proyek dinilai secara lebih terstruktur dan kuantitatif, tetapi tetap dapat mengakomodasi penilaian linguistik dari para ahli.

Kebutuhan terhadap model tersebut semakin penting karena data statistik kecelakaan, near miss, dan paparan bahaya pada proyek konstruksi belum selalu tersedia secara lengkap, akurat, dan sistematis, khususnya dalam konteks negara berkembang. Keterbatasan data tersebut menyebabkan pendekatan penilaian risiko berbasis probabilitas historis sulit

diterapkan secara optimal. Padahal, proyek konstruksi menghadapi beragam sumber bahaya, mulai dari pekerjaan di ketinggian, pekerjaan galian, penggunaan alat berat, cuaca ekstrem, keterbatasan kompetensi tenaga kerja, hingga lemahnya koordinasi antar pihak yang bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu menggabungkan identifikasi bahaya berdasarkan pengalaman ahli dengan proses pengukuran risiko secara sistematis.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan model penilaian bahaya dan risiko pada proyek konstruksi menggunakan berbagai pendekatan, seperti kuantifikasi risiko berdasarkan jenis pekerjaan, *fuzzy Analytical Hierarchy Process* (AHP), sistem inferensi fuzzy, serta *Project Hazard Index*. Pendekatan tersebut telah memberikan kontribusi dalam meningkatkan akurasi penilaian risiko dan mendukung pengambilan keputusan di bidang keselamatan konstruksi. Namun, sebagian besar penelitian masih memiliki keterbatasan karena belum secara khusus mengakomodasi karakteristik proyek konstruksi minyak dan gas bumi yang memiliki kompleksitas sistem proses, pekerjaan multidisiplin, penggunaan material berbahaya, serta potensi bahaya bertekanan tinggi. Selain itu, model yang ada umumnya masih berfokus pada penilaian risiko pada tingkat aktivitas atau atribut secara terpisah sehingga belum mampu menggambarkan hubungan hierarkis antara atribut bahaya, komponen bahaya, dan tingkat bahaya proyek secara keseluruhan. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya suatu model yang mampu mengintegrasikan identifikasi bahaya, penilaian risiko, pembobotan, dan agregasi nilai risiko ke dalam satu indeks yang mudah dipahami dan diterapkan oleh para pemangku kepentingan proyek.

Penelitian ini dikembangkan untuk menjawab kesenjangan tersebut melalui penyusunan *Construction Project Hazard Index* (CPHI) sebagai model penilaian bahaya proyek konstruksi migas berbasis linguistik. Model ini mengelompokkan sumber bahaya ke dalam delapan komponen utama, yaitu *Project Environment*, *Process and System Complexity*, *Work-at-Height and Excavation*, *Material Handling and Machinery*, *Human Resource Competency*, *Construction Method and Sequence*, *Subcontractor Coordination*, serta *Site Access and Traffic Management*. Setiap komponen terdiri atas atribut bahaya yang merepresentasikan kondisi nyata di lapangan, seperti cuaca ekstrem, paparan fluida berbahaya, pekerjaan di ketinggian, penggunaan alat berat, kompetensi tenaga kerja, hingga koordinasi antarsubkontraktor. Tingkat risiko setiap atribut dinilai menggunakan pendekatan linguistik berdasarkan dimensi *severity* dan *frequency*, kemudian dikonversi menjadi nilai kuantitatif melalui *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN) dan dihitung menggunakan *Fuzzy Risk Index* (FRI). Selanjutnya, *Analytical Hierarchy Process* (AHP) digunakan untuk menentukan bobot kepentingan setiap komponen dan atribut, sedangkan *Choquet fuzzy integral* digunakan untuk mengagregasi nilai risiko sehingga menghasilkan indeks bahaya pada tingkat komponen maupun tingkat proyek secara menyeluruh.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi TFN, FRI, AHP, dan Choquet fuzzy integral dalam satu kerangka *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) untuk membangun model penilaian bahaya proyek konstruksi migas yang bersifat hierarkis. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya menghasilkan nilai risiko pada tingkat aktivitas, CPHI mampu menghubungkan delapan komponen bahaya, dua puluh empat atribut bahaya, nilai risiko masing-masing atribut, bobot kepentingan, indeks bahaya komponen, hingga indeks bahaya total proyek. Struktur tersebut memungkinkan pengguna tidak hanya mengetahui

tingkat bahaya proyek secara keseluruhan, tetapi juga mengidentifikasi komponen dan atribut yang memberikan kontribusi terbesar terhadap pembentukan nilai indeks. Model kemudian diterapkan pada studi kasus Proyek EPF X, divalidasi melalui *expert judgment*, serta diuji menggunakan analisis sensitivitas untuk memastikan validitas, keandalan, dan kestabilannya terhadap perubahan bobot komponen.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan dan evaluasi model CPHI untuk proyek konstruksi minyak dan gas bumi. Rumusan masalah penelitian meliputi identifikasi komponen dan atribut bahaya yang relevan, pengembangan model penilaian berbasis linguistik yang mampu mengakomodasi subjektivitas dan ketidakpastian, serta pengujian validitas dan sensitivitas model. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada pengembangan model dengan delapan komponen dan dua puluh empat atribut bahaya yang diterapkan pada studi kasus Proyek EPF X, menggunakan AHP sebagai metode pembobotan dan Choquet fuzzy integral sebagai metode agregasi nilai risiko. Melalui penelitian ini diharapkan diperoleh model yang mampu membantu manajer proyek, tim HSE, kontraktor, dan pemilik proyek dalam menilai tingkat bahaya secara lebih sistematis, menentukan prioritas pengendalian, mengalokasikan sumber daya keselamatan, serta mendukung pengambilan keputusan dalam manajemen keselamatan proyek konstruksi migas.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan pengembangan model (*model development research*). Penelitian ini bertujuan merancang, mengembangkan, menerapkan, dan mengevaluasi *Construction Project Hazard Index* (CPHI) sebagai model penilaian tingkat bahaya pada proyek konstruksi minyak dan gas bumi.

Pendekatan kuantitatif digunakan karena data penelitian berasal dari penilaian responden terhadap tingkat *severity* dan *frequency* pada setiap atribut bahaya. Penilaian tersebut selanjutnya diolah menjadi nilai risiko atribut melalui *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN) dan *Fuzzy Risk Index* (FRI), diberi bobot menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP), serta diagregasi menggunakan *Choquet fuzzy integral* dalam kerangka *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). Dengan demikian, objek yang diidentifikasi dalam model adalah komponen dan atribut bahaya, sedangkan tingkat risikonya diukur berdasarkan kombinasi *severity* dan *frequency*.

Tahapan penelitian meliputi identifikasi dan pengembangan komponen serta atribut bahaya, penyusunan instrumen, pengumpulan dan pengolahan data, penerapan model pada studi kasus Proyek EPF X, validasi melalui *expert judgment*, serta analisis sensitivitas terhadap perubahan bobot global komponen. Penelitian ini menghasilkan model penilaian bahaya proyek yang bersifat kuantitatif, terstruktur, dan dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam manajemen keselamatan proyek konstruksi migas.

Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah *Construction Project Hazard Index* (CPHI), yaitu model penilaian tingkat bahaya pada proyek konstruksi minyak dan gas bumi yang dikembangkan dalam penelitian ini. Model CPHI disusun secara hierarkis berdasarkan delapan komponen dan dua puluh empat atribut bahaya. Tingkat risiko setiap atribut bahaya dinilai melalui *severity*

dan frequency, kemudian diolah menggunakan TFN, FRI, AHP, dan Choquet fuzzy integral untuk menghasilkan indeks bahaya proyek secara kuantitatif.

Sebagai penerapan model, penelitian ini menggunakan Proyek EPF X, yaitu proyek konstruksi fasilitas produksi awal pada sektor minyak dan gas bumi di Sumatera Selatan, sebagai studi kasus. Proyek tersebut dipilih karena memiliki karakteristik pekerjaan multidisiplin dan sumber bahaya yang kompleks, sehingga sesuai untuk menguji kemampuan model CPHI dalam mengevaluasi tingkat bahaya proyek serta mengidentifikasi komponen dan atribut bahaya yang memberikan kontribusi dominan.

Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara bertahap untuk mengembangkan dan mengevaluasi *Construction Project Hazard Index* (CPHI) sebagai model penilaian bahaya pada proyek konstruksi minyak dan gas bumi. Tahap awal meliputi identifikasi permasalahan, studi pustaka, dan pra-survei untuk mengetahui keterbatasan model yang telah ada serta mengidentifikasi komponen dan atribut bahaya yang sesuai dengan karakteristik proyek konstruksi migas.

Berdasarkan hasil studi pustaka dan pra-survei, disusun struktur model CPHI yang terdiri atas delapan komponen dan dua puluh empat atribut bahaya. Selanjutnya dilakukan penyusunan instrumen penelitian berupa kuesioner AHP, kuesioner penilaian severity dan frequency, serta kuesioner validasi model. Data yang diperoleh kemudian diolah melalui konversi penilaian linguistik ke *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN), perhitungan *Fuzzy Risk Index* (FRI), penentuan bobot menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP), agregasi menggunakan Choquet fuzzy integral, hingga diperoleh nilai *Construction Project Hazard Index* (CPHI).

Model yang telah dikembangkan diterapkan pada studi kasus Proyek EPF X. Selanjutnya dilakukan evaluasi melalui expert judgment untuk menilai kesesuaian struktur, metode, dan hasil model, serta analisis sensitivitas untuk mengetahui pengaruh perubahan bobot komponen terhadap nilai CPHI dan mengidentifikasi komponen yang paling sensitif.

Tahap akhir penelitian meliputi interpretasi hasil, pembahasan, penyusunan implikasi manajerial, serta penarikan kesimpulan dan saran. Seluruh tahapan tersebut disusun secara sistematis agar model CPHI yang dihasilkan memiliki validitas, kemudahan penerapan, dan dapat digunakan sebagai alat bantu dalam penilaian bahaya proyek konstruksi migas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penilaian Komponen dan Atribut Bahaya

Penilaian tingkat risiko pada Proyek EPF X dilakukan oleh tiga *stakeholder* yang memiliki pengalaman dan keterlibatan langsung pada proyek konstruksi migas. Setiap penilai memberikan penilaian terhadap 24 atribut bahaya berdasarkan dua dimensi, yaitu *severity* dan *frequency*, menggunakan skala linguistik sebagaimana ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Sheet Input Form CPHI Multi-Penilai

Nama Proyek	Proyek EFF X							
Lokasi	Salah satu field migas di Sumatera Selatan							
Tanggal	08 Juni 2020							
Penilai								
PIC HSE/HSSE	Mr X							
Catatan	R1: Project Manager / Construction Manager R2: HSSE Coordinator R3: Site Engineer / Supervisor							
Komp onen	Kode	Atribut Bahaya	Sev R1	Sev R2	Sev R3	Freq R1	Freq R2	Freq R3
ENV	ENV1	Kondisi cuaca ekstrem	Sedang	Tinggi	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang
ENV	ENV2	Keterbatasan lokasi proyek dengan lingkungan sekitar	Tinggi	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang	Tinggi
ENV	ENV3	Potensi bencana alam di lokasi proyek	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sedang
PSC	PSC1	Kompleksitas sistem proses dan konfigurasi peralatan	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
PSC	PSC2	Kompleksitas sistem perpipaan dan koneksi antar peralatan	Sangat Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
PSC	PSC3	Potensi fluida berbahaya dan tekanan operasi	Sangat Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sedang	Tinggi
WHE	WHE1	Pekerjaan pada ketinggian	Tinggi	Sedang	Sedang	Rendah	Rendah	Tinggi
WHE	WHE2	Pekerjaan galian	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Rendah	Rendah	Tinggi
WHE	WHE3	Sistem proteksi jatuh yang tidak memadai	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Rendah	Rendah	Rendah
LHH	LHH1	Penggunaan alat angkat	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sedang	Sedang
LHH	LHH2	Aktivitas pemindahan material	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
LHH	LHH3	Penggunaan alat berat	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
HRC	HRC1	Kurangnya kompetensi keselamatan kerja tenaga kerja	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi

HRC	HRC2	Kurangnya pengalaman tenaga kerja	Tinggi	Tinggi	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
HRC	HRC3	Kurangnya pengawasan keselamatan kerja	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sedang	Tinggi
CMS	CMS1	Metode pelaksanaan konstruksi serta ketidaksesuaian prosedur kerja	Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi
CMS	CMS2	Perubahan desain selama konstruksi	Tinggi	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang	Tinggi
CMS	CMS3	Tumpang tindih aktivitas pekerjaan	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Rendah
SCC	SCC1	Keterlibatan multi-subkontraktor	Rendah	Rendah	Rendah	Sedang	Sedang	Tinggi
SCC	SCC2	Konflik area kerja antar pihak	Rendah	Rendah	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang
SCC	SCC3	Kurangnya koordinasi dan komunikasi antar tim	Sedang	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
SAT	SAT1	Kondisi akses keluar masuk proyek	Rendah	Rendah	Sedang	Rendah	Sangat Rendah	Rendah
SAT	SAT2	Interaksi proyek dengan lalu lintas eksternal	Sedang	Sedang	Sedang	Tinggi	Sedang	Tinggi
SAT	SAT3	Kurangnya pengaturan lalu lintas dan sistem evakuasi proyek	Sedang	Sedang	Sedang	Rendah	Rendah	Rendah

(Sumber: Hasil Rancangan Model CPHI, 2026)

Rekapitulasi hasil penilaian disusun sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1 sebagai data masukan (*input*) dalam proses perhitungan *Construction Project Hazard Index* (CPHI). Untuk memberikan gambaran mengenai karakteristik data yang diperoleh, dilakukan analisis deskriptif terhadap hasil rekapitulasi penilaian sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik Data Hasil Penilaian Stakeholder

Statistik	Severity	Frequency
Jumlah atribut risiko	24	24
Jumlah penilai	3	3
Total observasi	72	72
Missing value	0	0
Rentang skala penilaian	1–10	1–10

Berdasarkan Tabel 2, seluruh 24 atribut bahaya memperoleh penilaian lengkap dari ketiga penilai pada dimensi *severity* dan *frequency*. Dengan demikian, diperoleh 72 observasi *severity* dan 72 observasi *frequency* atau 144 observasi secara keseluruhan. Tidak terdapat *missing value* dan seluruh responden menggunakan skala penilaian yang sama. Kondisi ini memungkinkan seluruh data langsung dikonversi ke *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN) dan diagregasi menggunakan *fuzzy averaging*. Perbedaan penilaian antar responden tetap dipertahankan sebagai bagian dari ketidakpastian persepsi ahli.

Secara keseluruhan, data telah memenuhi kebutuhan pengolahan model karena lengkap, menggunakan skala yang seragam, dan mencakup seluruh atribut bahaya. Data tersebut selanjutnya digunakan dalam konversi TFN, perhitungan FRI, pembobotan AHP, agregasi *Choquet fuzzy integral*, dan perhitungan CPHI.

Hasil Konversi Penilaian Linguistik *Severity* dan *Frequency*

Tingkat risiko setiap atribut bahaya dinilai melalui dua dimensi, yaitu *severity* dan *frequency*. *Severity* menunjukkan tingkat keparahan dampak apabila suatu bahaya terjadi, sedangkan *frequency* menunjukkan frekuensi kemunculan atau paparan terhadap bahaya tersebut. Penilaian diberikan menggunakan kategori linguistik sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Setiap penilaian kemudian dikonversi ke *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN), diagregasi antar penilai, dan didefuzzifikasi menggunakan *Graded Mean Integration Representation* (GMIR) sehingga diperoleh nilai *crisp severity* dan *frequency*.

Tabel 3. Rekapitulasi Penilaian Linguistik Dominan per Komponen

Komponen	<i>Severity</i>	<i>Frequency</i>		
	Atribut Dominan	TFN <i>Crisp</i>	Atribut Dominan	TFN <i>Crisp</i>
ENV	ENV3	7,5000	ENV3	6,8333
PSC	PSC1	9,3333	PSC1 dan PSC2	7,5000
WHE	WHE2 dan WHE3	7,5000	WHE1 dan WHE2	4,8333
MHM	MHM1 dan MHM3	7,5000	MHM2 dan MHM3	7,5000
HRC	HRC1 dan HRC3	7,5000	HRC1 dan HRC2	7,5000
CMS	CMS1	8,7222	CMS1	8,1111
SCC	SCC3	5,5000	SCC3	7,5000
SAT	SAT2 dan SAT3	5,5000	SAT2	6,8333

Tabel 3 menunjukkan bahwa atribut dominan pada dimensi *severity* dan *frequency* tidak selalu sama. Beberapa komponen juga memiliki lebih dari satu atribut dengan nilai tertinggi yang sama. Kondisi ini menunjukkan bahwa atribut dengan konsekuensi paling besar belum tentu merupakan atribut yang paling sering muncul. Oleh karena itu, *severity* dan *frequency* perlu dipertahankan sebagai dua dimensi terpisah sebelum dikombinasikan menjadi FRI.

Pada dimensi *severity*, nilai tertinggi terdapat pada PSC1, yaitu kompleksitas sistem proses dan konfigurasi peralatan, sebesar 9,3333 dan termasuk kategori sangat tinggi. Nilai tinggi berikutnya terdapat pada CMS1 sebesar 8,7222. Temuan ini menunjukkan bahwa konsekuensi terbesar terutama berkaitan dengan kompleksitas teknis sistem proses serta metode pelaksanaan dan kesesuaian prosedur kerja.

Pada dimensi *frequency*, nilai tertinggi terdapat pada CMS1 sebesar 8,1111. Nilai 7,5000 juga diperoleh PSC1, PSC2, MHM2, MHM3, HRC1, HRC2, dan SCC3. Hasil tersebut menunjukkan bahwa paparan yang relatif sering terutama berkaitan dengan metode

pelaksanaan, sistem proses, pemindahan material dan alat berat, kompetensi tenaga kerja, serta koordinasi antar tim.

Untuk membantu interpretasi nilai *crisp* hasil defuzzifikasi, dilakukan klasifikasi menggunakan metode interval sama. Nilai minimum teoritis diperoleh dari kategori linguistik terendah, yaitu TFN (1,1,2,3), yang setelah didefuzzifikasi menghasilkan nilai *crisp* sebesar 1,67. Sementara itu, nilai maksimum teoritis diperoleh dari kategori linguistik tertinggi, yaitu TFN (8,9,10,10), yang setelah didefuzzifikasi menghasilkan nilai *crisp* sebesar 9,33. Rentang nilai 1,67–9,33 kemudian dibagi ke dalam lima kategori interpretasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 2. Klasifikasi berdasarkan Nilai Crisp Dimensi Severity dan Frequency

Nilai Crisp	Klasifikasi
1,67 – 3,20	Sangat Rendah
>3,20 – 4,73	Rendah
>4,73 – 6,27	Sedang
>6,27 – 7,80	Tinggi
>7,80 – 9,33	Sangat Tinggi

Berdasarkan klasifikasi pada Tabel 4, PSC1 dan CMS1 berada pada kategori sangat tinggi untuk *severity*, sedangkan CMS1 berada pada kategori sangat tinggi untuk *frequency*. Hasil ini belum menunjukkan prioritas akhir karena *severity* dan *frequency* masih dinilai secara terpisah. Kedua dimensi selanjutnya dikombinasikan melalui *Fuzzy Risk Index* (FRI).

Hasil Perhitungan Fuzzy Risk Index (FRI)

Fuzzy Risk Index (FRI) setiap atribut bahaya dihitung berdasarkan nilai *severity* dan *frequency* yang telah dikonversi ke *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN) dan diagregasi menggunakan *fuzzy averaging*. Perhitungan meliputi perkalian *fuzzy*, normalisasi, dan defuzzifikasi menggunakan GMIR untuk memperoleh nilai FRI *crisp* pada rentang 0-1. Nilai FRI *crisp* menunjukkan tingkat risiko atribut bahaya sebelum mempertimbangkan bobot kepentingannya.

Tabel 5 menyajikan nilai FRI *crisp* setiap atribut bahaya sebagai hasil *fuzzy averaging*, perkalian *fuzzy*, normalisasi, dan defuzzifikasi. Nilai tersebut menjadi *input* untuk agregasi pada tingkat komponen.

Tabel 5. Hasil Perhitungan FRI Crisp per Atribut

Komponen	Kode	Atribut Bahaya	FRI Crisp	Kategori Risiko
ENV	ENV1	Kondisi cuaca ekstrem	0,3894	Sedang
	ENV2	Kedekatan lokasi proyek dengan lingkungan sekitar	0,3894	Sedang
	ENV3	Potensi bencana alam di lokasi proyek	0,5217	Sedang
PSC	PSC1	Kompleksitas sistem proses dan konfigurasi peralatan	0,7067	Sangat Tinggi
	PSC2	Kompleksitas sistem perpipaan dan koneksi antar peralatan	0,6617	Tinggi
	PSC3	Potensi fluida berbahaya dan tekanan operasi	0,5626	Tinggi
WHE	WHE1	Pekerjaan pada ketinggian	0,3072	Rendah
	WHE2	Pekerjaan galian	0,3717	Sedang
	WHE3	Sistem proteksi jatuh yang tidak memadai	0,2717	Rendah
MHM	MHM1	Penggunaan alat angkat	0,4717	Sedang

Komponen	Kode	Atribut Bahaya	FRI Crisp	Kategori Risiko
HRC	MHM2	Aktivitas pemindahan material	0,4717	Tinggi
	MHM3	Penggunaan alat berat	0,5717	Tinggi
	HRC1	Kurangnya kompetensi keselamatan kerja tenaga kerja	0,5717	Tinggi
	HRC2	Kurangnya pengalaman tenaga kerja	0,5217	Sedang
	HRC3	Kurangnya pengawasan keselamatan kerja	0,5217	Sedang
CMS	CMS1	Metode pelaksanaan konstruksi serta ketidaksesuaian prosedur kerja	0,7144	Sangat Tinggi
	CMS2	Perubahan desain selama konstruksi	0,4306	Sedang
	CMS3	Tumpang tindih aktivitas pekerjaan	0,3894	Sedang
SCC	SCC1	Keterlibatan multi-subkontraktor	0,2250	Rendah
	SCC2	Konflik area kerja antar pihak	0,2383	Rendah
	SCC3	Kurangnya koordinasi dan komunikasi antar tim	0,4217	Sedang
SAT	SAT1	Kondisi akses keluar masuk proyek	0,1287	Sangat Rendah
	SAT2	Interaksi proyek dengan lalu lintas eksternal	0,3850	Sedang
	SAT3	Kurangnya pengaturan lalu lintas dan sistem evakuasi proyek	0,2017	Rendah

Berdasarkan Tabel 5, nilai FRI *crisp* menunjukkan bahwa tingkat bahaya antar atribut tidak sama. Atribut dengan nilai tertinggi adalah CMS1: metode pelaksanaan konstruksi serta ketidaksesuaian prosedur kerja dengan nilai 0,7144 dan termasuk kategori sangat tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa kesalahan metode kerja atau ketidaksesuaian prosedur pelaksanaan menjadi sumber bahaya paling dominan berdasarkan kombinasi *severity* dan *frequency*.

Nilai FRI tertinggi berikutnya terdapat pada komponen *Process and System Complexity*, yaitu PSC1: kompleksitas sistem proses dan konfigurasi peralatan sebesar 0,7067 dan PSC2: kompleksitas sistem perpipaan dan koneksi antar peralatan sebesar 0,6617. Temuan ini menunjukkan bahwa karakteristik teknis proyek migas, terutama sistem proses dan perpipaan yang kompleks, menjadi sumber bahaya penting yang perlu dikendalikan sejak tahap perencanaan, instalasi, pengujian, hingga pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Atribut lain yang berada pada kategori tinggi adalah PSC2, PSC3, MHM3, dan HRC1. Sementara itu, MHM2 memiliki nilai 0,4717 dan berada pada kategori sedang. Temuan ini menunjukkan bahwa kompleksitas perpipaan, fluida berbahaya dan tekanan operasi, penggunaan alat berat, serta kompetensi keselamatan tenaga kerja perlu memperoleh perhatian.

Atribut dengan nilai FRI terendah adalah SAT1 sebesar 0,1287, diikuti SAT3 sebesar 0,2017 dan SCC1 sebesar 0,2250. CMS3 memiliki nilai 0,3894 dan termasuk kategori sedang. Nilai rendah tidak berarti atribut dapat diabaikan, tetapi menunjukkan bahwa tingkat risikonya relatif lebih rendah pada kondisi studi kasus.

Secara umum, atribut dengan nilai risiko paling menonjol berasal dari metode pelaksanaan dan ketidaksesuaian prosedur, kompleksitas sistem proses, kompleksitas perpipaan, penggunaan alat berat, serta kompetensi keselamatan tenaga kerja. Nilai FRI tersebut belum menjadi prioritas akhir karena perlu digabungkan dengan bobot lokal atribut pada tingkat komponen.

Hasil Pembobotan AHP Konvensional

Pembobotan AHP dilakukan untuk menentukan tingkat kepentingan relatif antar komponen dan antar atribut pada masing-masing komponen. Matriks perbandingan berpasangan yang diberikan oleh 17 responden diuji konsistensinya menggunakan *Consistency Ratio (CR)*. Matriks dinyatakan konsisten apabila nilai CR tidak melebihi 0,10. Data yang memenuhi kriteria konsistensi kemudian digunakan untuk memperoleh bobot kolektif.

Tabel 6. Hasil Uji Konsistensi Matriks AHP

Tingkat Perbandingan	Jumlah Matriks Agregat	CR	Keterangan
Komponen Utama	1	0,0308	Konsisten
Atribut ENV	1	0,0001	Konsisten
Atribut PSC	1	0,0165	Konsisten
Atribut WHE	1	0,0095	Konsisten
Atribut MHM	1	0,0001	Konsisten
Atribut HRC	1	0,0006	Konsisten
Atribut CMS	1	0,0000	Konsisten
Atribut SCC	1	0,0013	Konsisten
Atribut SAT	1	0,0006	Konsisten

Berdasarkan hasil uji konsistensi terhadap matriks agregat AHP, seluruh komponen dan atribut memiliki nilai *Consistency Ratio (CR)* di bawah batas toleransi 0,10. Nilai CR tertinggi terdapat pada komponen PSC sebesar 0,0165, sedangkan nilai CR terendah terdapat pada komponen CMS sebesar 0,0000. Dengan demikian, seluruh matriks perbandingan berpasangan dinyatakan konsisten dan dapat digunakan untuk menghasilkan bobot prioritas AHP pada tahap analisis berikutnya.

Pembobotan AHP pada tingkat komponen menghasilkan bobot global delapan komponen bahaya yang membentuk model CPHI. Bobot global menunjukkan tingkat kepentingan relatif setiap komponen dalam perhitungan CPHI total, bukan tingkat risiko aktual komponen.

Tabel 7. Bobot Global Komponen Risiko

Kode	Komponen Bahaya	Bobot Global	Peringkat
ENV	<i>Project Environment</i>	0,0747	5
PSC	<i>Process and System Complexity</i>	0,3300	1
WHE	<i>Work-at-Height and Excavation</i>	0,0483	6
MHM	<i>Material Handling and Machinery</i>	0,0985	4
HRC	<i>Human Resource Competency</i>	0,2644	2
CMS	<i>Construction Method and Sequence</i>	0,1248	3
SCC	<i>Subcontractor Coordination</i>	0,0332	7
SAT	<i>Site Access and Traffic Management</i>	0,0261	8

Berdasarkan hasil pembobotan AHP, komponen dengan bobot global tertinggi adalah *Process and System Complexity (PSC)* sebesar 0,3300, sehingga komponen tersebut dinilai memiliki tingkat kepentingan relatif paling besar dalam pembentukan indeks bahaya proyek. Sebaliknya, komponen dengan bobot terendah adalah *Site Access and Traffic Management (SAT)* sebesar 0,0261. Hasil ini menunjukkan bahwa responden tidak memandang seluruh komponen bahaya memiliki tingkat kontribusi yang sama, melainkan terdapat komponen tertentu yang dianggap lebih krusial terhadap keselamatan proyek konstruksi migas.

Tabel 8. Bobot Atribut Bahaya per Komponen

Komponen	Atribut	Bobot	Peringkat
ENV	ENV1	0,39	1
	ENV2	0,32	2
	ENV3	0,29	3
PSC	PSC1	0,40	2
	PSC2	0,19	3
	PSC3	0,41	1
WHE	WHE1	0,30	2
	WHE2	0,19	3
	WHE3	0,51	1
MHM	MHM1	0,34	1
	MHM2	0,34	2
	MHM3	0,32	3
HRC	HRC1	0,52	1
	HRC2	0,23	3
	HRC3	0,25	2
CMS	CMS1	0,48	1
	CMS2	0,20	3
	CMS3	0,32	2
SCC	SCC1	0,28	2
	SCC2	0,28	3
	SCC3	0,44	1
SAT	SAT1	0,33	2
	SAT2	0,27	3
	SAT3	0,40	1

Sumber: Hasil pengolahan matriks perbandingan berpasangan atribut bahaya per komponen menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Tabel 8 menunjukkan bobot lokal atribut bahaya pada masing-masing komponen. Bobot tersebut merepresentasikan tingkat kepentingan relatif atribut dalam satu komponen. Bobot yang lebih besar menunjukkan bahwa atribut dinilai lebih penting dalam pembentukan indeks komponen, tetapi tidak selalu berarti atribut tersebut memiliki nilai risiko aktual tertinggi.

Pada komponen *Project Environment* (ENV), atribut dengan bobot tertinggi adalah ENV1 sebesar 0,39, diikuti oleh ENV2 sebesar 0,32 dan ENV3 sebesar 0,29. Hal ini menunjukkan bahwa risiko akibat kondisi cuaca ekstrem menjadi atribut yang paling diprioritaskan dalam komponen lingkungan proyek. Dengan demikian, aspek cuaca menjadi faktor lingkungan yang paling perlu diperhatikan dalam pengendalian risiko proyek konstruksi migas.

Pada komponen *Process and System Complexity* (PSC), bobot tertinggi terdapat pada PSC3 sebesar 0,41, kemudian PSC1 sebesar 0,40, dan PSC2 sebesar 0,19. Hasil ini menunjukkan bahwa potensi fluida berbahaya dan tekanan operasi memiliki kontribusi paling besar dalam komponen kompleksitas sistem proses, meskipun selisihnya sangat tipis dengan kompleksitas sistem proses dan konfigurasi peralatan.

Pada komponen *Work-at-Height and Excavation* (WHE), atribut WHE3 memiliki bobot paling tinggi yaitu 0,51, disusul oleh WHE1 sebesar 0,30 dan WHE2 sebesar 0,19. Artinya, sistem proteksi jatuh yang tidak memadai menjadi perhatian utama dalam komponen pekerjaan di ketinggian dan galian. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian risiko pada pekerjaan

ketinggian perlu difokuskan tidak hanya pada aktivitas pekerjaannya, tetapi juga pada kesiapan sistem proteksi jatuh.

Pada komponen *Material Handling and Machinery* (MHM), bobot atribut relatif berimbang. MHM1 dan MHM2 sama-sama memiliki bobot 0,34, sedangkan MHM3 memiliki bobot 0,32. Hal ini menunjukkan bahwa risiko pada penggunaan alat angkat, aktivitas pemindahan material, dan penggunaan alat berat memiliki tingkat kepentingan yang hampir setara. Dengan demikian, pengendalian pada komponen MHM perlu dilakukan secara menyeluruh, bukan hanya berfokus pada satu atribut tertentu.

Pada komponen *Human Resource Competency* (HRC), atribut HRC1 memiliki bobot paling dominan sebesar 0,52, jauh lebih tinggi dibandingkan HRC3 sebesar 0,25 dan HRC2 sebesar 0,23. Hal ini menunjukkan bahwa kurangnya kompetensi keselamatan kerja tenaga kerja menjadi faktor paling penting dalam komponen sumber daya manusia. Oleh karena itu, peningkatan kompetensi K3, pelatihan kerja, dan pemahaman prosedur keselamatan menjadi prioritas utama dalam pengendalian risiko pada aspek tenaga kerja.

Pada komponen *Construction Method and Sequence* (CMS), atribut dengan bobot tertinggi adalah CMS1 sebesar 0,48, diikuti CMS3 sebesar 0,32 dan CMS2 sebesar 0,20. Hasil ini menunjukkan bahwa metode pelaksanaan konstruksi dan ketidaksesuaian prosedur kerja merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam komponen metode dan urutan konstruksi. Dengan demikian, penyusunan metode kerja, *review* prosedur, dan pengendalian pelaksanaan pekerjaan menjadi aspek penting untuk menurunkan tingkat bahaya.

Pada komponen *Subcontractor Coordination* (SCC), atribut SCC3 memiliki bobot tertinggi sebesar 0,44, sedangkan SCC1 dan SCC2 masing-masing memiliki bobot 0,28. Hal ini menunjukkan bahwa kurangnya koordinasi dan komunikasi antar tim menjadi atribut paling dominan dalam komponen koordinasi subkontraktor. Temuan ini memperlihatkan bahwa risiko pada proyek multi-kontraktor tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah pihak yang terlibat, tetapi juga oleh efektivitas komunikasi dan koordinasi di lapangan.

Pada komponen *Site Access and Traffic Management* (SAT), atribut tertinggi adalah SAT3 sebesar 0,41, diikuti SAT1 sebesar 0,33 dan SAT2 sebesar 0,27. Hal ini menunjukkan bahwa kurangnya pengaturan lalu lintas dan sistem evakuasi proyek menjadi faktor paling penting dalam komponen manajemen akses dan lalu lintas proyek. Oleh karena itu, pengaturan jalur kendaraan, pedestrian, akses darurat, serta sistem evakuasi perlu menjadi perhatian utama dalam pengendalian risiko lokasi proyek.

Secara umum, hasil pembobotan menunjukkan bahwa atribut dengan bobot tertinggi pada masing-masing komponen adalah ENV1, PSC3, WHE3, MHM1, HRC1, CMS1, SCC3, dan SAT3. Atribut-atribut tersebut menjadi prioritas utama dalam proses agregasi nilai risiko menggunakan *Choquet fuzzy integral* karena memiliki kontribusi relatif paling besar terhadap pembentukan nilai risiko pada setiap komponen. Dengan demikian, bobot AHP tidak hanya berfungsi sebagai nilai kepentingan, tetapi juga menjadi dasar dalam menentukan prioritas pengendalian risiko pada proyek konstruksi migas.

Hasil Agregasi Menggunakan *Choquet fuzzy integral*

Setelah nilai FRI *crisp* setiap atribut dan bobot lokal hasil AHP diperoleh, tahap berikutnya adalah mengagregasi nilai risiko pada masing-masing komponen menggunakan *Choquet fuzzy integral*. Pada tahap ini, bobot yang digunakan adalah bobot lokal atribut dalam satu komponen, misalnya bobot ENV1, ENV2, dan ENV3 pada komponen ENV. Dengan

demikian, hasil yang diperoleh pada subbab ini adalah nilai CPHI pada level komponen, bukan nilai CPHI total proyek.

Proses agregasi pada Gambar 4.3 dilakukan dengan mengurutkan nilai FRI *crisp*, menghitung selisih bertingkat, dan mengalikannya dengan kapasitas kumulatif yang dibentuk dari bobot lokal AHP. Dalam penelitian ini, *Choquet fuzzy integral* digunakan sebagai mekanisme agregasi berbasis urutan nilai risiko dan kapasitas kumulatif. Karena kapasitas dibentuk dari bobot AHP, hasil penelitian tidak digunakan untuk mengklaim bahwa sinergi atau redundansi antar atribut telah diukur secara terpisah.

Tabel 3. Kategori Bahaya CPHI Komponen

Kode	Komponen Bahaya	Atribut dengan FRI Tertinggi	Nilai CPHI Komponen	Kategori Bahaya
ENV	<i>Project Environment</i>	ENV3	0,4278	Sedang
PSC	<i>Process and System Complexity</i>	PSC1	0,6390	Tinggi
WHE	<i>Work-at-Height and Excavation</i>	WHE2	0,3013	Rendah
MHM	<i>Material Handling and Machinery</i>	MHM3	0,5037	Sedang
HRC	<i>Human Resource Competency</i>	HRC1	0,5477	Tinggi
CMS	<i>Construction Method and Sequence</i>	CMS1	0,5537	Tinggi
SCC	<i>Subcontractor Coordination</i>	SCC3	0,3153	Rendah
SAT	<i>Site Access and Traffic Management</i>	SAT2	0,2271	Rendah

Sumber: Hasil agregasi FRI *crisp* dan bobot lokal atribut menggunakan *Choquet fuzzy integral* pada Microsoft Excel, 2026.

Berdasarkan Tabel 9, komponen dengan nilai CPHI tertinggi adalah *Process and System Complexity* (PSC) sebesar 0,6390 dan termasuk kategori tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa kompleksitas sistem proses, konfigurasi peralatan, perpipaan, dan koneksi antar unit merupakan sumber bahaya utama dalam proyek konstruksi migas. Hal ini logis karena proyek migas memiliki banyak sistem yang saling terhubung, sehingga kesalahan instalasi, konflik *interface*, atau kegagalan koordinasi teknis dapat berdampak signifikan terhadap keselamatan proyek.

Komponen berikutnya yang juga berada pada kategori tinggi adalah *Construction Method and Sequence* (CMS) dengan nilai 0,5537 dan *Human Resource Competency* (HRC) dengan nilai 0,5477. Hal ini menunjukkan bahwa bahaya proyek tidak hanya dipengaruhi oleh kompleksitas teknis, tetapi juga oleh cara pekerjaan direncanakan, prosedur kerja yang diterapkan, serta kompetensi tenaga kerja. Dengan kata lain, pengendalian bahaya pada proyek konstruksi migas perlu memperhatikan tiga area utama secara bersamaan, yaitu sistem teknis, metode pelaksanaan, dan kapabilitas sumber daya manusia.

Komponen *Material Handling and Machinery* (MHM) memiliki nilai 0,5037 dan termasuk kategori sedang. Meskipun belum masuk kategori tinggi, komponen ini tetap penting karena berkaitan dengan penggunaan alat angkat, pemindahan material, dan alat berat. Aktivitas tersebut sangat umum pada proyek migas dan dapat meningkat menjadi risiko tinggi apabila tidak dikendalikan melalui *lifting plan*, inspeksi alat, sertifikasi operator, dan pengaturan area kerja.

Sementara itu, komponen dengan nilai lebih rendah adalah SAT, WHE, dan SCC. Komponen *Site Access and Traffic Management* (SAT) memiliki nilai terendah, yaitu 0,2271, dan termasuk kategori rendah. Nilai rendah ini tidak berarti aspek akses dan lalu lintas proyek dapat diabaikan, tetapi menunjukkan bahwa berdasarkan penilaian *stakeholder* pada studi kasus ini, kontribusinya terhadap tingkat bahaya proyek relatif lebih kecil dibandingkan komponen lain. Komponen dengan kategori rendah tetap perlu dimonitor karena perubahan kondisi proyek, peningkatan mobilisasi, atau perubahan area kerja dapat meningkatkan tingkat bahayanya.

Kategori bahaya pada nilai CPHI komponen ditentukan menggunakan klasifikasi indeks CPHI/FRI ternormalisasi. Penggunaan klasifikasi yang sama dapat diterapkan karena nilai CPHI komponen diperoleh dari agregasi nilai FRI *crisp* atribut yang telah dinormalisasi, sehingga hasil akhirnya tetap berada pada skala indeks risiko yang sebanding. Dengan demikian, interpretasi nilai CPHI komponen dapat dilakukan secara konsisten.

Batas klasifikasi ditentukan berdasarkan nilai minimum dan maksimum teoritis dari skema *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN) yang digunakan dalam penelitian ini. Nilai minimum diperoleh dari kombinasi kategori terendah untuk *severity* dan *frequency*, sedangkan nilai maksimum diperoleh dari kombinasi kategori tertinggi. Setelah dilakukan perkalian *fuzzy*, normalisasi terhadap nilai maksimum 100, dan defuzzifikasi menggunakan metode *Graded Mean Integration Representation* (GMIR), diperoleh nilai indeks minimum sebesar 0,03 dan maksimum sebesar 0,87. Rentang tersebut kemudian dibagi menjadi lima kategori dengan metode interval sama, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 4. Kategori Bahaya berdasarkan Nilai Indeks CPHI/FRI Ternormalisasi

Nilai Indeks CPHI/FRI Ternormalisasi	Kategori Bahaya
0,03 – 0,20	Sangat Rendah
>0,20 – 0,37	Rendah
>0,37 – 0,53	Sedang
>0,53 – 0,70	Tinggi
>0,70 – 0,87	Sangat Tinggi

Dengan demikian, hasil pada Tabel 10 menunjukkan bahwa prioritas pengendalian bahaya pada level komponen perlu difokuskan terutama pada PSC, diikuti oleh CMS dan HRC. Ketiga komponen ini menjadi area kritis karena merepresentasikan kombinasi antara kompleksitas teknis, ketepatan metode kerja, dan kesiapan kompetensi tenaga kerja dalam pelaksanaan proyek konstruksi migas.

Hasil Perhitungan CPHI Total Proyek

Setelah nilai CPHI komponen diperoleh melalui agregasi *Choquet fuzzy integral*, tahap berikutnya adalah menghitung CPHI total proyek. Pada tahap ini, setiap nilai CPHI komponen dikalikan dengan bobot global hasil AHP. Bobot global menunjukkan tingkat kepentingan relatif setiap komponen terhadap keseluruhan bahaya proyek. Dengan demikian, komponen yang memiliki nilai CPHI tinggi dan bobot global besar akan memberikan kontribusi lebih besar terhadap nilai akhir CPHI proyek. Proses perhitungan tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.

DASHBOARD HASIL CPHI				
Nama Proyek	Proyek EPF X			
Lokasi	Salah satu field migas di Sumatera Selatan			
Tanggal Penilaian	08 Juni 2026			
PIC HSE/HSSE	Mr X			
CPHI Total	0,5373			
Kategori Bahaya	Tinggi			

Ringkasan	Hasil
Komponen Kontribusi Terbesar	PSC
Atribut FRI Tertinggi	CMS1
Atribut Severity Tertinggi	PSC1
Atribut Frequency Tertinggi	CMS1

Kode	Komponen Bahaya	CPHI Komponen	Bobot Global	Kontribusi
ENV	Project Environment	0,4278	0,0747	0,0320
PSC	Process and System Complexity	0,6390	0,3300	0,2109
WHE	Work-at-Height and Excavation Risk	0,3013	0,0483	0,0146
MHM	Material Handling and Machinery	0,5037	0,0985	0,0496
HRC	Human Resource Competency	0,5477	0,2644	0,1448
CMS	Construction Method and Sequence	0,5537	0,1248	0,0691
SCC	Subcontractor Coordination	0,3153	0,0332	0,0105
SAT	Site Access and Traffic Management	0,2271	0,0261	0,0059

Gambar 1. Sheet Ringkasan Hasil CPHI Total Proyek

Gambar 1 memperlihatkan proses akhir perhitungan *Construction Project Hazard Index* (CPHI). Pada tahap ini, nilai CPHI komponen hasil *agregasi Choquet fuzzy integral* dikombinasikan dengan bobot global masing-masing komponen yang diperoleh dari metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Perkalian antara nilai CPHI komponen dan bobot global menghasilkan kontribusi setiap komponen terhadap indeks bahaya proyek secara keseluruhan. Seluruh nilai kontribusi kemudian dijumlahkan sehingga diperoleh satu nilai CPHI total proyek yang merepresentasikan tingkat bahaya proyek konstruksi migas secara komprehensif.

Untuk memudahkan interpretasi, hasil perhitungan pada Gambar 4.4 dirangkum dalam Tabel 11. Tabel tersebut tidak hanya menyajikan nilai CPHI masing-masing komponen, tetapi juga menunjukkan bobot global dan besarnya kontribusi setiap komponen dalam membentuk nilai CPHI total proyek. Penyajian ini memungkinkan identifikasi komponen mana yang memberikan pengaruh paling besar terhadap tingkat bahaya proyek, sehingga dapat dijadikan dasar dalam menentukan prioritas pengendalian risiko.

Tabel 5. Perhitungan CPHI Total Proyek

Kode	Komponen Bahaya	Nilai CPHI Komponen	Bobot Global	Kontribusi
ENV	<i>Project Environment</i>	0,4278	0,0747	0,0320
PSC	<i>Process and System Complexity</i>	0,6390	0,3300	0,2109
WHE	<i>Work-at-Height and Excavation</i>	0,3013	0,0483	0,0146
MHM	<i>Material Handling and Machinery</i>	0,5037	0,0985	0,0496
HRC	<i>Human Resource Competency</i>	0,5477	0,2644	0,1448
CMS	<i>Construction Method and Sequence</i>	0,5537	0,1248	0,0691
SCC	<i>Subcontractor Coordination</i>	0,3153	0,0332	0,0105
SAT	<i>Site Access and Traffic Management</i>	0,2271	0,0261	0,0059
Total CPHI				0,5373

Sumber: Hasil agregasi nilai CPHI komponen dan bobot global AHP menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 11, Nilai CPHI total sebesar 0,5373 berada pada kategori tinggi berdasarkan interval klasifikasi CPHI/FRI ternormalisasi. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proyek memiliki tingkat bahaya yang perlu dikendalikan secara ketat, khususnya pada komponen yang memberikan kontribusi terbesar terhadap nilai indeks total. Meskipun nilai CPHI berada relatif dekat dengan batas bawah kategori tinggi, hasil ini tetap menunjukkan bahwa proyek membutuhkan penguatan strategi pengendalian risiko agar tingkat bahaya tidak meningkat selama pelaksanaan pekerjaan.

Pembahasan Komponen Bahaya Dominan

Hasil perhitungan CPHI menunjukkan bahwa komponen bahaya dominan pada Proyek EPF X adalah *Process and System Complexity* (PSC). Dominansi ini ditentukan oleh kombinasi nilai CPHI komponen sebesar 0,6390 dan bobot global tertinggi sebesar 0,3300, sehingga PSC memberikan kontribusi terbesar terhadap CPHI total.

Atribut dominan dalam komponen *Process and System Complexity* (PSC) adalah PSC1: Kompleksitas sistem proses dan konfigurasi peralatan. Tingginya nilai risiko pada atribut ini dapat disebabkan oleh karakteristik proyek EPF yang melibatkan integrasi berbagai peralatan proses, sistem perpipaan, instrumentasi, serta koneksi antar-unit yang saling bergantung. Semakin kompleks konfigurasi peralatan yang dipasang, semakin besar pula potensi kesalahan instalasi, ketidaksesuaian interface, kegagalan koordinasi antar disiplin, maupun keterlambatan identifikasi potensi bahaya selama pelaksanaan konstruksi.

Pada proyek konstruksi migas, kompleksitas sistem proses tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga pada aspek keselamatan kerja. Pekerjaan instalasi peralatan proses umumnya berkaitan dengan peralatan bertekanan, sistem fluida, jalur perpipaan, serta area kerja yang melibatkan beberapa disiplin secara bersamaan. Kondisi tersebut dapat meningkatkan paparan risiko apabila tidak didukung oleh desain yang jelas, metode kerja yang terintegrasi, pemeriksaan kesesuaian gambar, serta koordinasi yang baik antara tim engineering, construction, HSE, dan kontraktor. Oleh karena itu, PSC1 memperoleh nilai risiko tinggi karena atribut ini merepresentasikan kombinasi antara potensi dampak yang besar dan kebutuhan pengendalian teknis yang ketat.

Dominansi PSC juga terlihat dari kontribusinya terhadap nilai CPHI total proyek. Berdasarkan hasil perhitungan, PSC memiliki bobot global tertinggi dan nilai CPHI komponen tertinggi, sehingga kontribusi komponen ini terhadap indeks total menjadi paling besar dibandingkan komponen lainnya. Hal ini memperkuat bahwa kompleksitas sistem proses bukan hanya memiliki tingkat risiko atribut yang tinggi, tetapi juga dinilai sebagai komponen yang sangat penting oleh para ahli dalam struktur model CPHI. Oleh karena itu, strategi mitigasi pada proyek EPF X perlu diarahkan pada pengendalian risiko teknis yang berkaitan dengan konfigurasi peralatan proses, interface perpipaan, kesesuaian desain, prosedur instalasi, serta koordinasi antar disiplin pekerjaan.

Validasi Model

Validasi model dilakukan melalui *expert judgment* dengan melibatkan 17 validator yang berasal dari pihak user dan kontraktor proyek konstruksi migas. Validator dipilih secara purposive berdasarkan pengalaman di bidang konstruksi migas, keterlibatan dalam fungsi manajerial, engineering, HSE, maupun pengawasan lapangan, serta pemahaman terhadap identifikasi bahaya dan penilaian risiko. Hasil validasi menunjukkan nilai rata-rata keseluruhan sebesar 4,70 dari skala 5,00, sehingga termasuk dalam kategori sangat valid. Seluruh aspek yang dinilai, yaitu struktur model CPHI, atribut bahaya, metode *severity-frequency*, metode perhitungan, hasil model, dan implementasi praktis, memperoleh nilai di atas 4,20. Nilai tertinggi terdapat pada aspek implementasi praktis (4,98) dan metode *severity-frequency* (4,94), yang menunjukkan bahwa model dinilai mudah dipahami, mudah diterapkan, serta memiliki potensi untuk digunakan pada proyek konstruksi migas dengan karakteristik yang serupa.

Secara keseluruhan, hasil *expert judgment* menunjukkan bahwa model CPHI memiliki validitas isi dan validitas praktis yang sangat baik. Meskipun aspek metode perhitungan

memperoleh nilai paling rendah dibandingkan aspek lainnya (4,38), nilainya tetap berada pada kategori sangat valid, sehingga pendekatan *Fuzzy, Analytical Hierarchy Process (AHP)*, dan *Choquet fuzzy integral* dinilai sesuai untuk digunakan dalam model. Temuan ini menunjukkan bahwa CPHI mampu menyajikan profil bahaya proyek secara sistematis serta membantu mengidentifikasi komponen dan atribut bahaya yang paling dominan. Namun, validasi yang dilakukan masih terbatas pada penilaian para ahli sehingga belum menunjukkan validitas prediktif. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu menguji model pada proyek lain dan membandingkan hasilnya dengan data historis kecelakaan, near miss, maupun observasi lapangan untuk memperkuat validitas empiris model.

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan bobot global setiap komponen terhadap nilai *Construction Project Hazard Index (CPHI)* dan kategori bahaya proyek. Nilai awal (*baseline*) CPHI sebesar 0,5373 berada pada kategori tinggi, dengan *Process and System Complexity (PSC)* sebagai komponen yang memberikan kontribusi terbesar. Pengujian dilakukan menggunakan metode one-at-a-time, yaitu mengubah bobot satu komponen secara bertahap sebesar $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, dan $\pm 20\%$, sementara bobot komponen lainnya disesuaikan secara proporsional agar jumlah bobot tetap sama dengan satu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan bobot hingga $\pm 20\%$ pada hampir seluruh komponen belum mengubah kategori bahaya maupun komponen dominan. Perubahan kategori hanya terjadi ketika bobot PSC diturunkan sebesar 20%, sehingga nilai CPHI turun menjadi 0,5273 dan masuk ke kategori sedang. Hal ini menunjukkan bahwa PSC merupakan komponen yang paling berpengaruh terhadap perubahan nilai indeks dibandingkan komponen lainnya.

Untuk mengetahui batas perubahan yang memengaruhi kategori bahaya, dilakukan perhitungan switching value. Hasilnya menunjukkan bahwa PSC memiliki switching value paling kecil, yaitu penurunan bobot sekitar 14,6%, dari 0,3300 menjadi 0,2819, sehingga mampu mengubah kategori CPHI dari tinggi menjadi sedang. Sebaliknya, komponen lain memerlukan perubahan bobot yang jauh lebih besar, bahkan pada *Human Resource Competency (HRC)* dan *Construction Method and Sequence (CMS)* perubahan kategori hanya dapat dicapai dengan bobot negatif sehingga dinyatakan tidak feasible. Berdasarkan hasil tersebut, model CPHI dinyatakan tidak sensitif terhadap perubahan bobot global hingga rentang $\pm 10\%$ karena nilai CPHI, kategori bahaya, dan komponen dominan tetap tidak berubah. Namun demikian, model relatif paling sensitif terhadap perubahan bobot PSC, sehingga komponen ini perlu menjadi perhatian utama dalam penerapan dan pengembangan model pada proyek konstruksi migas.

Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini memiliki implikasi teoretis dan praktis. Secara teoretis, penelitian menunjukkan bahwa penilaian bahaya proyek konstruksi dapat dikembangkan melalui integrasi TFN, FRI, AHP konvensional, dan *Choquet fuzzy integral* dalam kerangka MCDM. Integrasi tersebut mengakomodasi penilaian linguistik, perbedaan tingkat kepentingan, dan agregasi nilai risiko berdasarkan urutan nilai serta kapasitas kumulatif bobot. Secara praktis, model CPHI dapat digunakan oleh stakeholder proyek untuk mengidentifikasi komponen bahaya dominan dan atribut dengan nilai risiko tinggi. Hasil CPHI dapat menjadi masukan dalam penyusunan strategi pengendalian, alokasi sumber daya keselamatan, penentuan fokus inspeksi, dan evaluasi kesiapan proyek. Bobot untuk penerapan aktual perlu dikaji kembali

apabila karakteristik atau fase proyek berbeda dari kondisi studi kasus. Selain itu, model ini berpotensi diterapkan pada beberapa proyek konstruksi migas dengan karakteristik sejenis. Dengan struktur komponen dan atribut yang sama, nilai CPHI antar proyek dapat dibandingkan sehingga perusahaan dapat mengetahui proyek mana yang memiliki tingkat bahaya relatif lebih tinggi dan membutuhkan perhatian manajerial lebih besar. Selain itu, model ini berpotensi diterapkan pada beberapa proyek konstruksi migas dengan karakteristik sejenis. Dengan struktur komponen dan atribut yang sama, nilai CPHI antar proyek dapat dibandingkan sehingga perusahaan dapat mengetahui proyek mana yang memiliki tingkat bahaya relatif lebih tinggi dan membutuhkan perhatian manajerial lebih besar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengembangan, penerapan, validasi, dan analisis sensitivitas, penelitian ini berhasil mengembangkan *Construction Project Hazard Index* (CPHI) sebagai model penilaian bahaya proyek konstruksi migas yang terdiri atas delapan komponen dan dua puluh empat atribut bahaya. Model ini mengintegrasikan *Trapezoidal Fuzzy Number* (TFN), *Fuzzy Risk Index* (FRI), *Analytical Hierarchy Process* (AHP), dan *Choquet fuzzy integral* dalam kerangka *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). Penerapan pada Proyek EPF X menghasilkan nilai CPHI sebesar 0,5373 yang termasuk kategori tinggi, dengan *Process and System Complexity* sebagai komponen yang memberikan kontribusi terbesar. Validasi expert judgment memperoleh nilai rata-rata 4,70 (sangat valid), sedangkan analisis sensitivitas menunjukkan model relatif stabil terhadap perubahan bobot global hingga $\pm 10\%$, meskipun komponen *Process and System Complexity* merupakan faktor yang paling sensitif. Oleh karena itu, CPHI direkomendasikan sebagai alat penilaian awal untuk menentukan prioritas pengendalian bahaya pada proyek konstruksi migas dan masih perlu diuji pada berbagai proyek lain serta dikembangkan menjadi aplikasi atau dashboard untuk mendukung penerapan secara praktis.

REFERENSI

- Ahmadi, F., Sadeghi-Yarandi, M., Ghiyasi, S., Mousavi, M., & Soltanzadeh, A. (2025). Advancing Construction Safety: A Hybrid Construction Safety Hazard Index and Kernel Density Estimation Approach for Assessing Construction Safety Hazards. *Work*. <https://doi.org/10.1177/10519815251366999>
- Almaskati, D., Kermanshachi, S., Pamidimukkala, A., & Yin, Z. (2024). A Review on Construction Safety: Hazards, Mitigation Strategies, and Impacted Sectors. *Buildings*, 14(2), 526. <https://doi.org/10.3390/buildings14020526>
- Chen, S. J., & Hwang, C. L. (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-467684>
- Choe, S., & Leite, F. (2017). Assessing Safety Hazard Among Different Construction Trades: Quantitative Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(5), 4016133. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001237)
- Executive, H. and S. (2001). *Reducing Risks, Protecting People: HSE's Decision-Making Process*. HSE Books.
- Flanagan, R., & Norman, G. (1993). *Risk Management and Construction*. Blackwell Scientific.
- Grabisch, M. (1996). The Application of Fuzzy Integrals in Multicriteria Decision Making. *European Journal of Operational Research*, 89(3), 445–456. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00176-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00176-X)

- Ilbahar, E., Karaşan, A., Cebi, S., & Kahraman, C. (2018). A Novel Approach to Hazard Assessment for Occupational Health and Safety Using Pythagorean Fuzzy AHP and Fuzzy Inference System. *Safety Science*, 103, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.025>
- Indonesia, K. E. dan S. D. M. R. (2021). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 32 Tahun 2021 tentang Inspeksi Teknis dan Pemeriksaan Keselamatan Instalasi dan Peralatan pada Kegiatan Usaha Minyak dan Gas Bumi*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Indonesia, P. R. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3)*.
- Institute, P. M. (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)* (6th ed.). PMI.
- Mahdinia, M., Yarandi, M. S., Jafarinia, E., & Soltanzadeh, A. (2021). Development of a New Technique for Safety Risk Assessment in Construction Projects Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*.
- Majumder, D., Debnath, J., & Biswas, A. (2013). Risk Analysis in Construction Sites Using Fuzzy Reasoning and Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Procedia Technology*, 10, 604–614. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.401>
- Mansor, M. A., & Flayyih, S. S. (2025). Hazard Assessment of Prefabricated Construction in Iraq Using Fuzzy Synthetic Evaluation. *Buildings*, 15(10), 1622. <https://doi.org/10.3390/buildings15101622>
- Patel, D. A., & Jha, K. N. (2017). Developing a Process to Evaluate Construction Project Safety Hazard Index Using the Possibility Approach in India. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(1), 4016081. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001205)
- Patel, D. J., & Patel, D. A. (2025). Development of Demolition Project Hazard Index Using the Possibility Approach. *International Journal of Construction Management*.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Senić, A., Simić, N., Dobrodolac, M., & Stojadinović, Z. (2025). Development of a Hybrid Model for Hazard Assessment and Management in Complex Road Infrastructure Projects. *Applied Sciences*, 15(5), 2736. <https://doi.org/10.3390/app15052736>
- Soltanzadeh, A., Mahdinia, M., Jafarinia, E., Golmohammadpour, H., & Sadeghi-Yarandi, M. (2023). Occupational Safety Risk Analysis in Construction Sites Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A Case Study in a Large Construction Project. *Work*, 76(2), 771–782. <https://doi.org/10.3233/WOR-220086>
- Standardization, I. O. for. (2018). *ISO 31000:2018 – Risk Management: Guidelines*. ISO.
- Structural Equation Modeling and Fuzzy Set Theory: Advancing Risk Assessment in Oil and Gas Construction Projects. (2024). *Environmental Impact Assessment Review*.
- Tah, J. H. M., & Carr, V. (2000). A Proposal for Construction Project Risk Assessment Using Fuzzy Logic. *Construction Management and Economics*, 18(4), 491–500. <https://doi.org/10.1080/01446190050024905>
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>
- Triantaphyllou, E., & Sánchez, A. (1997). A Sensitivity Analysis Approach for Some Deterministic Multi-Criteria Decision-Making Methods. *Decision Sciences*, 28(1), 151–194. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x>
- Yazdani-Chamzini, A. (2014). Proposing a New Methodology Based on Fuzzy Logic for Tunnelling Hazard Assessment. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(1),

- 82–94. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.843583>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhao, X. (2024). Construction Risk Management Research: Intellectual Structure and Emerging Themes. *International Journal of Construction Management*.
- Zou, P. X. W., Zhang, G., & Wang, J. (2007). Understanding the Key Risks in Construction Projects in China. *International Journal of Project Management*, 25(6), 601–614. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.03.001>