IDENTIFIKASI DAN PENENTUAN PRIORITAS RISIKO KESELAMATAN KERJA BERDASARKAN ASPEK *DETAIL ENGINEERING DESIGN* (DED) PADA PROYEK PEMBANGUNAN PIPA PENYALUR GAS ASOSIASI SAS-1

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Nama : Annisa Nathaniela Syahda
No. Mahasiswa : 22522052

PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika di kemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 28 Juli 2026



(Annisa Nathaniela Syahda)

NIM. 22522052

SURAT BUKTI PENELITIAN

PT. SELE RAYA BELIDA

SURAT KETERANGAN

No. 0180/HRD-SRB/VI/2026

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama	: **TETY HADIANTINI**
Jabatan	: HR & Business Support Manager
Alamat	: PT. SELE RAYA BELIDA Graha Sele, Jl. Tebet Raya No. 8-10 Jakarta Selatan, 12810

Selaku pembimbing kegiatan, menyatakan bahwa peserta berikut:

Nama	: **ANNISA NATHANIELA SYAHDA**
NIM	: 22522052
Program Studi	: Teknik Industri
Instansi	: Universitas Islam Indonesia

Telah melaksanakan kegiatan Magang di:

Perusahaan	: **PT SELE RAYA BELIDA**
Divisi	: Production and Operation
Periode Magang	: 13 April 2026 - 12 Juni 2026

Demikian Surat Keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 25 Juni 2026
PT SELE RAYA BELIDA

Tety Hadiantini
HR & Business Support Manager

Graha Sele 2nd Floor
Jl. Tebet Raya No 8-10, Jakarta 12810, Indonesia
Tel: (62-21) 83703609 (Hunting)
Fax: (62-21) 83703612

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

IDENTIFIKASI DAN PENENTUAN PRIORITAS RISIKO KESELAMATAN KERJA BERDASARKAN ASPEK *DETAIL ENGINEERING DESIGN* (DED) PADA PROYEK PEMBANGUNAN PIPA PENYALUR GAS ASOSIASI SAS-1

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Annisa Nathaniela Syahda

No. Mahasiswa : 22522052

Yogyakarta, 28 Juli 2026

Dosen Pembimbing

(Atyanti Dyah Prabaswari, ST., M.Sc.)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

IDENTIFIKASI DAN PENENTUAN PRIORITAS RISIKO KESELAMATAN KERJA BERDASARKAN ASPEK *DETAIL ENGINEERING DESIGN* (DED) PADA PROYEK PEMBANGUNAN PIPA PENYALUR GAS ASOSIASI SAS-1

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Annisa Nathaniela Syahda

No. Mahasiswa : 22522052

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 28 Juli 2026

Tim Penguji

Atyanti Dyah Prabaswari, S.T., M.Sc.	
Ketua	
Wahyudhi Sutrisno, S.T., M.M., M.T	
Anggota I	
Ir. Vembri Noor Helia, S.T., M.T., IPM	
Anggota II	

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM

NIK. 01522010

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil 'alamin, segala puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Karya sederhana ini saya persembahkan kepada keluarga tercinta, terutama kedua orang tua yang selalu memberikan doa, dukungan, nasihat, serta kasih sayang tanpa henti. Terima kasih atas setiap pengorbanan, kepercayaan, dan semangat yang selalu menguatkan saya dalam setiap proses yang telah dilalui. Dengan penuh rasa hormat, saya juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Atyanti Dyah Prabaswari, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, atas segala bimbingan, arahan, motivasi, serta kesabaran yang telah diberikan selama proses penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih pula saya sampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu, mendukung, dan mendoakan saya, baik secara langsung maupun tidak langsung. Setiap bantuan yang diberikan memiliki arti yang sangat besar dalam perjalanan saya hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Terakhir, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada diri saya sendiri yang telah memilih untuk tetap bertahan, terus belajar, dan tidak menyerah meskipun menghadapi berbagai tantangan. Terima kasih karena telah percaya bahwa setiap proses akan membawa saya sampai pada titik ini.

MOTTO

“Diwajibkan atas kamu berperang, padahal itu tidak menyenangkan bagimu. Tetapi boleh jadi kamu tidak menyenangi sesuatu, padahal itu baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu tidak baik bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui”
(Q.S Al-Baqarah: 216)

KATA PENGANTAR

Assalamu’alaikum Warahmatullahi Wabaraakaatuh

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, serta ridha-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Identifikasi dan Penentuan Prioritas Risiko Keselamatan Kerja pada Proyek Pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1". Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Industri. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang penuh dengan ilmu pengetahuan. Tugas Akhir ini disusun berdasarkan penelitian di KKS PT Sele Raya Belida, khususnya pada Divisi *Production and Operation*, dengan fokus pada analisis risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1. Selama proses penelitian hingga penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh banyak pengalaman, pengetahuan, serta dukungan dari berbagai pihak. Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik tanpa bimbingan, arahan, motivasi, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini, khususnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Sri Kusumadewi, S.Si., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
3. Ibu Atyanti Dyah Prabaswari, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala waktu, perhatian, kesabaran, dan ketulusan yang telah Ibu berikan selama membimbing penulis. Setiap arahan, masukan, dan motivasi yang diberikan tidak hanya membantu penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini, tetapi juga mengajarkan penulis untuk terus belajar, bertanggung jawab, dan tidak mudah menyerah dalam setiap proses.
4. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Teknik Industri yang telah membagikan ilmu, pengalaman, serta bimbingan selama penulis menempuh pendidikan. Terima kasih atas dedikasi dan ketulusan dalam mendidik sehingga menjadi bekal yang berharga bagi penulis.
5. Pimpinan beserta seluruh jajaran KKKS PT Sele Raya Belida, khususnya Divisi *Production and Operation*, yang telah memberikan kesempatan, bantuan, serta dukungan kepada penulis untuk melaksanakan penelitian.
6. Bapak Kusno Kurniawan selaku Manager Divisi *Production and Operation* beserta seluruh responden yang telah meluangkan waktu, memberikan informasi, pengalaman, dan masukan yang sangat membantu selama proses penelitian.
7. Kedua orang tua tersayang, Ayah tercinta dan Ibunda tersayang. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala kasih sayang, doa, pengorbanan, serta perjuangan yang telah diberikan tanpa pernah mengenal lelah selama 23 tahun. Terima kasih karena telah bekerja keras dan berjuang agar penulis dapat tumbuh, menempuh pendidikan, dan menjalani kehidupan yang layak tanpa harus merasa kekurangan. Penulis menyadari bahwa ucapan terima kasih tidak akan pernah cukup untuk membalas setiap pengorbanan yang telah diberikan. Terima kasih karena selalu menjadi tempat pulang, kekuatan, dan alasan terbesar bagi penulis untuk terus berjuang. Di setiap langkah yang

terasa berat, doa, kepercayaan, dan cinta dari kalian selalu menjadi penyemangat hingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.

8. Kepada keluarga besar dan saudara-saudara tercinta. Terima kasih atas doa, dukungan, dan perhatian yang tidak pernah putus. Terima kasih telah menjaga rumah tetap hangat, menjadi tempat pulang terutama di masa-masa yang tidak mudah. Kehangatan dan kebersamaan keluarga menjadi salah satu kekuatan terbesar yang mengantarkan penulis hingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Kepada Adrian Oka Pramana, Adamsyah Hadi Kusumah, Regina Wulandari, Arista Prabaningrum, Ikhsan Fajar Hardanta. Penulis ucapkan terima kasih telah menjadi rumah dan tempat pulang ternyaman selama di perkuliahan. Dibalik kata pedas yang selalu dilontarkan ada hati yang selalu siap menyediakan bahu untuk bersandar dan hadir tanpa syarat di kala suka maupun duka. Terima kasih telah menjadi sahabat yang tidak hanya ada saat tawa mengisi hari, tetapi juga air mata menemani malam. Atas telinga yang siap mendengar, atas nasihat dan motivasi yang sering kali datang tepat di saat penulis membutuhkannya. Kehadiran kalian telah memberi warna, kekuatan, dan semangat tersendiri dalam perjalanan perkuliahan ini.
10. Kepada Alya Azrinindita, Pingkan Savarina, dan Nur Oktaviana Dewi Lestari. Terima kasih telah menjadi sahabat yang selalu hadir, meskipun jarak dan kesibukan membuat kita tidak memiliki banyak waktu bersama. Terima kasih karena selalu meluangkan waktu untuk mendengarkan, menguatkan, dan mengingatkan penulis agar terus melangkah ketika keadaan terasa berat.
11. Manda Aprilia, Insan Akhsani dan Rifa Damayanti. Terima kasih karena telah hadir pada waktu yang mungkin tidak lama, tetapi sangat berarti. Meskipun kedekatan kita terjalin di akhir masa perkuliahan, kalian menghadirkan tawa, semangat, keyakinan, dan kenyamanan di tengah proses penyusunan Tugas Akhir. Terima kasih telah menjadi teman yang selalu memberikan energi positif dan membuat hari-hari lebih ringan.
12. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah hadir dengan berbagai bentuk bantuan, dukungan, doa, maupun semangat selama perjalanan penyusunan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang setulus-tulusnya atas setiap kebaikan yang telah diberikan. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan tersebut dengan rahmat, keberkahan serta senantiasa dilimpahkan kemudahan dan kebahagiaan kepada semua pihak. Aamiin ya Rabbal 'alamin.

Yogyakarta, 28 Juli 2026

(Annisa Nathaniela Syahda)

NIM. 22522052

ABSTRAK

Industri minyak dan gas bumi merupakan sektor dengan risiko tinggi, termasuk pembangunan infrastruktur *pipeline* yang melibatkan aktivitas konstruksi kompleks seperti *lifting*, *trenching*, dan *welding*. Risiko keselamatan kerja pada proyek *pipeline* tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi lapangan, tetapi juga oleh keputusan pada tahap *Detail Engineering Design* (DED). Namun, hasil studi HAZID dan HAZOP pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1 milik PT Sele Raya Belida masih berfokus pada identifikasi bahaya proses, sehingga belum menghubungkan DED dengan risiko keselamatan kerja konstruksi secara sistematis. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi potensi bahaya, menilai tingkat risiko, menentukan prioritas risiko, serta merumuskan rekomendasi pengendalian risiko berkategori prioritas. Metode yang digunakan adalah *Hazard Identification, Risk Assessment and Determining Control* (HIRADC) untuk identifikasi dan penilaian risiko, dilanjutkan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk menentukan prioritas risiko berdasarkan faktor desain, material, rute, dan metode. Data diperoleh melalui *pairwise comparison* oleh tiga *expert* staf *engineering* Divisi *Production and Operation* dan wawancara dengan Manager *Production and Operation*. Hasil penelitian menunjukkan 16 potensi risiko dari tujuh kategori aktivitas, dengan 10 risiko *Medium Risk* dan 6 risiko *High Risk*. Pembobotan AHP menunjukkan faktor desain memiliki bobot tertinggi sebesar 0,633 dengan *Consistency Ratio* 0,090 (konsisten), dan risiko ledakan menempati prioritas tertinggi (0,3070). Rekomendasi pengendalian difokuskan pada tiga risiko *High Risk*, yaitu ledakan, ketidakstabilan *trench*, dan sengatan listrik, berupa penerapan *Stop Work Authority*, penyediaan personel medis, dokumen *Installation Procedure*, dan *Pressure Safety Valve*.

Kata Kunci: HIRADC, *Analytical Hierarchy Process*, *Detail Engineering Design*, *Risiko Keselamatan Kerja, Pipeline*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN II
SURAT BUKTI PENELITIAN III
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING IV
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI V
HALAMAN PERSEMBAHAN VI
MOTTO VII
KATA PENGANTAR VIII
ABSTRAK X
DAFTAR ISI XI
DAFTAR TABEL XIII
DAFTAR GAMBAR IX
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 5
1.3 Tujuan Penelitian 6
1.4 Manfaat Penelitian 6
1.5 Batasan Penelitian 7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 9
2.1 Research Gap 9
2.2 Industri Minyak dan Gas Bumi 16
2.2.1 *Proyek Pipeline pada Industri Migas.* 17
2.3 Detail Engineering Design (DED) 18
2.4 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) 19
2.4.1 *Sistem Manajemen K3LL pada Migas.* 20
2.5 *Hazard Identification* (HAZID) 23
2.6 Hazard and Operability Study (HAZOP) 25
2.7 *Hazard Identification*, *Risk Assessment*, and *Determining Control* (HIRADC) 26
2.7.1 Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*) 26
2.7.2 *Penilaian Risiko (Risk Assessment).* 27
2.7.3 *Pengendalian Risiko (Determining Control).* 28
2.8 Analytical Hierarchy Process (AHP) 28
2.8.1 *Membentuk Struktur Hierarki.* 30
2.8.2 *Membentuk Matriks Perbandingan Berpasangan (Pairwise comparison).* 31
2.8.3 *Geometric mean.* 33
2.8.4 *Normalisasi Matriks Perbandingan.* 34
2.8.5 *Perhitungan priority weight.* 35
2.8.6 *Perhitungan consistency ratio.* 36
2.8.7 *Perhitungan prioritas global.* 38
BAB III METODE PENELITIAN 40
3.1 Subjek Penelitian 40
3.2 Objek Penelitian 40
3.3 Jenis Data 40

3.4 Pengumpulan Data 41
3.5 Alur Penelitian 42
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA 47
4.1 Profil Pembangunan Pipa Gas 47
4.2 Pengumpulan Data 47
4.2.1 *Data teknis pipa dan standar regulasi.* 47
4.3 Identifikasi Bahaya dan Risiko 50
4.3.1 *Identifikasi bahaya.* 50
4.3.2 *Penilaian risiko.* 51
4.3.3 *Penentuan pengendalian risiko.* 52
4.4 Pengolahan Data 56
4.4.1 *Transformasi data HIRADC ke AHP.* 56
4.4.2 *Penyusunan struktur hierarki AHP.* 58
4.4.3 *Perbandingan berpasangan (Pairwise comparisons).* 59
4.4.4 *Perhitungan geometric mean.* 61
4.4.5 *Pembobotan dan uji konsistensi.* 63
4.4.6 *Pengambilan keputusan.* 65
BAB V PEMBAHASAN 67
5.1 Analisis Hasil Identifikasi Bahaya dan Risiko 67
5.2 Analisis Tingkat Risiko Berdasarkan HIRADC 68
5.3 Analisis Pengendalian Risiko Berdasarkan Hierarki Control 71
5.4 Analisis Hasil Pembobotan AHP 73
5.5 Analisis Prioritas Risiko 76
5.6 Analisis Keterkaitan Keselamatan Kerja Proyek Pipeline dengan Faktor DED 78
BAB VI PENUTUP 81
6.1 Kesimpulan 81
6.2 Saran 82
DAFTAR PUSTAKA 84

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kajian literatur 12
Tabel 2. 2 Guidewords HAZID 23
Tabel 2. 3 Tabel *severity* atau konsekuensi 27
Tabel 2. 4 Tabel *likelihood* 27
Tabel 2. 5 Matriks penilaian risiko 28
Tabel 2. 6 Keterangan nilai perbandingan berpasangan 32
Tabel 2. 7 Contoh tabel matriks berpasangan 32
Tabel 2. 8 Nilai RI 38
Table 4. 1 Desain data pipa 48
Table 4. 2 Desain data RTP 50
Table 4. 3 Desain data *carboon steel* 50
Table 4. 4 Code standar 50
Table 4. 5 Identifiaksi bahaya dan risiko 51
Table 4. 6 Penilaian risiko 51
Table 4. 7 Pengendalian risiko 52
Table 4. 8 Pemilihan pengendalian risiko 55
Table 4. 9 Pemetaan alternatif risiko dengan aktivitas kerja 57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Rute pipa 4
Gambar 2. 1 Hirarki pengendalian 22
Gambar 2. 2 Hierarki AHP 31
Gambar 3. 1 Alur penelitian 43
Gambar 4. 1 Blok diagram 48
Gambar 4. 2 Struktur hirarki AHP prioritas risiko 59
Gambar 4. 3 Kuesioner perbandingan antar kriteria 59
Gambar 4. 4 Kuesioner perbandingan antar sub-kriteria 59
Gambar 4. 5 Kuesioner perbandingan alternatif terhadap kriteria 60
Gambar 4. 6 Kuesioner perbandingan alternatif terhadap sub-kriteria 60
Gambar 4. 7 Hasil perhitungan *geometric mean* antar kriteria 61
Gambar 4. 8 Hasil perhitungan *geometric mean* antar sub-kriteria 61
Gambar 4. 9 Hasil perhitungan *geometric mean* alternatif terhadap kriteria 62
Gambar 4. 10 Hasil perhitungan *geometric mean* terhadap sub-kriteria 63
Gambar 4. 11 Hasil pembobotan dan uji konsistensi kriteria 64
Gambar 4. 12 Hasil pembobotan dan uji konsistensi sub-kriteria 64
Gambar 4. 13 Hasil pembobotan dan uji konsistensi alternatif terhadap kriteria 65
Gambar 4. 14 Hasil pembobotan dan uji konsistensi alternatif terhadap sub-kriteria 65
Gambar 4. 15 Hasil pengambilan keputusan risiko 66
Gambar 5. 1 Kerangka SMK3 ISO 45001:2018 79

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Laporan Tahunan SKK Migas 2024, sektor hulu minyak dan gas bumi (migas) memiliki peran penting dalam penyediaan energi nasional, penerimaan negara, serta pengembangan infrastruktur energi yang menunjang kebutuhan masyarakat dan industri. Kegiatan di sektor ini mencakup eksplorasi, eksploitasi, produksi, pengolahan, hingga pembangunan berbagai fasilitas penunjang yang diperlukan untuk menyalurkan hidrokarbon dari sumber produksi menuju fasilitas pengolahan maupun distribusi. Salah satu infrastruktur yang berperan penting dalam sistem produksi migas adalah jaringan perpipaan (*pipeline*), yang digunakan sebagai sarana transportasi fluida secara kontinu, efisien, dan ekonomis. Dibandingkan dengan moda transportasi lainnya, sistem perpipaan mampu mengalirkan minyak maupun gas dalam kapasitas besar dengan tingkat kehilangan produk yang relatif rendah (Fajri et al., 2026).

Meskipun memiliki peran yang strategis, industri migas juga dikenal sebagai industri dengan tingkat risiko yang tinggi (*High-risk industry*). Menurut Cadena et al. (2026), karakteristik kegiatan di sektor ini melibatkan fluida yang mudah terbakar, tekanan operasi yang tinggi, energi tersimpan (*stored energy*), penggunaan alat berat, serta berbagai aktivitas konstruksi yang kompleks. Risiko yang muncul tidak hanya berkaitan dengan keselamatan pekerja, tetapi juga dapat mengakibatkan kebakaran, ledakan, gangguan operasi, pencemaran lingkungan, hingga kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, pengelolaan keselamatan kerja menjadi aspek yang perlu diperhatikan pada setiap tahapan proyek migas, termasuk dalam pembangunan infrastruktur perpipaan.

Tingginya risiko pada proyek *pipeline* masih terlihat dari berbagai kecelakaan yang terjadi dalam beberapa tahun terakhir. Pada tahun 2023, insiden *hydrotest failure* pada proyek *pipeline* di Amerika Serikat menyebabkan dua pekerja meninggal dunia akibat terlontarnya *pipe pig* saat pengujian tekanan dilakukan. Pada tahun yang sama, *Transportation Safety Board of Canada* melaporkan pelepasan sekitar 84.000 m^3 gas setelah alat berat yang digunakan dalam pekerjaan konstruksi mengenai pipa *existing*. Memasuki tahun 2024, terjadi fatalitas akibat *trench collapse* pada pekerjaan penggalian utilitas bawah tanah di Houston, Amerika Serikat. Selain itu, kecelakaan pengelasan juga mengakibatkan seorang pekerja meninggal dunia akibat

sengatan listrik saat melakukan pekerjaan *hot work*. Pada periode yang sama, insiden *dropped object* pada operasi *lifting* di Laut Utara kembali menunjukkan bahwa jatuhnya beban masih menjadi salah satu penyebab utama kecelakaan serius pada aktivitas konstruksi energi. Sementara itu, pada tahun 2025 terjadi ledakan besar pada sistem *pipeline* gas di Putra Heights, Malaysia, yang diduga berkaitan dengan aktivitas pekerjaan tanah (*earthwork*) di sekitar jalur pipa dan menyebabkan kerusakan yang cukup luas di area sekitarnya. Berbagai kejadian tersebut menunjukkan bahwa aktivitas *trenching*, *lifting*, *welding*, *hydrotest*, maupun pekerjaan di sekitar jalur pipa masih menjadi sumber risiko utama dalam pembangunan *pipeline*.

Jika melihat lebih jauh, berbagai kecelakaan tersebut tidak selalu disebabkan oleh kesalahan pekerja atau kondisi kerja di lapangan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa keputusan yang diambil pada tahap desain dan *engineering* turut menentukan tingkat risiko yang muncul selama konstruksi berlangsung. Konsep *Prevention through Design* (PtD) menjelaskan bahwa sebagian besar risiko keselamatan sebenarnya dapat dikurangi sejak tahap perencanaan melalui keputusan desain yang lebih aman, sehingga potensi bahaya tidak sepenuhnya harus dikendalikan ketika pekerjaan sudah berjalan. Berbagai kajian PtD dalam industri konstruksi juga menunjukkan bahwa desain yang mempertimbangkan aspek keselamatan sejak awal mampu mengurangi paparan risiko pekerja selama fase konstruksi maupun operasi (Jin et al., 2023).

Dalam proyek *pipeline*, menurut Kumi et al. (2026), keputusan *engineering* yang dihasilkan pada tahap *Detail Engineering Design* (DED) memiliki keterkaitan dengan tingkat risiko keselamatan kerja selama konstruksi. Pada penelitian Lou et al. (2024), penentuan jalur pipa (*Route selection*) pada area dengan kondisi tanah yang tidak stabil, misalnya, dapat meningkatkan risiko longsor galian (*trench collapse*). Penetapan tekanan desain (*Design pressure*) dan nilai *Maximum Allowable Operating Pressure* (MAOP) juga berpengaruh terhadap tingkat bahaya saat pelaksanaan *hydrotest*. Di sisi lain, menurut standar *pipeline engineering* yang dikembangkan oleh American Petroleum Institute melalui API RP 1111 serta penelitian Fajri et al. (2026), pemilihan *Material* dan ketebalan pipa akan menentukan berat *Material* yang harus diangkat sehingga berkaitan langsung dengan risiko *lifting* maupun *dropped object*. Metode konstruksi yang ditetapkan dalam dokumen *engineering* juga turut menentukan tingkat paparan pekerja terhadap pekerjaan panas (*hot work*), alat berat, energi bertekanan, maupun ruang terbatas. Dengan demikian, risiko keselamatan kerja pada proyek

pipeline tidak hanya dipengaruhi oleh aktivitas konstruksi itu sendiri, tetapi juga oleh keputusan *engineering* yang dibuat jauh sebelum pekerjaan dimulai (Marhavilas et al., 2025).

Berbagai penelitian terdahulu telah membahas penerapan metode HIRADC, HIRARC, HIRA, HAZOP, maupun AHP pada sektor manufaktur, pertambangan, petrokimia, dan operasional *pipeline*. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada identifikasi bahaya aktivitas kerja atau risiko operasional sistem. Penelitian yang secara khusus mengkaji keterkaitan faktor *Detail Engineering Design* dengan risiko keselamatan kerja pada tahap konstruksi *pipeline* masih relatif terbatas. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengembangkan pendekatan terintegrasi untuk menerjemahkan *hazard* hasil HAZID dan HAZOP menjadi analisis risiko konstruksi yang kemudian diprioritaskan berdasarkan faktor *engineering* yang memengaruhinya. Kondisi ini menunjukkan masih adanya kesenjangan penelitian yang perlu dikembangkan lebih lanjut.

Kesenjangan tersebut juga ditemukan pada salah satu proyek pembangunan *pipeline* yang dilaksanakan oleh PT Sele Raya Belida (SRB). PT Sele Raya Belida merupakan Kontraktor Kontrak Kerja Sama (KKKS) yang bergerak di sektor hulu minyak dan gas bumi (upstream oil and gas industry). Dalam upaya meningkatkan pemanfaatan gas asosiasi dari Sumur SAS-1, perusahaan merencanakan pembangunan pipa penyalur gas menuju fasilitas produksi Lapangan Cantik melalui pembangunan pipa gas berdiameter 4 inci dengan panjang sekitar ±2,1 km. Proyek ini merupakan bagian dari program monetisasi gas asosiasi yang sebelumnya sebagian besar masih dialirkan ke sistem flare. Dengan adanya pembangunan *pipeline* tersebut, gas yang sebelumnya belum dimanfaatkan secara optimal diharapkan dapat memberikan nilai ekonomi yang lebih tinggi.



Gambar 1. 1 Rute pipa

Rute jalur pipa yang direncanakan ditunjukkan pada Gambar 1.1. Jalur tersebut membentang dari fasilitas produksi Sumur SAS-1 menuju titik tie-in pada sistem Gas Orifice Meter di Lapangan Cantik dengan melintasi kondisi permukaan tanah yang bervariasi. Kondisi ini menjadi salah satu pertimbangan dalam mengidentifikasi potensi bahaya yang dapat muncul selama tahap konstruksi *pipeline*.

Pada tahap *engineering*, proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1 telah memiliki dokumen *Detail Engineering Design* (DED) sebagai dasar pelaksanaan proyek. Selain itu, perusahaan juga telah melaksanakan studi *Hazard Identification* (HAZID) dan *Hazard and Operability Study* (HAZOP) untuk mengidentifikasi potensi bahaya serta berbagai deviasi yang mungkin terjadi pada sistem perpipaan. Hasil kedua studi tersebut memberikan informasi mengenai potensi *hazard*, penyebab, konsekuensi, serta rekomendasi pengendalian dari sisi *engineering* maupun operasional.

Pada tahap *engineering*, proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1 telah memiliki dokumen *Detail Engineering Design* (DED) sebagai dasar pelaksanaan proyek. Selain itu, perusahaan juga telah melaksanakan studi *Hazard Identification* (HAZID) dan *Hazard and Operability Study* (HAZOP) untuk mengidentifikasi potensi bahaya serta berbagai deviasi yang mungkin terjadi pada sistem perpipaan. Hasil kedua studi tersebut memberikan informasi mengenai potensi *hazard*, penyebab, konsekuensi, serta rekomendasi pengendalian dari sisi *engineering* maupun operasional.

Meskipun demikian, hasil HAZID dan HAZOP tersebut masih berfokus pada identifikasi *hazard* dan analisis deviasi proses sehingga belum secara spesifik dimanfaatkan untuk mengevaluasi risiko keselamatan kerja pada aktivitas konstruksi *pipeline*. Menurut Jabbari et al. (2021), sebagian besar studi risiko pada sistem *pipeline* masih berorientasi pada aspek *process safety, fire and explosion risk*, serta kegagalan sistem perpipaan. Sampai saat ini belum terdapat analisis yang secara sistematis menghubungkan hasil identifikasi bahaya pada tahap *engineering* dengan tingkat risiko keselamatan kerja yang berpotensi muncul selama pekerjaan konstruksi berlangsung. Selain itu, perbedaan antara kondisi aktual di lapangan dan asumsi yang digunakan pada tahap desain juga berpotensi memunculkan risiko tambahan yang belum teridentifikasi secara optimal. Pada penelitian Kumi et al. (2026) menyatakan bahwa keputusan desain dibuat pada tahap perencanaan yang dapat memengaruhi probabilitas kecelakaan dan tingkat risiko keselamatan selama pelaksanaan konstruksi. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan, yaitu belum terintegrasinya hasil studi *engineering* dengan kebutuhan pengendalian risiko keselamatan kerja pada tahap konstruksi.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu pendekatan yang mampu menghubungkan informasi *hazard* pada tahap *engineering* dengan risiko keselamatan kerja pada tahap konstruksi. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control* (HIRADC) untuk menganalisis tingkat risiko keselamatan kerja pada aktivitas konstruksi *pipeline* berdasarkan *hazard* yang relevan dari hasil *engineering* study dan kondisi aktual di lapangan. Selanjutnya, metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) digunakan untuk menentukan prioritas risiko berdasarkan faktor-faktor *Detail Engineering Design* yang memengaruhinya. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat menghubungkan keputusan *engineering* pada tahap DED dengan analisis risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1 PT Sele Raya Belida.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, terdapat beberapa permasalahan yang perlu dianalisis secara lebih mendalam terkait pengelolaan risiko pada proyek pembangunan pipa gas asosiasi SAS-1. Oleh karena itu, rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana mengidentifikasi potensi bahaya dan risiko keselamatan kerja yang berkaitan dengan aspek *Detail Engineering Design* pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1?
2. Bagaimana tingkat risiko keselamatan kerja yang dihasilkan dari aktivitas proyek berdasarkan pendekatan *Hazard Identification, Risk Assessment and Determining Control*?
3. Bagaimana hasil prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1 menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process*?
4. Bagaimana rekomendasi pengendalian terhadap risiko prioritas keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi potensi bahaya dan risiko keselamatan kerja yang berkaitan dengan hasil *Detail Engineering Design* dan studi HAZID pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.
2. Menganalisis dan menilai tingkat risiko keselamatan kerja berdasarkan metode *Hazard Identification, Risk Assessment and Determining Control* terhadap aktivitas yang dipengaruhi oleh aspek desain.
3. Menentukan prioritas risiko keselamatan kerja menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* sebagai dasar dalam pengambilan keputusan pengendalian risiko.
4. Menyusun rekomendasi pengendalian terhadap risiko prioritas keselamatan kerja dalam meningkatkan pengelolaan risiko pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.

1.4 Manfaat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara akademis maupun praktis bagi berbagai pihak, antara lain:

1. Bagi Peneliti
    a. Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.

b. Menambah wawasan terkait penerapan manajemen risiko pada proyek konstruksi, khususnya pada pembangunan pipa gas di industri migas.
c. Meningkatkan kemampuan dalam menganalisis potensi bahaya, menilai tingkat risiko, serta menentukan prioritas risiko secara sistematis.
d. Menjadi media untuk menerapkan ilmu yang telah diperoleh selama perkuliahan ke dalam kondisi nyata di lapangan.

2. Bagi Akademisi
   a. Menjadi tambahan referensi dalam pengembangan ilmu manajemen risiko, terutama pada proyek konstruksi di industri migas.
   b. Memberikan kontribusi berupa kajian yang mengintegrasikan proses identifikasi, penilaian, hingga penentuan prioritas risiko dalam satu alur yang terstruktur.
   c. Dapat menjadikan dasar atau acuan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pengelolaan risiko pada proyek pembangunan pipa gas.
3. Bagi Perusahaan
   a. Memberikan gambaran terkait potensi bahaya serta tingkat risiko pada aktivitas konstruksi proyek pembangunan pipa gas.
   b. Menjadikan bahan pertimbangan dalam menentukan prioritas risiko yang perlu mendapatkan penanganan lebih lanjut.
   c. Menyediakan rekomendasi pengendalian risiko yang dapat dijadikan acuan untuk meningkatkan keselamatan kerja dan efektivitas pelaksanaan proyek.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dibatasi sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada tahap *engineering* yaitu *Detail Engineering Design* dalam proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.
2. Identifikasi risiko dilakukan dengan mengacu pada hasil studi HAZID dan HAZOP yang telah tersedia sebagai dasar identifikasi awal potensi bahaya.
3. Penelitian ini hanya membahas risiko keselamatan kerja (K3) yang berkaitan dengan aktivitas konstruksi yang dipengaruhi oleh aspek desain (DED) dan tidak mencangkup

analisis keandalan teknis pipa secara detail seperti korosi, ketebalan material, maupun perhitungan mekanik lainnya.

4. Data yang digunakan dalam penelitian meliputi data desain, dokumen *engineering* serta informasi pendukung dari kondisi lapangan yang relevan dengan aspek keselamatan kerja.
5. Penelitian ini tidak membahas aspek biaya, penjadwalan proyek, maupun analisis finansial.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Research Gap

Pengelolaan risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan *pipeline* migas telah banyak diteliti dengan berbagai pendekatan, mulai dari identifikasi bahaya, penilaian risiko, hingga metode pengambilan keputusan berbasis multi-kriteria. Namun, berdasarkan kajian terhadap lima belas penelitian terdahulu, masih terlihat beberapa keterbatasan yang menunjukkan adanya research gap, khususnya terkait integrasi antara aspek *engineering Design* dan analisis risiko keselamatan kerja pada proyek *pipeline* gas.

Penelitian oleh Marhavilas et al. (2025) dan Marhavilas et al. (2022) mengembangkan pendekatan *hybrid* dengan mengombinasikan metode HAZOP, AHP, MCDM, hingga FTA untuk meningkatkan efektivitas penilaian risiko pada sistem industri. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi beberapa metode mampu menghasilkan analisis yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu metode secara tunggal. Meski begitu, fokus penelitian masih berada pada sistem industri umum dan petrokimia, sehingga belum secara spesifik mengaitkan faktor *Detail Engineering Design* (DED) dengan risiko keselamatan kerja pada proyek konstruksi *pipeline* migas. Selain itu, hubungan antara keputusan desain dan aktivitas konstruksi di lapangan juga belum dibahas secara mendalam.

Penelitian terkait metode HIRADC dan HIRARC yang dilakukan oleh Henny et al. (2025), Puspitasari et al. (2023), Amalia et al. (2023), serta Sadewa & Syaifullah, (2025) menunjukkan bahwa pendekatan HIRADC maupun HIRARC cukup efektif dalam mengidentifikasi bahaya dan menentukan pengendalian risiko pada berbagai sektor industri. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada identifikasi bahaya aktivitas kerja secara umum tanpa menghubungkannya dengan aspek *engineering design*. Selain itu, penerapannya juga lebih dominan pada sektor manufaktur dan pertambangan, sehingga implementasinya pada proyek *pipeline* migas, khususnya yang berkaitan dengan pengaruh DED, masih cukup terbatas.

Dalam konteks industri minyak dan gas, penelitian oleh Jabbari et al. (2021) membahas analisis risiko kebakaran, ledakan, dan pelepasan gas beracun pada *pipeline* gas menggunakan fuzzy AHP. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode multi-kriteria dapat membantu menentukan prioritas risiko pada sistem *pipeline*. Namun, fokus penelitian masih lebih mengarah pada risiko operasional *pipeline* dan belum membahas risiko keselamatan kerja pada

tahap konstruksi yang dipengaruhi oleh faktor desain. Hal yang serupa juga terlihat pada penelitian Ismail et al. (2020), yang lebih berfokus pada penerapan HIRAC di industri minyak tanpa mengintegrasikan pendekatan prioritas risiko berbasis *engineering Design*.

Penelitian Fajri et al. (2026) membahas risiko dan tantangan keselamatan pada implementasi CCS *pipeline* dan *wellbore*, sedangkan Cadena et al. (2026) menyoroti pentingnya *quantitative Risk Assessment* pada fasilitas dengan *major hazard*. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem *pipeline* memiliki tingkat risiko tinggi yang membutuhkan analisis mendalam. Akan tetapi, fokusnya masih berada pada aspek operasional, kuantitatif, dan keandalan sistem, sehingga belum secara spesifik mengkaji hubungan antara keputusan DED dengan risiko keselamatan kerja selama tahap konstruksi *pipeline*.

Di sisi lain, penelitian Hariri et al. (2021) dan Lou et al. (2024) lebih menyoroti faktor lingkungan dan geo*hazard* dalam analisis risiko. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kondisi lingkungan dan geografis memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap tingkat risiko proyek. Meski demikian, hubungan antara faktor *Route pipeline* dan risiko keselamatan kerja pada aktivitas konstruksi belum dibahas secara langsung.

Selain itu, penelitian Sinaga & Yuneta, (2024) menunjukkan bahwa metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) efektif digunakan dalam menentukan prioritas pengambilan keputusan. Namun, penerapan AHP dalam penelitian tersebut masih terbatas pada pemilihan supplier dan belum digunakan untuk menentukan prioritas risiko keselamatan kerja berbasis faktor *engineering Design* pada proyek *pipeline* migas.

Sementara itu, penelitian Ferlania et al. (2024) serta Gunawan et al. (2023) lebih menitikberatkan pada implementasi sistem manajemen keselamatan kerja dan SOP sebagai upaya pengendalian risiko. Walaupun relevan dalam konteks K3, pendekatan yang digunakan masih bersifat umum dan belum mengembangkan hubungan antara aspek desain, metode konstruksi, serta prioritas risiko pada proyek *pipeline*.

Berdasarkan keseluruhan kajian literatur tersebut, terlihat beberapa keterbatasan. Pertama, sebagian besar penelitian sebelumnya masih menggunakan metode identifikasi dan analisis risiko secara terpisah, tanpa mengintegrasikan HAZID, HAZOP, HIRADC, dan AHP dalam satu kerangka analisis yang saling terhubung. Kedua, penelitian yang secara khusus mengaitkan faktor *Detail Engineering Design* (DED), seperti *Design*, *Material*, *Route*, dan metode konstruksi, terhadap risiko keselamatan kerja pada proyek *pipeline* migas masih sangat terbatas.

Ketiga, sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada risiko operasional, manufaktur, atau lingkungan, sehingga pembahasan mengenai risiko pada tahap konstruksi *pipeline* yang dipengaruhi oleh keputusan *engineering* masih belum banyak dikaji. Keempat, penelitian sebelumnya umumnya juga belum mengembangkan sistem prioritas risiko berbasis faktor desain menggunakan pendekatan multi-kriteria seperti AHP.

Karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui pendekatan yang mengintegrasikan hasil HAZID dan HAZOP ke dalam metode HIRADC, kemudian dilanjutkan dengan penentuan prioritas risiko menggunakan metode AHP berbasis faktor *Detail Engineering Design*, yaitu *Design*, *Material*, *Route*, dan metode. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan analisis risiko yang lebih sistematis, terintegrasi, dan lebih aplikatif pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.

Tabel 2. 1 Kajian literatur

No	Penulis	Judul	Objek	Sektor				Metode						
				Konstruksi	Migas	Petrokimia	Manufaktur	HAZID	HAZOP	HIRA	HIRARC	HIRADC	AHP	Lainnya
1	(Marhavilas et al., 2025)	*SAFETY ASSESSMENT BY AMALGAMATING MCDM/AHP, HAZOP, DECISION RISK-MATRICES' ANALYSIS, AND FTA, THROUGH A SAFETY'S COLOR-MAPPING VISUALIZATION APPLICATION TO INDUSTRIAL AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS*	Sistem industri dan teknologi			✓			✓				✓	✓
2	(Henny et al., 2025)	*Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control (HIRADC) for Workplace Safety in Manufacturing Industry: A Risk-Control Framework Complete with Bibliometric Literature Review Analysis to Support Sustainable Development Goals (SDGs)*	Keselamatan kerja industri manufaktur				✓					✓		
3	(Puspitasari et al., 2023)	Analisis Potensi Bahaya dan Pengendalian pada Proses Produksi PT XYZ dengan Metode HIRADC	Proses produksi				✓					✓		
4	(Jabbari et al., 2021)	*Risk Assessment of fire, explosion and release of toxic gas of Siri–Assalouyeh sour gas pipeline using fuzzy AHP*	*Pipeline* gas asam		✓								✓	

No	Penulis	Judul	Objek	Sektor				Metode						
				Konstruksi	Migas	Petrokimia	Manufaktur	HAZID	HAZOP	HIRA	HIRARC	HIRADC	AHP	Lainnya
5	(Ismail et al., 2020)	*Hazard Identification and Risk Assessment with Controls* (HIRAC) *in Oil Industry – A Proposed Approach*	Industri minyak		✓						✓			
6	(Hariri et al., 2021)	*Environmental hazard assessment of industrial and municipal waste Materials with the applications of RES2-D method and 3-D Oasis Montaj modeling: A case study at Kepong, Kuala Lumpur, Peninsula Malaysia*	*Hazard* lingkungan				✓			✓				✓
7	(Amalia et al., 2023)	ANALISIS POTENSI BAHAYA DAN RISIKO KECELAKAAN KERJA DENGAN MENGGUNAKAN METODE *HAZARD IDENTIFICATION RISK ASSESSMENT AND RISK CONTROL* (HIRARC) PADA PEMOTONGAN KAYU	Pemotongan kayu				✓				✓			
8	(Gunawan et al., 2023)	Penerapan Metode *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA) dan Penerapan Standar Operasional Prosedur (SOP) Sebagai Upaya Peningkatan Produksi di UKM Halo Oma	UMKM produksi				✓			✓				
9	(Sinaga & Yuneta, 2024)	ANALISIS PEMILIHAN SUPPLIER BAHAN BAKU ALUMINIUM PADA PT XYZ MENGGUNAKAN METODE	Pemilihan supplier				✓						✓	

No	Penulis	Judul	Objek	Sektor				Metode						
				Konstruksi	Migas	Petrokimia	Manufaktur	HAZID	HAZOP	HIRA	HIRARC	HIRADC	AHP	Lainnya
		ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)												
10	(Ferlania et al., 2024)	Analisa Penerapan SMK3 (Sistem Manajemen Kesehatan Dan Keselamatan Kerja) Pada Proyek Konstruksi di Kota Lamongan	Proyek konstruksi	✓				✓						✓
11	(Sadewa & Syaifullah, 2025)	*Implementation of Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control (Hiradc) System for Hazard Risk Management in Mining Work Environment at PT XYZ*	Lingkungan pertambangan	✓	✓							✓		
12	(Marhavilas et al., 2022)	*Safety-assessment by hybridizing the* MCDM / AHP & HAZOP-DMRA *techniques through safety's level colored maps: Implementation in a petrochemical industry*	Industri petrokimia			✓			✓				✓	✓
13	(Cadena et al., 2026)	*Enablers of Quantitative Risk Assessments in Major Hazard Facilities versus those in Fire Safety Engineering*	Major *hazard* facility		✓	✓							✓	✓
14	(Lou et al., 2024)	*A novel framework for multiple thermokarst hazards Risk Assessment and controlling environmental factors analysis on the Qinghai-Tibet Plateau*	*Hazard* lingkungan dan geoteknik			✓								✓

No	Penulis	Judul	Objek	Sektor				Metode							
				Konstruksi	Migas	Petrokimia	Manufaktur	HAZID	HAZOP	HIRA	HIRARC	HIRADC	AHP	Lainnya
15	(Fajri et al., 2026)	*Assessment of risk, safety, hazard, and economic challenges of CCS pipeline and wellbore implementation: Exploring emerging achievements in 2010–2025*	CCS *pipeline* dan *wellbore*		✓								✓	✓
16	Peneliti	Identifikasi dan Penentuan Prioritas Risiko Keselamatan Kerja Berdasarkan Aspek *Detail Engineer Design* (DED) pada Proyek Pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1			✓							✓	✓	

2.2 Industri Minyak dan Gas Bumi

Industri minyak dan gas bumi merupakan salah satu sektor strategis yang memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan energi nasional, pertumbuhan ekonomi, serta keberlangsungan aktivitas industri di berbagai negara. Berdasarkan Laporan Tahunan SKK Migas Tahun 2024, sektor migas berkontribusi terhadap penyediaan energi nasional, penerimaan negara, serta pengembangan infrastruktur energi yang menunjang kebutuhan industri dan masyarakat. Aktivitas dalam industri migas sendiri mencakup berbagai tahapan, mulai dari eksplorasi, eksploitasi, produksi, pengolahan, hingga proses transportasi dan distribusi minyak maupun gas bumi.

Pada sektor hulu migas, sistem perpipaan (*pipeline*) digunakan sebagai media utama untuk menyalurkan fluida hidrokarbon dari fasilitas produksi menuju fasilitas pengolahan maupun distribusi. Menurut Fajri et al. (2026), penggunaan *pipeline* dinilai lebih efektif dan efisien, serta mampu mendukung kontinuitas operasi dalam jangka panjang. Selain mampu mengalirkan fluida dalam kapasitas besar, *pipeline* juga memiliki tingkat kehilangan produk yang relatif rendah dibandingkan moda transportasi lainnya. Di sisi lain, penggunaan *pipeline* dinilai lebih ekonomis untuk distribusi fluida dalam jumlah besar dan jarak jauh dibandingkan transportasi darat maupun laut.

Menurut Cadena et al. (2026), industri migas termasuk kategori *High risk industry* karena melibatkan fluida mudah terbakar, tekanan operasi tinggi, *Material* berbahaya, serta aktivitas konstruksi dan operasional yang kompleks. Risiko pada industri migas dapat menyebabkan kecelakaan kerja, kebakaran, ledakan, kebocoran gas, pencemaran lingkungan, hingga kerugian ekonomi yang besar. Risiko tersebut dapat muncul pada berbagai tahapan proyek, mulai dari tahap desain, konstruksi, *commissioning*, hingga operasional. Pada proyek *pipeline* gas, potensi risiko seperti rupture, *overpressure*, kebocoran gas, *dropped object*, longsor *trench*, dan paparan gas berbahaya menjadi aspek penting yang harus dikendalikan secara sistematis.

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2021 tentang Inspeksi Teknis dan Pemeriksaan Keselamatan Instalasi dan Peralatan pada Kegiatan Usaha Minyak dan Gas Bumi, setiap instalasi dan peralatan migas wajib memenuhi aspek keselamatan, keandalan, dan kelayakan operasi guna meminimalkan risiko kecelakaan dan kegagalan sistem. Regulasi tersebut menunjukkan bahwa aspek keselamatan pada industri

migas tidak hanya berfokus pada operasional, tetapi juga harus diperhatikan sejak tahap perencanaan dan konstruksi instalasi.

Menurut ISO 45001, penerapan keselamatan kerja dilakukan melalui pendekatan sistematis yang mencakup identifikasi bahaya, penilaian risiko, serta pengendalian risiko secara berkelanjutan untuk mencegah terjadinya kecelakaan kerja dan meningkatkan kinerja keselamatan organisasi. Dalam konteks proyek pembangunan *pipeline* gas, pengelolaan risiko keselamatan kerja menjadi semakin penting karena aktivitas konstruksi melibatkan interaksi antara faktor *engineering*, lingkungan kerja, alat berat, tekanan sistem, serta aktivitas pekerjaan berisiko tinggi. Oleh karena itu, pendekatan manajemen risiko yang terintegrasi diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengendalikan risiko sejak tahap *Detail Engineering Design* (DED) hingga pelaksanaan konstruksi di lapangan.

2.2.1 *Proyek Pipeline pada Industri Migas.*

Pipeline merupakan sistem perpipaan yang digunakan untuk mengalirkan fluida seperti minyak bumi, gas bumi, maupun produk turunannya dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Pada Jabbari et al. (2021) industri migas, *pipeline* menjadi salah satu infrastruktur utama karena dinilai mampu mendukung proses distribusi fluida secara kontinu, aman, dan ekonomis. Sistem *pipeline* terdiri dari berbagai komponen utama, seperti *line pipe, valve, flange, fitting, pig launcher-receiver*, sistem proteksi korosi, hingga sistem pengaman tekanan. Komponen tersebut dirancang berdasarkan parameter *engineering* tertentu, mulai dari tekanan operasi, temperatur operasi, laju alir fluida, karakteristik fluida, hingga kondisi lingkungan di sekitar jalur *pipeline*.

Pembangunan *pipeline* termasuk pekerjaan dengan tingkat kompleksitas yang cukup tinggi karena melibatkan berbagai aktivitas konstruksi yang saling berkaitan, *seperti survey Route, clearing, trenching, stringing, bending, welding, non destructive test* (NDT), *coating, lowering, Tie-in, hydrotest*, hingga *commissioning*. Masing-masing aktivitas tersebut memiliki potensi bahaya yang berbeda dan dapat menimbulkan kecelakaan kerja apabila tidak disertai pengendalian yang tepat. Risiko pada proyek *pipeline* juga tidak hanya dipengaruhi oleh aktivitas kerja di lapangan, tetapi turut dipengaruhi oleh keputusan *engineering* pada tahap desain. Faktor seperti tekanan desain, ketebalan pipa, pemilihan *Material*, kondisi tanah, topografi, hingga metode konstruksi dapat memengaruhi tingkat risiko selama pelaksanaan proyek. Karena itu, pengelolaan risiko pada proyek *pipeline* perlu dilakukan secara sistematis sejak tahap perencanaan hingga pelaksanaan konstruksi di lapangan.

2.3 *Detail Engineering Design* (DED)

Menurut Siahaan et al. (2023), *Detail Engineering Design* (DED) merupakan tahapan perencanaan teknis rinci yang dilakukan sebelum pelaksanaan konstruksi proyek sebagai dasar dalam proses *engineering, procurement, construction, dan installation* . Pada tahap ini, desain dikembangkan secara lebih detail, mencakup spesifikasi teknis, gambar kerja, pemilihan *Material*, parameter operasi, metode konstruksi, hingga sistem pengaman yang akan digunakan selama proyek berlangsung. DED menjadi acuan utama dalam pelaksanaan konstruksi karena seluruh aktivitas di lapangan mengacu pada keputusan *engineering* yang telah ditetapkan pada tahap desain tersebut.

Dalam penelitian Qonitah & Rosyid, (2026) pada proyek minyak dan gas bumi, tahapan DED memiliki peran yang sangat penting karena proyek migas umumnya memiliki tingkat kompleksitas tinggi serta melibatkan sistem bertekanan, *Material* berbahaya, dan aktivitas konstruksi dengan risiko yang besar. Kesalahan, ketidaksesuaian, maupun keputusan *engineering* yang kurang optimal pada tahap desain dapat memengaruhi efektivitas konstruksi, keselamatan kerja, keandalan sistem, hingga potensi kegagalan operasi di masa mendatang. Karena itu, kualitas perencanaan pada tahap DED menjadi salah satu faktor penting yang mendukung keberhasilan proyek secara keseluruhan.

Berdasarkan Toole & Gambatese, (2008), yang dihasilkan pada tahap desain memiliki hubungan langsung terhadap tingkat keselamatan kerja selama proses konstruksi. Konsep *Prevention through Design* (PtD) menjelaskan bahwa potensi bahaya sebaiknya sudah dikendalikan sejak tahap desain, karena kemampuan untuk memengaruhi tingkat keselamatan proyek akan semakin berkurang ketika proyek memasuki tahap konstruksi dan operasional. Pendekatan ini menekankan bahwa *hazard* konstruksi tidak hanya berasal dari *unsafe action* pekerja di lapangan, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh keputusan *engineering* yang tertanam dalam desain proyek. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa keputusan desain dapat memengaruhi tingkat *exposure hazard* pada aktivitas konstruksi. Parameter *engineering* seperti tekanan operasi, konfigurasi perpipaan, pemilihan *Material*, layout instalasi, metode *erection*, hingga kondisi lokasi konstruksi dapat meningkatkan maupun mengurangi tingkat risiko keselamatan kerja. Karena itu, aspek desain tidak hanya berfungsi untuk memenuhi kebutuhan teknis dan operasional sistem, tetapi juga perlu mempertimbangkan aspek keselamatan konstruksi sejak tahap awal perencanaan. Penerapan konsep PtD pada tahap DED bertujuan

untuk mengurangi potensi kecelakaan melalui eliminasi maupun minimisasi *hazard* sejak proses *engineering* dilakukan. Pendekatan ini diterapkan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan dalam pemilihan desain, *Material*, metode kerja, serta sistem pengaman sebelum aktivitas konstruksi dilaksanakan. Dengan begitu, risiko dapat dikendalikan lebih awal sehingga tingkat paparan bahaya terhadap pekerja selama proses konstruksi dapat diminimalkan.

Dalam penelitian Kumi et al. (2026), *Detail Engineering Design* dipandang sebagai salah satu faktor yang dapat memengaruhi munculnya risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan *pipeline* gas. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis hubungan antara keputusan *engineering* pada tahap DED dengan potensi *hazard* dan risiko keselamatan kerja selama aktivitas konstruksi *pipeline* berlangsung.

2.4 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Menurut Peraturan Presiden Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan upaya perlindungan yang dilakukan untuk menjamin dan melindungi keselamatan tenaga kerja melalui penerapan sistem manajemen yang terintegrasi guna mencegah terjadinya kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja. Penerapan K3 tidak hanya ditujukan untuk melindungi pekerja, tetapi juga menjaga aset perusahaan, lingkungan kerja, serta keberlangsungan operasional. Dalam implementasinya, SMK3 dilakukan secara sistematis melalui kebijakan, perencanaan, pelaksanaan, evaluasi, serta tindakan perbaikan yang berkelanjutan.

Sementara itu, menurut ISO 45001:2018, sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja diterapkan melalui pendekatan *risk-based thinking* yang mencakup identifikasi bahaya, penilaian risiko, serta pengendalian risiko secara sistematis dan berkesinambungan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan kerja, meningkatkan performa keselamatan, serta menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat bagi pekerja. Dalam industri berisiko tinggi seperti minyak dan gas bumi, penerapan sistem manajemen keselamatan menjadi sangat krusial karena kegagalan dalam pengendalian risiko dapat berdampak fatal, mulai dari kebakaran, ledakan, kebocoran gas, hingga kerusakan fasilitas produksi.

Menurut Ferlania et al. (2024),proyek konstruksi termasuk salah satu sektor dengan tingkat kecelakaan kerja yang tinggi karena melibatkan aktivitas yang kompleks, penggunaan alat berat, pekerjaan di area terbatas, serta paparan terhadap berbagai sumber bahaya. Pada proyek *pipeline* migas sendiri, aktivitas seperti *trenching, lifting, welding, Tie-in, hydrotest*, hingga *commissioning* memiliki potensi risiko keselamatan kerja yang cukup signifikan apabila tidak dikendalikan dengan tepat. Risiko yang dapat muncul antara lain tertimbun akibat longsoran tanah, *dropped object* karena kegagalan *lifting*, kebakaran atau ledakan akibat *hot work*, rupture pipa saat *hydrotest*, hingga paparan gas berbahaya yang dapat menyebabkan *asphyxiation*.

Menurut Henny et al. (2025), penerapan sistem K3 yang efektif membutuhkan proses identifikasi bahaya dan pengendalian risiko yang dilakukan sejak tahap perencanaan hingga pelaksanaan pekerjaan. Pendekatan K3 modern tidak lagi hanya berfokus pada unsafe action pekerja, tetapi juga mempertimbangkan faktor *engineering*, metode kerja, desain fasilitas, serta kondisi lingkungan dalam membentuk *hazard* di lapangan. Oleh karena itu, pada proyek *pipeline* migas, penerapan K3 perlu diintegrasikan dengan aspek desain *engineering* agar potensi bahaya dapat diminimalkan sejak tahap awal proyek.

Selain itu, menurut Ismail et al. (2020), pengelolaan risiko keselamatan kerja di industri minyak dan gas memerlukan pendekatan sistematis melalui identifikasi bahaya, penilaian tingkat risiko, serta penentuan tindakan pengendalian yang sesuai dengan karakteristik pekerjaan. Pengendalian tersebut umumnya dilakukan menggunakan hierarki pengendalian risiko, mulai dari eliminasi, substitusi, *engineering control*, *administrative control*, hingga penggunaan alat pelindung diri (APD). Dengan penerapan sistem K3 yang efektif, risiko kecelakaan kerja pada proyek *pipeline* diharapkan dapat ditekan sehingga keselamatan pekerja, keandalan sistem, dan keberlangsungan proyek dapat terjaga dengan baik.

2.4.1 *Sistem Manajemen K3LL pada Migas.*

Sistem Manajemen Kesehatan, Keselamatan Kerja, dan Lindungan Lingkungan (K3LL) pada industri minyak dan gas bumi merupakan suatu sistem pengelolaan yang terintegrasi yang dirancang untuk memastikan keselamatan tenaga kerja, perlindungan lingkungan, serta keberlanjutan kegiatan operasional. Mengacu pada Pedoman Tata Kerja-005 SKK Migas, penerapan K3LL tidak hanya menitikberatkan pada aspek keselamatan kerja saja, tetapi juga mencakup pendekatan yang menyeluruh berbasis risiko (*risk-based management*) dalam seluruh aktivitas usaha hulu minyak dan gas bumi. Secara prinsip, penerapan sistem manajemen

K3LL dilakukan dengan mengutamakan kepatuhan terhadap peraturan dan ketentuan yang berlaku, serta menjaga efektivitas dan efisiensi dalam kegiatan operasional. Di samping itu, sistem ini juga berfokus pada upaya perlindungan kesehatan manusia dan lingkungan. Lebih lanjut, K3LL menekankan pentingnya pencegahan kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja melalui pendekatan yang terstruktur, sistematis, serta dilakukan secara berkelanjutan.

Dalam pelaksanaannya, sistem manajemen K3LL di industri migas terdiri dari beberapa elemen utama yang saling berkaitan. Elemen pertama adalah kepemimpinan dan komitmen manajemen, di mana pimpinan perusahaan memiliki tanggung jawab untuk menetapkan kebijakan K3LL, menyediakan sumber daya yang dibutuhkan, serta memastikan prinsip K3LL benar-benar diterapkan dalam seluruh aktivitas operasional. Komitmen ini menjadi dasar dalam membentuk budaya kerja yang aman sekaligus meningkatkan kepedulian terhadap lingkungan. Elemen berikutnya adalah perencanaan K3LL yang mencakup penyusunan rencana pengelolaan, penetapan sasaran dan target kinerja, serta pengintegrasian program K3LL ke dalam rencana kerja dan anggaran perusahaan. Perencanaan tersebut disusun berdasarkan hasil identifikasi risiko pada setiap kegiatan operasional, sehingga program yang dibuat lebih berorientasi pada pencegahan dan menyesuaikan kondisi di lapangan.

Selanjutnya, manajemen risiko menjadi bagian yang cukup penting dalam sistem K3LL. Proses ini meliputi identifikasi risiko, analisis dan evaluasi risiko, hingga penetapan tindakan pengendalian yang sesuai. Risiko kemudian dikelompokkan berdasarkan tingkat keparahan dan kemungkinan terjadinya, sehingga perusahaan dapat menentukan prioritas pengendalian dengan lebih tepat. Dengan pendekatan ini, potensi bahaya dapat dikenali dan ditangani lebih awal sebelum berkembang menjadi kejadian yang lebih besar.

Pengendalian risiko dilakukan melalui berbagai cara, mulai dari eliminasi bahaya, substitusi, rekayasa teknis, pengendalian administratif, hingga penggunaan alat pelindung diri. Selain itu, peningkatan kompetensi tenaga kerja melalui pelatihan dan pengembangan juga menjadi bagian penting agar pengendalian risiko dapat berjalan lebih efektif. Susunan metode pengendalian tersebut umumnya digambarkan dalam bentuk hierarki pengendalian risiko K3, yang menunjukkan urutan prioritas pengendalian dari tingkat paling efektif hingga pengendalian yang digunakan sebagai langkah terakhir, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. 1 Hirarki pengendalian

Sistem manajemen K3LL juga mencakup pengelolaan sumber daya manusia. Dalam hal ini, perusahaan perlu memastikan bahwa setiap pekerja memiliki kompetensi yang sesuai dengan tingkat risiko pekerjaannya. Hal tersebut meliputi penetapan struktur organisasi, pembagian tugas dan tanggung jawab, hingga pelaksanaan pelatihan yang berkaitan dengan aspek K3LL agar seluruh pekerja mampu menjalankan pekerjaannya secara aman.

Pada sektor migas, pengelolaan K3LL tidak hanya dilakukan di lingkup internal perusahaan, tetapi juga melibatkan rantai pasok. Mitra kerja atau kontraktor diwajibkan memenuhi standar K3LL melalui proses penilaian kualifikasi, evaluasi kinerja, serta pengawasan selama pekerjaan berlangsung. Di bagian ini terlihat bahwa sumber risiko K3LL tidak hanya berasal dari aktivitas internal perusahaan, tetapi juga dapat muncul dari pihak eksternal yang terlibat dalam operasional. Selain itu, komunikasi dan dokumentasi juga menjadi elemen penting dalam sistem K3LL. Organisasi perlu memiliki mekanisme pelaporan yang baik terkait insiden, kinerja, maupun umpan balik untuk mendukung transparansi, akuntabilitas, dan proses pengambilan keputusan. Dalam menghadapi kondisi darurat, sistem K3LL juga mencakup kesiapsiagaan dan tanggap darurat melalui penyusunan rencana, identifikasi skenario risiko, serta koordinasi penanganan keadaan darurat guna meminimalkan dampak terhadap manusia, lingkungan, maupun aset.

Selanjutnya, sistem ini dilengkapi dengan proses evaluasi dan peningkatan kinerja secara berkelanjutan melalui audit, penilaian kinerja, dan tinjauan manajemen agar penerapannya tetap efektif dan relevan. Dengan demikian, sistem K3LL di industri migas tidak hanya berfungsi

sebagai bentuk pemenuhan regulasi, tetapi juga menjadi instrumen strategis dalam pengelolaan risiko dan peningkatan kinerja operasional.

2.5 *Hazard Identification* (HAZID)

Berdasarkan Davis et al. (2012), *Hazard Identification* (HAZID) merupakan metode sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya pada suatu sistem, proses, maupun aktivitas kerja secara umum. Metode ini biasanya dilakukan pada tahap awal proyek untuk mengenali sumber-sumber bahaya yang berpotensi menimbulkan dampak terhadap keselamatan kerja, lingkungan, maupun aset perusahaan.

Dalam buku An Engineer's View Of Human Error pada industri minyak dan gas, khususnya proyek *pipeline*, HAZID digunakan untuk mengidentifikasi berbagai potensi bahaya yang dapat terjadi selama tahapan konstruksi maupun operasional, seperti kebocoran gas, *overpressure*, ledakan, longsor pada area galian (*trench collapse*), kegagalan aktivitas *lifting*, hingga paparan gas berbahaya. Proses identifikasi ini umumnya dilakukan secara kualitatif dengan melibatkan tim multidisiplin, sehingga hasil yang diperoleh dapat memberikan gambaran risiko secara lebih menyeluruh. Hasil dari studi HAZID biasanya berupa daftar potensi bahaya beserta penyebab (*causes*), konsekuensi (*consequences*), serta rekomendasi pengendalian awal sebagai langkah mitigasi sebelum dilakukan analisis risiko yang lebih mendalam. Dalam beberapa studi keselamatan proses, HAZID juga menjadi salah satu input penting dalam penyusunan risk register serta pengembangan sistem manajemen risiko proyek

Dalam penelitian ini, hasil HAZID digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi potensi bahaya awal yang berkaitan dengan aktivitas konstruksi *pipeline*, yang kemudian akan dianalisis lebih lanjut melalui metode penilaian risiko.

Tabel 2. 2 Guidewords HAZID

***Hazard* Type**	***Hazard* Category**	**Guidewords**
1.1 Eksternal dan Lingkungan - EE	1.1.1. Bahaya Alam dan Lingkungan	1.1.1.1. Iklim Ekstrim
		1.1.1.2. Petir
		1.1.1.3. Gempa bumi
		1.1.1.4. Erosi
		1.1.1.5. Penurunan tanah
		1.1.1.6. Serangan hewan liar
	1.1.2. Bahaya buatan manusia	1.1.2.1. Ancaman keamanan internal & eksternal
		1.1.2.2. Kerusuhan Sosial / Politik

***Hazard* Type**	***Hazard* Category**	**Guidewords**
	1.1.3. Dampak Fasilitas terhadap Lingkungan sekitar dan sebaliknya	1.1.3.1. Kedekatan dengan area industri
		1.1.3.2. Kedekatan dengan populasi atau Aktivitas publik
		1.1.3.3. Kedekatan dengan Koridor Tranportasi Publik
		1.1.3.4. Penjualan gas melalui pipa atau Penjualan gas berdasarkan aliran
	1.1.4. Emisi dan Pembuangan Lingkungan	1.1.4.1. Pembuangan kontinu dasri fasilitas ke udara
		1.1.4.2. Pembuangan kontinu ke saluran publik
		1.1.4.3. Pembuangan kontinu ke tanah
		1.1.4.4. Pembuangan darurat / tidak terencana
		1.1.4.5. Pembuangan limbah kantor / mess
1.2 Facility -FA	1.2.1. Bahaya Proses	1.2.1.1. Kebocoran gas dari wadah
		1.2.1.2. Kebocoran cairan dari wadah
		1.2.1.3. Kebakaran dan ledakan
	1.2.2. Bahaya Non-Proses	1.2.2.1. Kegagalan struktur
		1.2.2.2. Kegiatan Pengangkatan
		1.2.2.3. Kebakaran non-proses
		1.2.2.4. Komunikasi selama kegiatan operasi / aktivitas pemeliharaan
	1.2.3. Bahaya Pemeliharaan	1.2.3.1. Persyaratan akses
		1.2.3.2. Persyaratan jalur alternatif
		1.2.3.3. Persyaratan isolasi
		1.2.3.4. Pelepasan gas (*venting*)
		1.2.3.5. Pelepasan cairan (*draining*)
	1.2.4. Tata Letak dan Penempatan	1.2.4.1. Umum
		1.2.4.2. Pencegahan kebakaran
		1.2.3.3. Pencegahan ledakan
		1.2.3.4. Titik berkumpul dan jalur evakuasi
1.3 Health - HE	1.3.1 Kesehatan dan Keselamatan Kerja	1.3.1.1. Kontak langsung dengan bahan kimia
		1.3.1.2. Bahaya penyakit
		1.3.1.3. Bahaya sesak napas
		1.3.1.4. Zat beracun
		1.3.1.5. Asap dari kebakaran hutan
		1.3.1.6. Kebisingan
		1.3.1.7. Permukaan Panas (150°F/65°C atau lebih tinggi)
		1.3.1.8. Permukaan Dingin (14°F/-10°C atau lebih rendah)
		1.3.1.9. Listrik

Hazard Type	*Hazard* Category	Guidewords
		1.3.1.10. Zat radioaktif
		1.3.1.11. Risiko ergonomi
		1.3.1.12. Bahaya yang Terkait dengan Ketinggian
		1.3.1.13. Personil Jatuh ke Laut
		1.3.1.14. Tanggap darurat

2.6 Hazard and Operability Study (HAZOP)

Hazard and Operability Study (HAZOP) merupakan metode analisis risiko yang digunakan untuk mengidentifikasi penyimpangan (*deviation*) dari kondisi operasi normal pada suatu sistem proses secara sistematis dan terstruktur. Metode ini mengevaluasi potensi bahaya dengan meninjau setiap bagian proses menggunakan parameter seperti *flow, pressure, temperature,* dan *level*, yang kemudian dipandu oleh *guide word seperti no, more, less, as well as,* dan *reverse* (IEC 61882:2016; CCPS, 2008).

Pada Crawley dan Tyler (2019) HAZOP awalnya dikembangkan dalam industri kimia, namun kini telah menjadi salah satu metode standar dalam analisis keselamatan proses di industri minyak dan gas, petrokimia, serta berbagai sistem infrastruktur berisiko tinggi lainnya. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi penyebab (*causes*) terjadinya deviasi, menganalisis konsekuensi (*consequences*) yang mungkin timbul, serta mengevaluasi keberadaan sistem pengaman (*safeguards*) yang telah diterapkan. Pada sistem *pipeline* gas, metode HAZOP digunakan untuk mengkaji berbagai potensi kondisi operasi abnormal seperti *overpressure*, kebocoran gas, kegagalan *valve*, aliran balik (*reverse flow*), hingga kegagalan sistem kontrol yang dapat berujung pada kecelakaan kerja maupun gangguan operasional. Di sisi lain, HAZOP juga dinilai efektif dalam membantu menurunkan risiko karena mampu mengidentifikasi skenario kegagalan proses sejak dini.

Dalam penelitian ini, hasil HAZOP digunakan untuk memperdalam analisis terhadap penyebab teknis dari potensi bahaya yang sebelumnya telah diidentifikasi melalui HAZID. Dengan demikian, HAZOP berfungsi sebagai penghubung antara identifikasi bahaya awal dan analisis risiko dalam metode HIRADC, sehingga menghasilkan kajian risiko yang lebih komprehensif.

Dokumen / Gambar No	Deskripsi
23220-PRO-GEN-001-A4	Process Design Basis
23220-PRO-GEN-002-A4	Process Design Criteria
23220-PRO-GEN-003-A4	Process Operation and Control Narative / Operating Philosophy
23220-PRO-PFD-001-A3	Process Flow Diagram Transferline Gas Asosiasi SAS-1
23220-PRO-PID-001-A3	Piping & Instrumentation Diagram Legend & Symbol
23220-PRO-PID-002-A3	Piping & Instrumentation Diagram Transferline Gas Asosiasi SAS01
23220-PIP-DTS-004-A4	Pipe Data Sheet

2.7 *Hazard Identification, Risk Assessment,* and *Determining Control* (HIRADC)

Metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control* (HIRADC) merupakan pendekatan dalam manajemen risiko yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menilai tingkat risiko, serta menetapkan langkah pengendalian yang tepat. Metode ini banyak diterapkan dalam sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (K3) karena memberikan kerangka kerja yang sistematis dalam mengelola risiko di lingkungan kerja. Berdasarkan International Labour Organization (ILO, 2001) dalam *Guidelines on Occupational Safety and Health Management Systems*, proses manajemen risiko K3 mencakup tiga tahapan utama, yaitu identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan pengendalian risiko sebagai upaya pencegahan kecelakaan kerja. Sejalan dengan hal tersebut, standar ISO 45001:2018 menegaskan bahwa identifikasi bahaya dan penilaian risiko merupakan komponen kunci dalam penerapan sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja.

Dalam penelitian ini, metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control* (HIRADC) digunakan untuk menganalisis risiko keselamatan kerja yang berkaitan dengan aspek *Detail Engineering Design* (DED) pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1. Penerapan metode ini didasarkan pada hasil studi *Hazard Identification* (HAZID) yang telah tersedia sebagai acuan dalam proses identifikasi awal potensi bahaya. Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian Rahayu et al. (2025) yang menyatakan bahwa HIRADC dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan hasil identifikasi bahaya menjadi analisis risiko yang lebih sistematis dan terukur.

2.7.1 Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Menurut Ramli Soehatman dalam bukunya mengenai sistem manajemen K3, identifikasi bahaya merupakan tahapan awal yang krusial karena menjadi dasar bagi keseluruhan proses

manajemen risiko. Pada tahap ini, potensi bahaya diidentifikasi berdasarkan hasil studi HAZID dan dikaitkan dengan aspek desain yang tercantum dalam dokumen *Detail Engineering Design* (DED), seperti metode konstruksi, spesifikasi *Material*, serta kondisi lingkungan yang dilalui.

2.7.2 *Penilaian Risiko (Risk Assessment).*

Tahap berikutnya adalah penilaian risiko (*Risk Assessment*), yang dilakukan dengan menentukan tingkat kemungkinan terjadinya risiko (*likelihood*) dan tingkat dampak yang ditimbulkan (*severity*). *Likelihood* menggambarkan peluang atau frekuensi terjadinya suatu risiko, sedangkan *severity* menunjukkan tingkat keparahan dampak apabila risiko tersebut terjadi. Mengacu pada standar ISO 31000:2018 Risk Management Guidelines, kombinasi antara *likelihood* dan *severity* digunakan untuk menentukan tingkat risiko secara keseluruhan. Dalam penelitian ini, proses penilaian dilakukan berdasarkan data yang tersedia serta divalidasi melalui pendapat tenaga ahli yang memahami kondisi proyek.

Hasil penilaian risiko selanjutnya diklasifikasikan ke dalam tingkat risiko, yaitu rendah (*low*), sedang (*medium*), dan tinggi (*High*), berdasarkan matriks risiko yang digunakan. Klasifikasi ini bertujuan untuk menunjukkan prioritas penanganan risiko pada setiap aktivitas kerja. Risiko dengan tingkat yang lebih tinggi memerlukan perhatian serta upaya pengendalian yang lebih intensif dibandingkan dengan risiko pada tingkat yang lebih rendah.

Tabel 2. 3 Tabel *severity* atau konsekuensi

Severity		
Nilai	**Kriteria**	**Deskripsi**
1	*Insignificant*	Tidak ada cedera, gangguan kecil
2	*Minor*	Cedera ringan (P3K), tanpa kehilangan waktu kerja
3	*Moderate*	Cedera memerlukan perawatan medis
4	*Major*	Cedera serius / cacat permanen
5	*Extreme*	Kematian / multi fatality

Tabel 2. 4 Tabel *likelihood*

Likelihood		
Nilai	**Kriteria**	**Deskripsi**
1	*Rare*	Sangat jarang terjadi
2	*Unlikely*	Jarang terjadi
3	*Possible*	Mungkin terjadi
4	*Likely*	Sering terjadi
5	*Almost certain*	Sangat sering

Tabel 2. 5 Matriks penilaian risiko

AS / NZS 4360 : 2004		*Severity*					
		Insignificant	***Minor***	***Moderate***	***Major***	***Extreme***	
Likelihood	***Almost Certainly***	M	H	H	E	E	5
	Likely	M	M	H	H	E	4
	Possible	L	M	M	H	H	3
	Unlikely	L	L	M	M	H	2
	Rare	L	L	L	M	M	1
		1	2	3	4	5	

2.7.3 *Pengendalian Risiko (Determining Control).*

Tahap akhir dalam metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control* (HIRADC) adalah penentuan pengendalian risiko (*Determining Control*). Pada tahap ini, dilakukan identifikasi serta penetapan langkah pengendalian yang bertujuan untuk menurunkan tingkat risiko. Penentuan pengendalian dilakukan dengan mengacu pada hierarki pengendalian, yang meliputi eliminasi, substitusi, rekayasa teknik (*engineering control*), pengendalian administratif, serta penggunaan alat pelindung diri (APD). Konsep hierarki ini juga dijelaskan oleh *National Institute for Occupational Safety and Health* sebagai pendekatan yang efektif dalam mengendalikan bahaya di lingkungan kerja.

2.8 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Analytical Hierarchy Process (AHP) merupakan metode pengambilan keputusan multikriteria yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty untuk membantu menyelesaikan permasalahan kompleks melalui penyusunan struktur hierarki dan perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) antar elemen keputusan. Metode ini memungkinkan suatu keputusan dianalisis secara sistematis dengan mempertimbangkan berbagai faktor, baik yang bersifat kuantitatif maupun kualitatif. Oleh karena itu, AHP banyak digunakan dalam berbagai kegiatan seperti evaluasi, pemilihan alternatif, penentuan prioritas, hingga analisis risiko (Saaty & Vargas,

2012). Prinsip utama dalam metode AHP adalah memecah suatu permasalahan ke dalam beberapa tingkatan hierarki yang terdiri dari tujuan (*goal*), kriteria, sub-kriteria, dan alternatif. Setiap elemen pada suatu tingkat hierarki kemudian dibandingkan secara berpasangan dengan elemen lain yang berada pada tingkat yang sama untuk mengetahui tingkat kepentingan relatifnya. Hasil dari perbandingan tersebut selanjutnya diolah menjadi bobot prioritas yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan keputusan (Saaty, 2008).

Dalam penerapannya, pengambilan keputusan tidak selalu dilakukan oleh satu orang, tetapi sering kali melibatkan beberapa ahli yang memiliki pengetahuan dan pengalaman pada bidang terkait. Pendekatan ini dikenal sebagai *Group Decision Making* (GDM), yaitu metode pengambilan keputusan yang melibatkan lebih dari satu pengambil keputusan atau *expert* untuk memperoleh hasil penilaian yang lebih representatif (Saaty & Vargas, 2012). Keterlibatan beberapa *expert* dapat membantu mengurangi subjektivitas dari satu individu, meningkatkan keandalan hasil penilaian, serta memberikan pertimbangan dari berbagai sudut pandang yang berbeda. Pada penerapan *group* AHP, hasil penilaian dari masing-masing *expert* perlu digabungkan terlebih dahulu menjadi satu nilai representatif sebelum dilakukan perhitungan bobot prioritas. Saaty dan Vargas (2012), menjelaskan bahwa salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah *Aggregation of Individual Judgements* (AIJ), yaitu metode untuk menggabungkan seluruh penilaian individu ke dalam satu matriks perbandingan berpasangan kelompok. Dalam proses penggabungan tersebut, metode *Geometric mean* digunakan karena skala perbandingan pada AHP berbentuk skala rasio (*ratio scale*), sehingga pendekatan rata-rata geometrik dinilai sesuai untuk mempertahankan karakteristik matematis dari matriks perbandingan berpasangan.

Dalam penelitian ini, penilaian AHP melibatkan tiga orang *expert* terdiri dari *Manager Production and Operation* (PnO) serta staf *engineering* pada divisi *Production and Operation* yang bertanggungjawab dalam penyusunan *Detail Engineering Design* (DED). Ketiga *expert* tersebut memberikan penilaian terhadap tingkat pengaruh faktor *Detail Engineering Design* (DED) terhadap risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1. Seluruh hasil penilaian kemudian digabungkan menggunakan metode *Geometric mean* untuk menghasilkan matriks perbandingan berpasangan kelompok. Matriks tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan bobot prioritas dan penentuan ranking

risiko keselamatan kerja. Tahapan dalam metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.8.1 *Membentuk Struktur Hierarki.*

Pembentukan struktur hierarki merupakan tahap awal yang penting dalam metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Hierarki digunakan untuk menguraikan permasalahan yang kompleks menjadi elemen-elemen yang lebih sederhana dan terstruktur sehingga hubungan antar elemen dapat dianalisis secara sistematis. Menurut Thomas L. Saaty, struktur hierarki berfungsi untuk merepresentasikan proses pengambilan keputusan ke dalam beberapa tingkatan yang terdiri atas tujuan (goal), kriteria, sub-kriteria, dan alternatif keputusan. Melalui penyusunan hierarki, pengambil keputusan dapat memahami keterkaitan antar elemen yang memengaruhi pencapaian tujuan sehingga proses evaluasi dapat dilakukan secara lebih objektif dan terukur (Saaty & Vargas, 2012).

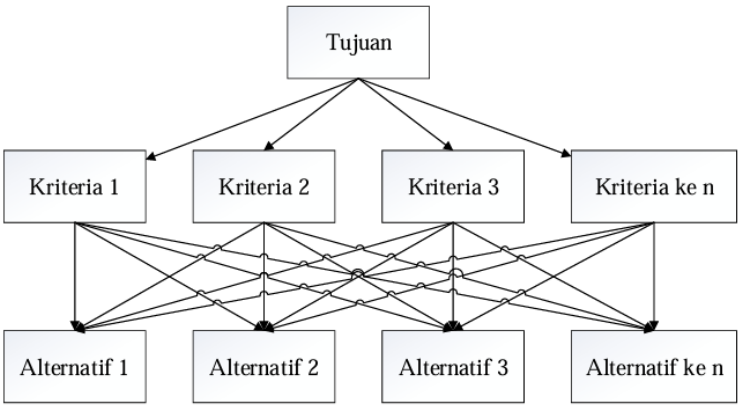
Dalam AHP, tingkat paling atas menunjukkan tujuan utama yang ingin dicapai, sedangkan tingkat berikutnya berisi faktor-faktor yang memengaruhi pencapaian tujuan tersebut. Apabila suatu kriteria masih dapat dijabarkan lebih rinci, maka kriteria tersebut dapat diuraikan kembali menjadi beberapa sub-kriteria. Pada tingkat paling bawah terdapat alternatif yang akan dievaluasi dan diprioritaskan berdasarkan kontribusinya terhadap tujuan yang telah ditetapkan. Saaty dan Vargas (2012), menjelaskan bahwa struktur hierarki yang baik harus mampu menggambarkan hubungan yang logis antar elemen keputusan, sehingga kontribusi setiap elemen pada tingkat yang lebih rendah dapat dinilai terhadap elemen pada tingkat di atasnya.

Pada penelitian ini, struktur hierarki disusun untuk menentukan prioritas risiko keselamatan kerja yang dipengaruhi oleh faktor *Detail Engineering Design* (DED) pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1. Hierarki yang digunakan terdiri atas empat tingkatan, yaitu tujuan (goal), kriteria, sub-kriteria, dan alternatif risiko.

Tingkat pertama merupakan tujuan penelitian, yaitu menentukan prioritas risiko keselamatan kerja berbasis *Detail Engineering Design* pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1. Tingkat kedua terdiri atas empat kriteria utama yang mewakili faktor-faktor DED, yaitu *Design*, *Material*, *Route*, dan metode konstruksi. Pada tingkat ketiga terdapat sub-kriteria yang menjelaskan masing-masing faktor DED secara lebih rinci. Untuk faktor *Design* digunakan sub-kriteria *pressure & maximum allowable operating pressure* (MAOP), *safety system*, dan *temperature*. Sementara itu, faktor *Material* terdiri atas sub-kriteria Strength, Type, dan

Thickness. Adapun faktor *Route* dan metode konstruksi digunakan sebagai faktor penilaian yang secara langsung memengaruhi alternatif risiko. Tingkat keempat merupakan alternatif yang terdiri atas risiko keselamatan kerja hasil identifikasi menggunakan metode HIRADC, yaitu ledakan, kebakaran, tertimbun atau longsor, jatuhnya beban (*dropped object*), tertabrak objek (*struck by object*), *asphyxiation*, dan sengatan listrik.

Penyusunan struktur hierarki tersebut dilakukan untuk menggambarkan hubungan antara faktor-faktor DED dengan risiko keselamatan kerja yang berpotensi muncul selama pelaksanaan konstruksi *pipeline*. Dengan adanya struktur hierarki ini, proses perbandingan berpasangan pada tahap berikutnya dapat dilakukan secara lebih sistematis. Selain itu, bobot prioritas yang dihasilkan diharapkan dapat menggambarkan tingkat pengaruh masing-masing faktor DED terhadap risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.asosiasi SAS-1.



Gambar 2. 2 Hierarki AHP

2.8.2 *Membentuk Matriks Perbandingan Berpasangan (Pairwise comparison).*

Setelah struktur hierarki disusun, tahap berikutnya dalam metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) adalah membentuk matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*). Tahap ini bertujuan untuk menentukan tingkat kepentingan relatif antar elemen yang berada pada level hierarki yang sama terhadap elemen pada level di atasnya. Menurut Saaty (1980), perbandingan berpasangan merupakan inti dari metode AHP karena digunakan untuk mengubah penilaian subjektif pengambil keputusan menjadi nilai numerik yang selanjutnya dapat diolah secara matematis untuk menghasilkan bobot prioritas.

Pada tahap ini, setiap elemen dibandingkan secara berpasangan dengan elemen lainnya berdasarkan kontribusinya terhadap tujuan atau kriteria yang sedang dievaluasi. Hasil penilaian

tersebut kemudian disusun ke dalam matriks perbandingan berpasangan yang menunjukkan tingkat kepentingan relatif antar elemen. Melalui pendekatan ini, pengambil keputusan tidak perlu menilai seluruh elemen secara bersamaan, melainkan cukup membandingkan dua elemen dalam satu waktu. Dengan cara tersebut, proses penilaian menjadi lebih sederhana dan konsisten (Saaty & Vargas, 2012).

Penilaian perbandingan berpasangan dilakukan menggunakan skala fundamental AHP yang dikembangkan oleh Saaty dengan rentang nilai 1 sampai 9. Skala ini digunakan untuk menunjukkan tingkat dominasi atau kepentingan suatu elemen dibandingkan elemen lainnya. Semakin besar nilai yang diberikan, semakin besar pula pengaruh atau tingkat kepentingan elemen tersebut terhadap tujuan yang ingin dicapai.

Tabel 2. 6 Keterangan nilai perbandingan berpasangan

Intensitas Kepentingan	**Keterangan**
1	Kedua elemen sama pentingnya
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting daripada elemen yang lainnya
5	Elemen yang satu lebih penting daripada yang lainnya
7	Satu elemen jelas lebih mutlak penting daripada elemen lainnya
9	Satu elemen mutlak penting daripada elemen lainnya
2, 4, 6, 8	Nilai-nilai antara dua nilai pertimbangan-pertimbangan berdekatan

Perbandingan dilakukan berdasarkan penilaian pengambil keputusan terhadap tingkat kepentingan suatu elemen dibandingkan dengan elemen lainnya. Proses ini dimulai dari level hierarki yang lebih tinggi untuk menentukan tingkat kepentingan setiap kriteria, misalnya kriteria A. Setelah itu, perbandingan dilanjutkan pada elemen-elemen di level berikutnya, seperti A1, A2, dan A3, terhadap kriteria yang menjadi acuannya. Hasil perbandingan antar elemen tersebut kemudian disusun dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*), yang menunjukkan tingkat kepentingan relatif masing-masing elemen. Bentuk matriks perbandingan berpasangan dapat dilihat pada gambar berikut:

Tabel 2. 7 Contoh tabel matriks berpasangan

	A1	A2	A3	A ke-n
A1	1	…	…	…
A2	…	1	…	…
A3	…	…	1	…
A ke-n	…	…	…	1

Dalam penelitian ini, matriks perbandingan berpasangan dibentuk berdasarkan penilaian dari tiga orang *expert* terdiri dari *Manager Production and Operation* (PnO) serta staf *engineering* pada divisi *Production and Operation* yang bertanggungjawab dalam penyusunan *Detail Engineering Design* (DED). Perbandingan dilakukan pada setiap level hierarki, mencakup perbandingan antar kriteria *Detail Engineering Design* (*Design*, *Material*, *Route*, dan Metode), perbandingan antar sub-kriteria pada masing-masing kriteria, serta perbandingan alternatif risiko terhadap setiap sub-kriteria yang digunakan. Seluruh penilaian dari para *expert* kemudian digabungkan menggunakan metode *Geometric mean* untuk menghasilkan satu matriks perbandingan kelompok (*group pairwise comparison matrix*) yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan bobot prioritas. Melalui matriks perbandingan berpasangan tersebut, hubungan tingkat kepentingan antar elemen dalam hierarki dapat dinyatakan secara kuantitatif. Dengan demikian, proses normalisasi, perhitungan bobot prioritas, dan pengujian konsistensi dapat dilakukan pada tahap berikutnya.

2.8.3 *Geometric mean.*

Dalam pengambilan keputusan yang melibatkan lebih dari satu *expert*, diperlukan metode untuk menggabungkan penilaian individu menjadi satu penilaian kelompok yang dapat mewakili keseluruhan pendapat para *expert*. Pada metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP), penggabungan tersebut umumnya dilakukan melalui pendekatan *Aggregation of Individual Judgements* (AIJ), yaitu dengan menggabungkan seluruh nilai perbandingan berpasangan yang diberikan oleh masing-masing *expert* sebelum dilakukan perhitungan bobot prioritas (Saaty & Vargas, 2012).

Menurut Saaty dan Vargas (2012), penggabungan penilaian dalam AIJ dilakukan menggunakan *Geometric mean* karena skala perbandingan berpasangan pada AHP bersifat rasio (*ratio scale*). Dibandingkan dengan rata-rata aritmatika, rata-rata geometrik lebih sesuai digunakan karena mampu mempertahankan sifat resiprokal (*reciprocal property*) pada matriks perbandingan berpasangan. Selain itu, *Geometric mean* juga dapat mengurangi pengaruh nilai yang terlalu ekstrem dari salah satu *expert*, sehingga hasil penggabungan penilaian lebih mampu merepresentasikan pandangan kelompok secara keseluruhan. Secara matematis, *Geometric mean* merupakan akar pangkat n dari hasil perkalian seluruh nilai penilaian yang diberikan oleh n orang *expert*. Apabila jumlah *expert* yang terlibat sebanyak n orang, maka nilai *Geometric mean* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$GM = \sqrt[n]{X_1 \times X_2 \times X_3} \times \ldots \times X_i$$

Keterangan:
$GM = geometric\ mean$
$X_i =$ nilai penilaian *expert* ke-i
$n =$ jumlah *expert*

Hasil perhitungan *Geometric mean* digunakan sebagai nilai akhir dalam matriks perbandingan berpasangan kelompok (*group pairwise comparison matrix*). Nilai tersebut kemudian menjadi dasar untuk proses normalisasi matriks, perhitungan bobot prioritas (*priority weight*), serta pengujian konsistensi dalam metode AHP.

Dalam penelitian ini, penilaian perbandingan berpasangan diperoleh dari tiga orang *expert* yang memiliki kompetensi di bidang *engineering*, konstruksi, dan *Health, Safety, and Environment* (HSE). Seluruh penilaian tersebut digabungkan menggunakan *Geometric mean* untuk menghasilkan satu matriks keputusan kelompok yang mewakili penilaian bersama para *expert* terhadap pengaruh faktor *Detail Engineering Design* (DED) terhadap risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.

2.8.4 *Normalisasi Matriks Perbandingan.*

Telah diperoleh matriks perbandingan berpasangan dari hasil penggabungan penilaian seluruh *expert* menggunakan metode *Geometric mean*, tahap berikutnya adalah melakukan normalisasi matriks. Normalisasi merupakan proses mengubah nilai-nilai pada matriks perbandingan berpasangan ke dalam bentuk proporsi sehingga seluruh elemen dapat dibandingkan pada skala yang sama. Menurut Saaty (1980), tahap ini dilakukan untuk mempermudah perhitungan bobot prioritas (*priority weight*) yang menggambarkan tingkat kepentingan relatif masing-masing elemen dalam hierarki. Proses normalisasi dilakukan dengan membagi setiap elemen dalam suatu kolom dengan jumlah seluruh nilai pada kolom tersebut. Dengan cara ini, total nilai pada setiap kolom menjadi satu sehingga kontribusi relatif masing-masing elemen dapat diketahui dan digunakan sebagai dasar dalam tahap perhitungan berikutnya (Saaty & Vargas, 2012). Rumus normalisasi matriks dapat dituliskan sebagai berikut:

$$a_{ij}^{norm} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}}$$

Keterangan:

$a_{ij}^{norm} =$ nilai hasil normalisasi

$a_{ij} =$ nilai pada matriks perbandingan berpasangan

$\Sigma a_{ij} =$ jumlah seluruh nilai pada kolom ke-j

$n =$ jumlah elemen yang dibandingkan

Hasil normalisasi membentuk matriks baru yang menunjukkan kepentingan relatif masing-masing elemen terhadap elemen lainnya. Nilai pada matriks normalisasi berada pada rentang 0 hingga 1. Semakin besar nilai yang diperoleh, semakin besar kontribusi elemen tersebut dalam mendukung pencapaian tujuan keputusan. Matriks normalisasi selanjutnya digunakan untuk menghitung *priority weight* atau bobot prioritas dengan cara mencari rata-rata nilai pada setiap baris matriks. Bobot yang diperoleh mencerminkan tingkat kepentingan relatif masing-masing elemen dalam hierarki. Oleh karena itu, tahap normalisasi menjadi bagian yang penting karena hasilnya akan memengaruhi nilai bobot yang digunakan dalam proses penentuan prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.

2.8.5 *Perhitungan priority weight.*

Setelah matriks perbandingan berpasangan dinormalisasi, tahap berikutnya dalam metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) adalah menghitung *priority weight* atau bobot prioritas. Bobot prioritas merupakan nilai yang menunjukkan tingkat kepentingan relatif setiap elemen dalam suatu level hierarki terhadap tujuan yang ingin dicapai. Menurut Saaty (1980), bobot ini diperoleh dari hasil sintesis penilaian perbandingan berpasangan dan digunakan sebagai dasar untuk menentukan urutan prioritas dalam pengambilan keputusan. Perhitungan *priority weight* dilakukan dengan mencari rata-rata nilai pada setiap baris matriks normalisasi. Nilai rata-rata tersebut merepresentasikan *eigenvector approximation* yang menggambarkan kontribusi relatif masing-masing elemen terhadap tujuan keputusan (Saaty & Vargas, 2012). Dengan kata lain, bobot yang diperoleh menunjukkan seberapa besar pengaruh suatu elemen dibandingkan elemen lainnya dalam hierarki yang sama. Semakin besar nilai bobotnya, semakin tinggi pula tingkat kepentingan elemen tersebut. Rumus perhitungan *priority weight* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$W_i = \frac{\Sigma_j^n a'_{ij}}{n}$$

Keterangan

$W_i =$ bobot prioritas elemen ke-i

$a'_{ij} =$ nilai hasil normalisasi pada baris ke-i dan kolom ke-j

$n =$ jumlah elemen yang dibandingkan

Bobot prioritas yang diperoleh selanjutnya diuji menggunakan *Consistency Ratio* (CR) untuk memastikan bahwa penilaian yang diberikan oleh para *expert* telah memenuhi tingkat konsistensi yang dapat diterima. Setelah hasil penilaian dinyatakan konsisten, bobot tersebut digunakan dalam perhitungan prioritas global untuk menentukan urutan prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.

Dengan demikian, perhitungan *priority weight* menjadi salah satu tahapan penting dalam AHP karena menghasilkan nilai kuantitatif yang menunjukkan tingkat pengaruh masing-masing elemen terhadap tujuan penelitian. Hasil bobot ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan risiko keselamatan kerja yang perlu diprioritaskan, sehingga upaya pengendalian dapat dilakukan secara lebih tepat dan efektif.

2.8.6 *Perhitungan consistency ratio.*

Salah satu keunggulan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) adalah kemampuannya untuk mengukur tingkat konsistensi penilaian yang diberikan oleh pengambil keputusan. Dalam praktiknya, penilaian melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) sering kali mengandung unsur subjektivitas, sehingga kemungkinan terjadinya inkonsistensi tetap ada. Oleh karena itu, pengujian konsistensi diperlukan untuk memastikan bahwa penilaian yang diberikan masih berada dalam batas yang dapat diterima dan layak digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan (Saaty, 1980).

Menurut Saaty (1980), suatu matriks perbandingan berpasangan dikatakan konsisten apabila hubungan antar elemen di dalamnya bersifat logis. Sebagai contoh, jika elemen A dinilai lebih penting daripada B dan elemen B lebih penting daripada C, maka secara logis elemen A juga harus lebih penting daripada C. Namun, dalam praktiknya penilaian yang diberikan oleh *expert* tidak selalu mengikuti hubungan tersebut secara sempurna. Karena itu, diperlukan pengujian menggunakan *Consistency Ratio* (CR) untuk mengetahui tingkat konsistensi dari penilaian yang telah diberikan. Perhitungan *Consistency Ratio* dilakukan setelah diperoleh bobot prioritas (*priority weight*) dari masing-masing elemen. Pengujian ini mencakup beberapa tahapan, yaitu perhitungan Weighted Sum Vector, nilai eigen maksimum (λ_{max}), *Consistency Index* (CI), dan *Consistency Ratio* (CR).

1. Menghitung weighted sum vector

Pada tahap pertama, matriks perbandingan berpasangan dikalikan dengan vektor bobot prioritas yang telah diperoleh sebelumnya.

$$WSV = A \times W$$

Keterangan
$WSV = Weighted\ Sum\ Vector$
$A =$ matriks perbandingan berpasangan
$W =$ vektor bobot prioritas

2. Menghitung nilai eigen maksimum

Nilai *Weighted Sum Vector* kemudian dibagi dengan bobot prioritas yang bersesuaian. Nilai hasil pembagian tersebut selanjutnya dijumlahkan dan di rata-ratakan untuk memperoleh nilai eigen maksimum (λ_{max}).

$$\lambda_{max} = \frac{\Sigma(\frac{WSV_i}{W_i})}{n}$$

Keterangan
$\lambda_{max} =$ nilai eigen maksimum
$WSV_i =$ nilai *Weighted Sum Vector* ke-i
$W_i =$ bobot prioritas ke-i
$n =$jumlah elemen yang dibandingkan

Nilai λ_{max} digunakan untuk mengetahui sejauh mana tingkat konsistensi dalam matriks perbandingan berpasangan.

3. Menghitung consistency index

Setelah diperoleh nilai eigen maksimum (λ_{max}), tahap selanjutnya adalah menghitung *Consistency Index* (CI) menggunakan rumus berikut.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Keterangan
$CI = Consistency\ Index$
$\lambda_{max} =$ nilai eigen maksimum
$n =$ jumlah elemen yang dibandingkan

Nilai CI digunakan untuk menunjukkan tingkat konsistensi dari matriks perbandingan berpasangan yang telah disusun.

4. Menghitung *Consistency Ratio*

Setelah nilai CI diperoleh, *Consistency Ratio* (CR) dihitung dengan membandingkannya terhadap nilai Random Index (RI).

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Keterangan

$CR = Consistency\ Ratio$

$CI = Consistency\ Index$

$RI = Random\ Index$

Nilai Random Index (RI) merupakan nilai acuan yang dikembangkan oleh Saaty melalui simulasi sejumlah matriks perbandingan berpasangan acak dengan berbagai ukuran.

Tabel 2. 8 Nilai RI

N	1,2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.57	1.58

2.8.7 *Perhitungan prioritas global.*

Perhitungan prioritas global merupakan tahap akhir dalam metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang dilakukan untuk memperoleh bobot akhir dari setiap alternatif terhadap tujuan penelitian. Nilai prioritas global diperoleh dengan menggabungkan bobot pada setiap tingkat hierarki, mulai dari bobot kriteria, bobot sub-kriteria, hingga bobot alternatif. Hasil perhitungan ini menunjukkan tingkat kepentingan relatif masing-masing alternatif dan dapat digunakan sebagai dasar dalam proses pengambilan keputusan (Saaty, 1980; Saaty & Vargas, 2012).

Pada penelitian ini, alternatif yang dimaksud adalah risiko keselamatan kerja yang telah diidentifikasi menggunakan metode HIRADC. Sementara itu, kriteria dan sub-kriteria disusun berdasarkan faktor-faktor *Detail Engineering Design* (DED) yang berpotensi memengaruhi munculnya risiko tersebut. Perhitungan prioritas global dilakukan setelah seluruh bobot lokal (local priority) diperoleh dan setiap matriks perbandingan berpasangan dinyatakan memenuhi persyaratan konsistensi. Nilai prioritas global dihitung dengan mengalikan bobot alternatif dengan bobot sub-kriteria dan bobot kriteria yang berada pada jalur hierarki yang sama. Dengan kata lain, bobot akhir suatu alternatif merupakan hasil akumulasi pengaruh dari seluruh elemen yang berada di atasnya dalam struktur hierarki. Secara matematis, perhitungan prioritas global dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$PG_i = \sum_{j=1}^{m} (W_{K_j} \times W_{SK_j} \times W_{A_{ij}})$$

Keterangan

PG_i = prioritas global alternatif ke-i
W_{K_j} = bobot kriteria ke-j
W_{SK_j} = bobot sub-kriteria ke-j
$W_{A_{ij}}$ = bobot alternatif ke-I pada sub kriteria ke-j
m = jumlah sub-kriteria

Hasil perhitungan prioritas global selanjutnya diurutkan dari nilai tertinggi hingga terendah untuk memperoleh peringkat risiko keselamatan kerja. Risiko yang memiliki nilai prioritas global paling tinggi menunjukkan bahwa risiko tersebut memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap tujuan penelitian, sehingga perlu menjadi fokus utama dalam upaya pengendalian. Sebaliknya, risiko dengan nilai prioritas global yang lebih rendah memiliki tingkat prioritas yang lebih kecil dalam proses pengambilan keputusan.

Dalam penelitian ini, hasil prioritas global digunakan untuk menentukan urutan prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1. Penentuan prioritas tersebut didasarkan pada pengaruh faktor *Detail Engineering Design* (DED) terhadap masing-masing risiko yang telah diidentifikasi. Dengan demikian, hasil yang diperoleh dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi pengendalian risiko yang lebih efektif, terarah, dan sesuai dengan tingkat prioritasnya.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Subjek Penelitian

Subjek penelitian ini adalah personel yang terlibat serta memiliki pemahaman terhadap proses perencanaan teknis pada pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1 di PT Sele Raya Belida. Subjek penelitian terdiri dari *Manager Production and Operation* (PnO) serta tiga staf *engineering* pada divisi *Production and Operation* yang bertanggungjawab dalam penyusunan *Detail Engineering Design* (DED).

3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1 yang dikembangkan oleh PT Sele Raya Belida. Proyek tersebut merupakan bagian dari upaya monetisasi gas ikutan yang berasal dari Sumur Sungai Anggur Selatan-1, dengan panjang jalur pipa sekitar ±2,1 km yang menghubungkan fasilitas produksi menuju Lapangan Cantik. Penelitian ini difokuskan pada tahap *engineering* dalam siklus proyek *Engineering, Procurement, Construction, and Installation* (EPCI), khususnya pada tahap *Detail Engineering Design* (DED). Pemilihan fokus pada tahap ini didasarkan pada pertimbangan bahwa keputusan desain yang dihasilkan pada fase DED akan menjadi acuan utama dalam pelaksanaan konstruksi. Selain itu, tahap ini juga memiliki peran yang cukup besar dalam mempengaruhi munculnya potensi risiko keselamatan kerja di lapangan.

3.3 Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua kategori:

1. Data Primer
   - Wawancara dengan divisi *Production and Operation* bertanggungjawab dalam penyusunan *Detail Engineering Design* (DED).
   - Penilaian tingkat kemungkinan (*likelihood*) dan dampak (*severity*) risiko berdasarkan pengalaman dan pertimbangan ahli.
   - Data perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) untuk pembobotan kriteria.
2. Data Sekunder

- Dokumen *Detail Engineering Design* (DED) pada proyek pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.
- Dokumen standar dan regulasi terkait keselamatan kerja di industri minyak dan gas bumi.

3.4 Pengumpulan Data

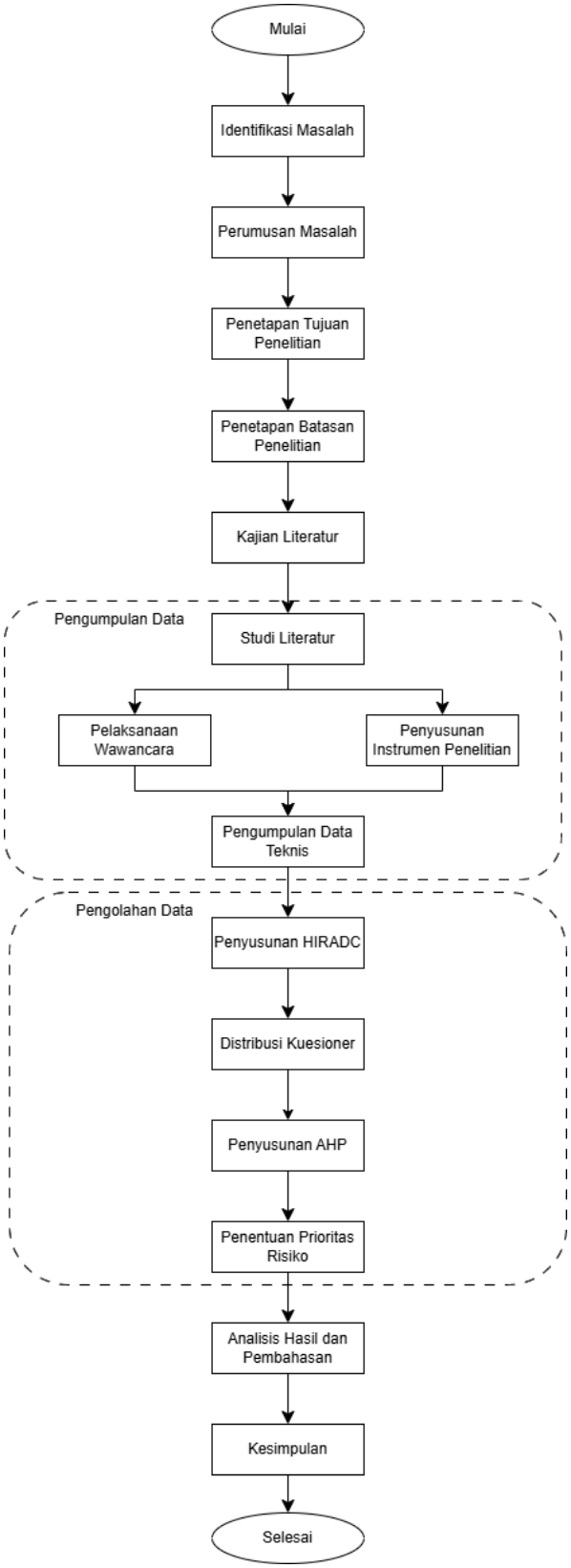
Hasil penilaian tingkat risiko menggunakan metode HIRADC menunjukkan bahwa dari 16 risiko yang teridentifikasi, sebanyak 10 risiko termasuk dalam kategori *Medium Risk*, yaitu jatuhnya beban, tertabrak objek terangkat, longsor *trench*, runtuhnya dinding galian, kebakaran atau ledakan saat *welding*, penyalaan, kebocoran gas, paparan radiasi, *rupture* pipa, dan pelepasan gas. Sedangkan 6 risiko berada pada kategori *High Risk*, yaitu ketidakstabilan *trench*, sengatan listrik, pelepasan tekanan mendadak, *overpressure system*, *loss of containment*, dan lonjakan tekanan. Penilaian tersebut juga menunjukkan bahwa tidak terdapat risiko yang termasuk dalam kategori *Low Risk* maupun *Extreme Risk*. Pengumpulan data penelitian dilakukan melalui beberapa metode, sebagai berikut:

1. Observasi
   - Mengkaji dokumen apa saja yang menjadi aktivitas kerja yang berpotensi meninmbulkan risiko keselamatan kerja.
   - Memahami keterkaitan antara kondisi lapangan dengan dokumen *Detail Engineering Design*.
2. Wawancara
   - Melakukan wawancara dengan tenaga ahli atau pihak yang terlibat dalam proyek, terdiri dari *Manager Production and Operation* (PnO) serta staf *engineering* pada divisi *Production and Operation*.
   - Menggali informasi terkait potensi bahaya dan risiko berdasarkan pengalaman praktis di lapangan.
   - Memperoleh penilaian terhadap tingkat kemungkinan (*likelihood*) dan dampak (*severity*) risiko.
   - Mengumpulkan data untuk pembobotan kriteria.
   - Melakukan validasi terhadap hasil identifikasi dan analisis risiko.
3. Studi Dokumen

- Mengkaji dokumen *Detail Engineering Design* (DED) sebagai dasar perencanaan teknis proyek.
- Mengumpulkan data spesifikasi teknis pipa, metode kerja, serta tahapan aktivitas proyek.
- Mengkaji standar regulasi terkait keselamatan kerja di industri minyak dan gas bumi.
- Menggunakan literatur pendukung terkait metode HIRADC dan AHP.

3.5 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur penelitian, sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Alur penelitian

Berikut merupakan penjelasan dari alur penelitian:

1. Mulai

   Tahap mulai merupakan tahap awal penelitian yang menandai dimulainya proses penyusunan penelitian terkait analisis risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.

2. Identifikasi Masalah

   Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap permasalahan yang muncul pada proyek pembangunan *pipeline* gas, khususnya yang berkaitan dengan potensi bahaya dan risiko keselamatan kerja yang dipengaruhi oleh aspek *Detail Engineering Design* (DED). Identifikasi dilakukan berdasarkan kondisi proyek, dokumen *engineering*, hasil studi HAZID, serta kondisi aktual di lapangan.

3. Perumusan Masalah

   Tahap perumusan masalah dilakukan untuk menentukan fokus penelitian agar pembahasannya lebih jelas dan terarah. Rumusan masalah disusun berdasarkan hasil identifikasi masalah yang berkaitan dengan identifikasi risiko, tingkat risiko, dan prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan *pipeline*.

4. Penetapan Tujuan Penelitian

   Pada tahap ini ditetapkan tujuan penelitian yang ingin dicapai, yaitu mengidentifikasi risiko keselamatan kerja yang berkaitan dengan aspek desain, menganalisis tingkat risiko menggunakan metode HIRADC, serta menentukan prioritas risiko menggunakan metode AHP.

5. Penetapan Batasan Penelitian

   Tahap ini dilakukan untuk membatasi ruang lingkup penelitian agar pembahasan tidak terlalu luas. Penelitian difokuskan pada risiko keselamatan kerja pada tahap konstruksi yang dipengaruhi oleh aspek *Detail Engineering Design* (DED), dan tidak membahas aspek finansial, penjadwalan proyek, maupun analisis mekanik perpipaan secara rinci.

6. Kajian Literatur

   Kajian literatur dilakukan dengan mengumpulkan teori, standar, regulasi, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan manajemen risiko, sistem K3LL migas, metode HIRADC, metode AHP, dan pembangunan *pipeline* gas. Tahap ini digunakan sebagai dasar teoritis untuk mendukung proses analisis penelitian.

7. Studi Literatur

   Studi literatur dilakukan untuk memperoleh referensi pendukung terkait metode penelitian, standar keselamatan kerja, regulasi migas, serta teori mengenai identifikasi dan analisis risiko pada proyek *pipeline*.

8. Pelaksanaan Wawancara

   Wawancara dilakukan kepada pihak-pihak yang memahami proyek, seperti engineer, supervisor, HSE, maupun personel yang terlibat dalam pembangunan *pipeline*. Tujuan dari wawancara ini adalah memperoleh informasi mengenai aktivitas konstruksi, potensi bahaya, kondisi lapangan, serta validasi terhadap risiko yang telah diidentifikasi.

9. Penyusunan Instrumen Penelitian

   Pada tahap ini disusun instrumen penelitian berupa format HIRADC, daftar pertanyaan wawancara, serta kuesioner AHP yang digunakan untuk memperoleh penilaian *pairwise comparison* dari responden ahli.

10. Pengumpulan Data Teknis

    Tahap ini dilakukan dengan mengumpulkan data teknis proyek, seperti data desain *pipeline*, diameter dan ketebalan pipa, tekanan operasi dan MAOP, *Material* pipa, jalur *pipeline*, aktivitas konstruksi, dokumen DED, hasil studi HAZID, serta standar dan regulasi terkait. Data tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses identifikasi dan analisis risiko.

11. Penyusunan HIRADC

    Tahap ini merupakan proses identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan penentuan pengendalian risiko menggunakan metode HIRADC. Risiko diidentifikasi berdasarkan aktivitas konstruksi yang dipengaruhi oleh aspek DED, seperti *trenching*, *lifting*, *welding*, *hydrotest*, dan *commissioning*. Penilaian risiko dilakukan dengan menentukan *severity*, *likelihood* , dan tingkat risiko. Setelah itu, dilakukan penentuan pengendalian berdasarkan hierarki pengendalian risiko, yaitu eliminasi, substitusi, *engineering* control, administrative control, dan penggunaan alat pelindung diri (APD).

12. Distribusi Kuesioner

    Kuesioner AHP didistribusikan kepada responden ahli yang memahami aspek *engineering*, konstruksi *pipeline*, dan keselamatan kerja. Kuesioner ini digunakan untuk memperoleh

nilai perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) antar kriteria, sub-kriteria, maupun alternatif risiko.

13. Penyusunan AHP

    Tahap ini dilakukan untuk menentukan prioritas risiko menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Struktur hierarki disusun terdiri dari *goal* berupa prioritas risiko keselamatan kerja, kriteria berupa faktor DED seperti *Design*, *Material*, *Route*, dan metode konstruksi, sub-kriteria dari masing-masing faktor DED, serta alternatif berupa risiko hasil HIRADC. Selanjutnya dilakukan proses *pairwise comparison*, normalisasi matriks, perhitungan eigen vector, dan pengujian *Consistency Ratio* (CR).

14. Penentuan Prioritas Risiko

    Hasil perhitungan AHP digunakan untuk menentukan urutan prioritas risiko berdasarkan bobot global, mulai dari yang tertinggi hingga terendah. Risiko dengan nilai prioritas tertinggi kemudian menjadi fokus utama dalam rekomendasi pengendalian risiko.

15. Analisis Hasil dan Pembahasan

    Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil HIRADC dan AHP untuk mengetahui risiko dominan, pengaruh aspek DED terhadap risiko keselamatan kerja, tingkat risiko aktivitas konstruksi, serta hubungan antara desain dan keselamatan kerja pada proyek *pipeline*. Hasil penelitian kemudian dibandingkan dengan teori, standar, dan penelitian terdahulu.

16. Kesimpulan

    Tahap ini berisi kesimpulan penelitian berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan sekaligus menjawab rumusan masalah penelitian.

17. Selesai

    Tahap selesai merupakan tahap akhir yang menandai bahwa seluruh rangkaian penelitian telah selesai dilakukan.

BAB IV
PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Profil Pembangunan Pipa Gas

Sumur Sungai Anggur Selatan-1 mulai beroperasi pada 7 November 2023 dengan laju produksi awal sebesar 1.221 BOPD dan produksi gas sebesar 1.164 MSCFD. Fluida yang dihasilkan dari sumur ini memiliki kandungan *Basic Sediment and Water* (BS&W) sebesar 0% serta nilai *Gas-Oil Ratio* (GOR) sebesar 954 SCF/STB. Saat ini, gas yang dihasilkan dari sumur SAS-1 sebagian besar masih dialirkan ke sistem *flare* sebagai gas buang. Sementara itu, sebagian lainnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar (*own use gas*) untuk mengoperasikan *Gas Engine Generator* dengan kapasitas 250 KVA di fasilitas produksi tersebut. Dalam upaya meningkatkan pemanfaatan sumber daya, PT Sele Raya Belida (SRB) merencanakan monetisasi gas ikutan dengan menyalurkannya ke titik *Tie-in* pada sistem *Gas Orifice Meter* yang berada di fasilitas produksi Lapangan Cantik. Selanjutnya, gas tersebut akan dialirkan melalui pipa transmisi gas alam berdiameter 14 inci yang dioperasikan oleh PT Pertamina Gas. Sejalan dengan rencana tersebut, SRB perlu membangun pipa penyalur gas ikutan berdiameter 4 inci dengan panjang sekitar 2,1 km yang menghubungkan fasilitas produksi sumur SAS-1 dengan titik *Tie-in* pada sistem Gas Orifice Meter di Lapangan Cantik. Pelaksanaan pekerjaan konstruksi ini direncanakan akan dilakukan oleh PT Grigora Jagra Persada (GJP) sebagai kontraktor pelaksana.

4.2 Pengumpulan Data

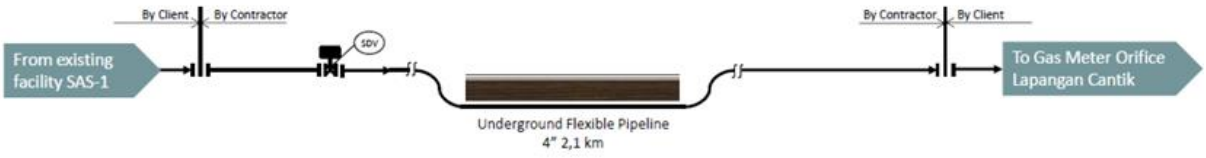
Di bagian ini dijelaskan proses pengumpulan data yang digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1.

4.2.1 *Data teknis pipa dan standar regulasi.*

Data teknis *pipeline* pada penelitian ini diperoleh dari beberapa dokumen utama, yaitu *Process Design Basis, Topography Report*, dan dokumen manufaktur pipa. Dari sana, parameter yang dikumpulkan mencakup diameter pipa, ketebalan dinding, tekanan operasi, tekanan uji (*test pressure*), serta kedalaman penanaman pipa. Dilihat dari spesifikasinya, *pipeline* ini dirancang dengan *Maximum Allowable Operating Pressure* (MAOP) sebesar 650 psi, sementara tekanan ujinya mencapai 1392,36 psi. Selain itu, pipa ditanam dengan kedalaman lebih dari 1 meter. Di

bagian ini, fungsinya cukup krusial, yaitu untuk melindungi pipa dari potensi kerusakan akibat aktivitas eksternal di permukaan.

Berdasarkan data teknis tersebut, dibutuhkan acuan yang jelas dan sistematis supaya desain dan kondisi operasional *pipeline* tidak hanya memenuhi aspek teknis, tapi juga selaras dengan persyaratan keselamatan serta regulasi yang berlaku. Karena itu, analisis dalam penelitian ini mengacu pada beberapa standar yang relevan di bidang perpipaan gas. Standar utama yang digunakan antara lain ASME B31.8 untuk sistem transmisi gas, API SPEC 15S untuk pipa RTP, serta SNI 3473 untuk sistem distribusi gas di Indonesia. Selain itu, aspek keselamatan kerja juga mengacu pada Peraturan Menteri ESDM No. 32 Tahun 2021 yang mengatur inspeksi teknis dan keselamatan instalasi migas. Standar-standar tersebut kemudian dijadikan dasar dalam mengidentifikasi potensi bahaya sekaligus mengevaluasi tingkat risiko pada setiap aktivitas konstruksi *pipeline*. Berikut merupakan data teknis *pipeline* dan standar regulasi yang digunakan sebagai dasar dalam analisis serta evaluasi aspek keselamatan dan kesesuaian sistem perpipaan:



Gambar 4. 1 Blok diagram

Table 4. 1 Desain data pipa

No	Deskripsi	Unit	Data	Referensi
1	*Service*		Gas	*Process Design Basis*
2	*Design Code*		API SPEC 15S & ASME	*Process Design Basis*
3	Lokasi		Desa Melilian, Kecamatan Gelumbang, Kabupaten	*Process Design Basis*
4	Koordinat Bentang		@-3.252775,104.4120634,5445m	*Topography Design*
5	Manufaktur		Jiaxing Subsea *Engineering* Products (SPE) Co., Ltd.	*Line Pipe Manufacturing*
6	Perlindungan Pipa		*Polyester Tape*	*Line Pipe Manufacturing Doc.*

No	Deskripsi	Unit	Data	Referensi
7	Piranti Pengaman	*1 unit Shutdown Valve*		PID
8	Tahun Dibuat/Digunakan	2025/2026		*Line Pipe Manufacturing Doc.*
9	Spesifikasi *Material*	*Reinforced Thermoplastic Pipe & Carbon Steel*		*Line Pipe Manufacturing Doc.*
10	*Outside Diameter* (RTP) *Outside Diameter (CS)*	Inch (mm)	5.07 (128.9) 4.49 (114.3)	*Line Pipe Manufacturing Doc.*
11	*Length*	Feet (m)	6889.74 (2100)	*Topography Report*
12	*Corrosion Allowance* (*Steel Pipe)*	Inch (mm)	0.11 (3.00)	*Wall Thickness Calc Doc.*
13	*Original thickness* (RTP) *Original thickness* (CS)	Inch (mm)	RTP = 0.279 (7.11) CS = 0.294 (7.49)	*Wall Thickness Calc Doc.*
14	SMYS (*Carbon Steel)*	Psi (kg/ cm^2	RTP = 35000 (2460.74) CS = 35000 (2460.74)	*Line Pipe Manufacturing Doc.*
15	*Design Pressure*	Psi (kg/ cm^2	650 (45.69)	*Process Design Basis*
16	*Operating Pressure*	Psi (kg/ cm^2	530-580 (37.26-40.77)	*Process Design Basis*
17	*Fluid Service Density*	kg/cm^3	0.668	*Process Design Basis*
18	*Flowrate*	MMSCDF	5.5	*Process Design Basis*
19	*Burial Depth*	(m)	>1 meter	*Construction Procedure*
20	*Roughness Pipeline* (RTP) *Roughness Pipeline* (CS)	mm	0.0015 0.045	*Line Pipe Manufacturing Doc.*
21	*Test Pressure*	Psi (kg/ cm^2	1392.36	*Line Pipe Manufacturing Doc.*

No	Deskripsi	Unit	Data	Referensi
22	*Design Temperature*	ºC (ºF)	60 (140)	*Process Design Basis*
23	*Operating Pressure*	ºC (ºF)	32-48 (90-120)	*Process Design Basis*
24	MAOP*	Psi (kg/ cm^2	650 (45.69)	*Process Design Basis*

Table 4. 2 Desain data RTP

No	Deskripsi	Spesifikasi *Material*	Code & Standard
1	18.20 mm (WT) 128.9 mm (OD) 1763 m (Length)	HDPE YGH041T	API SPEC 15S

Table 4. 3 Desain data *carboon steel*

No	Deskripsi	Spesifikasi *Material*	Code & Standard
1	7.49 mm (WT) 128.9 mm (OD) 49 m (Length)	A 106 Gr. B	ASME B31.8

Table 4. 4 Code standar

No	Document Number	Documen Title
1	SNI 3473	Sistem Pepipaan Transmisi dan Distribusi Gas
2	ASME B31.8	Gas Transmission & Distribution Piping System
3	ASME B31G	Manual for Determining the Reamining Strenght of Corroded *Pipeline*s
4	ISO 4437	Plastic Pipping Systems for the Supply of Gaseous Fuels – Polyethylene (PE)
5	API SPEC 15S	Spoolable Reinforced Plastic Line Pipe
6	API RP 571	Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry
7	ASME PCC-3	*Inspection* Planning Using Risk – Based Methods

4.3 Identifikasi Bahaya dan Risiko

4.3.1 *Identifikasi bahaya.*

Identifikasi bahaya pada penelitian ini diawali dengan pendekatan HAZID untuk menyusun daftar awal potensi bahaya di setiap aktivitas konstruksi. Setelah itu, analisis diperdalam menggunakan prinsip HAZOP, terutama untuk melihat kemungkinan penyimpangan kondisi operasi beserta penyebab teknis di baliknya. Dengan cara ini, identifikasi bahaya tidak berhenti di level aktivitas saja. Analisis juga ikut mempertimbangkan aspek desain, *Material*, hingga

metode konstruksi yang digunakan, sehingga gambaran risikonya jadi lebih menyeluruh. Berikut ini merupakan hasil identifikasi bahaya pada proyek pembangunan pipa penyalur gas:

Table 4. 5 Identifikasi bahaya dan risiko

Kategori Aktivitas	**Aktivitas**	**Identifikasi Bahaya**	**Potensi Risiko**
Lifting operation	*Lifting spool*	Beban jatuh	Jatuhnya beban
	Lifting area	Tertabrak beban	Tertabrak objek terangkat
Trenching / Excavation	Penggalian *trench*	Tanah labil	Longsor *trench*
	Material trench	Penempatan spoil tidak aman	Runtuhnya dinding galian
	Cuaca buruk	Kondisi tanah berubah	Ketidakstabilan *trench*
Welding / Hot work	*Welding pipeline*	Gas mudah terbakar	Kebakaran / ledakan saat *welding*
	Cutting pipeline	Percikan api	Penyalaan
	Electrical	Kontak listrik	Sengatan listrik
Installation	*Tie-in*	Kegagalan isolasi	Kebocoran gas
	Isolation	*Trapped pressure*	Pelepasan tekanan mendadak
Inspection	Inspeksi NDT	Sinar x atau gamma	Paparan radiasi
Pre-commissioning	*Hydrotest*	Tekanan tinggi	Rapture pipa
	Leak test	Kebocoran gas	Pelepasan gas
Commissioning	*Gas-in*	Tekanan berlebih	*Overpressure system*
	Commissioning	Kebocoran *flange*	*Loss of containment*
	Pigging	*Pressure surge*	*Lonjakan tekanan*

4.3.2 *Penilaian risiko.*

Penilaian risiko dilakukan menggunakan metode HIRADC dengan mempertimbangkan dua aspek utama, yaitu tingkat keparahan (*severity*) dan kemungkinan terjadinya (*likelihood*). Nilai risiko diperoleh dari hasil perkalian kedua parameter tersebut, lalu diklasifikasikan ke dalam kategori rendah, sedang, tinggi, dan ekstrim.

Table 4. 6 Penilaian risiko

Kategori Aktivitas	**Potensi Risiko**	**Risiko**	***Severity***	***Likelihood***	**Level Rank**
	Jatuhnya beban	Kematian	3	2	M

Kategori Aktivitas	Potensi Risiko	Risiko	*Severity*	*Likelihood*	Level Rank
Lifting operation	Tertabrak objek terangkat	Cedera	3	2	M
Trenching / Excavation	Longsor *trench*	Tertimbun	3	2	M
	Runtuhnya dinding galian	Cedera	3	2	M
	Ketidakstabilan *trench*	Kecelakaan	4	3	H
Welding / Hot work	Kebakaran / ledakan saat *welding*	Ledakan	3	3	M
	Penyalaan	Kebakaran	4	2	M
	Sengatan listrik	Cedera	5	2	H
Installation	Kebocoran gas	*Asphyxiation*	3	2	M
	Pelepasan tekanan mendadak	Ledakan	3	5	H
Inspection	Paparan radiasi	Cedera	3	2	M
Pre-commissioning	Rapture pipa	Ledakan	4	2	M
	Pelepasan gas	Ledakan	3	2	M
Commissioning	*Overpressure* system	Ledakan	5	3	H
	Loss of containment	Ledakan	5	2	H
	Lonjakan tekanan	Ledakan	5	2	H

4.3.3 *Penentuan pengendalian risiko.*

Penentuan tindakan pencegahan dalam pengendalian risiko pada dasarnya adalah proses memilih dan menerapkan langkah-langkah yang tepat untuk meminimalkan, atau kalau memungkinkan, menghilangkan potensi bahaya dalam suatu aktivitas maupun lingkungan kerja. Pengendalian risiko ditetapkan dengan mengacu pada hierarki pengendalian dalam ISO 45001, mulai dari eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administratif, hingga penggunaan alat pelindung diri (APD). Berikut ini merupakan langkah-langkah pencegahan yang disusun berdasarkan hasil analisis risiko yang telah dilakukan:

Table 4. 7 Pengendalian risiko

Kategori Aktivitas	Aktivitas	*Determining Control*
Lifting operation	*Lifting spool*	*Eliminitation*: menghilangkan kebutuhan *lifting* dengan *modular fabrication* (*prefabrication*) (Savukaitis et al., 2021a).
	Lifting area	

Kategori Aktivitas	**Aktivitas**	***Determining Control***
		Subsitution: mengganti *crane* konvensional dengan alat *lifting* lebih stabil seperti *pipe handler* (Taghaddos et al., 2018). *Engineering controls*: membuat JMP (*journey management plan*) transportasi RTP reel atau rigging plan *engineering* (MinayHashemi et al., 2020) *Administrative controls*: *lifting plan* & pmt, sertifikasi *rigger* & *crane operator*, *toolbox meeting*, *exclusion zone* (Zhang & Pan, 2020) (Bíl et al., 2018). PPE: *helmet*, *safety shoes*, *gloves*, *High visibility vest* (ISO 45001:2018; OSHA PPE)
Trenching / Excavation	Penggalian *trench*	*Eliminitation*: menghindari pekerjaan *open trench* dengan menggunakan *Horizontal Directional Driling* (HDD) (Yan et al., 2018). *Subsitution*: mengganti metode *open trench* dengan *trench technology* (Gerasimova, 2016). *Engineering controls*: *shoring system*, *gas detector* untuk *confidened trench* (Health and Safety Executive, 2014) *Administrative controls*: revisi sop pekerjaan *construction* and *installation* procedure untuk menambahkan section terkait stop work authority, daily *inspection*, *toolbox talk* (CCPS Risk-Based Process Safety). PPE: *helmet*, *safety boots*, *reflective vest*, *respirator* (OSHA PPE; ISO 45001).
	Material trench	
	Cuaca buruk	
Welding / Hot work	*Welding pipeline*	*Eliminitation*: mengurangi *welding* di *workshop* atau *site* (Savukaitis et al., 2021b). *Subsitution*: mengganti dengan *cold cutting* (NFPA 51B). *Engineering controls*: *ventilation system*, *gas free certification* (ANSI Z49.1; NFPA 51B). *Administrative controls*: kontraktor menyediaakan personel medic untuk aktivitas konstruksi dan instalasi, SOP *welding*. *Hot work permit* (ISO 45001:2018; IOGP Report 577). PPE: *welding* helmet, fire-resistant clothing, gloves, safety boots, *face siled* (OSHA PPE).
	Cutting *pipeline*	
	Electrical	
Installation	*Tie-in*	*Eliminitation*: *installation design optimization* (Kumi et al., 2026b). *Subsitution*: mengganti metode manual *lowering* dengan *mechanized pipe* (ASME B31.8). *Engineering controls: load limitation* dari manufaktur, *pipe support roller*, anti *slip pad* (API 15S). *Administrative controls*: menambahkan dokumen *installation* procedure RTP *pipeline* dari *manufacture*
	Isolation	

Kategori Aktivitas	Aktivitas	*Determining Control*
		dengan batasan beban tarik di dalam dokumen SOP pekerjaan *construction* and *installation procedure* (API 15S). PPE: *helmet, gloves, safety shoes, eye protection* (OSHA PPE; ISO 45001; ANSI Z287.1).
Inspection	Inspeksi NDT	*Eliminiation*: digital *inspection* mengurangi personil memeasuki area berbahaya atau ALARA (Tyas et al., 2021). *Subsitution*: *remote* NDT (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V; Lyu et al., 2024). *Engineering controls*: *safe acces platform, lighting system* (ISO 45001). *Administrative controls: inspection procedure*, pmt, qa/qc *check sheet*, LOTO *system* (ISO 45001; CCPS) PPE: *helmet, safety shoes, gloves*, respirator (IAEA; (Giammarile et al., 2024)
Pre-commissioning	*Hydrotest* *Leak test*	*Eliminitation*: menghilangkan r*e-hydrotest* (ASME B31.8). *Subsitution*: *water test* diganti dengan nitrogen (ASME PCC-2) *Engineering controls*: *pressure relief, venting system* (ASME B.31.8). *Administrative controls*: menambahkan organisasi chart untuk tim *pre-commissioning* dan *commissioning* didalam dokumen *project organization chart* (CCPS; IOGP 577). PPE: *helmet, safety shoes, gloves, respirator* (OSHA PPE; ISO 45001).
Commissioning	*Gas-in* *Commissioning* *Pigging*	*Eliminitation*: simulasi digital / *dynamic simulation* (Giammarile et al., 2024). *Subsitution*: pengisian peralatan proses perpipaan dengan nitrogen (API RP 2009; CCPS). *Engineering controls*: PSV, *control room automatian (scada), emergency shutdown system* (Stouffer et al., 2015). *Administrative controls*: menambahkan organisasi chart untuk tim *pre-commissioning* dan *commissioning* didalam dokumen project *organization chart* (ISO 45001; CCPS). PPE: *fire resistant, helmet, gloves, safety boots, respiratory protection* (OSHA PPE).

Berdasarkan hasil pengendalian risiko menggunakan metode HIRADC pada Tabel 4. 7, tahap selanjutnya adalah melakukan wawancara dengan Bapak Kusno Kurniawan selaku *Manager Divisi Production and Operations*. Wawancara ini bertujuan untuk menentukan tindakan

pengendalian risiko yang paling sesuai dengan mempertimbangkan kondisi nyata di lapangan, tingkat bahaya, ketersediaan fasilitas, serta efektivitas penerapan pengendalian. Tidak semua jenis pengendalian dapat diterapkan pada setiap risiko. Oleh karena itu, dipilih alternatif pengendalian yang dinilai paling relevan dan realistis untuk diterapkan pada masing-masing kategori aktivitas. Adapun dasar pertimbangan pemilihan tindakan pengendalian, beserta alasan tidak dipilihnya alternatif pengendalian lainnya pada setiap kategori aktivitas, disajikan pada tabel berikut:

Table 4. 8 Pemilihan pengendalian risiko

Kategori Aktivitas	**Prioritas**	**Alasan Memilih**
Lifting Operation	*Engineering controls*: membuat JMP (*journey management plan*) transportasi RTP reel atau rigging plan *engineering*	Memastikan kapasitas alat angkat, metode rigging, titik angkat (lifting point), serta jalur perpindahan beban telah direncanakan sebelum pekerjaan dimulai. Perencanaan ini dapat menurunkan risiko jatuhnya beban (dropped object) maupun kegagalan proses pengangkatan (Subbiah et al., 2025).
Trenching / Excavations	*Administrative controls*: revisi sop pekerjaan *construction and installation procedure* untuk menambahkan *section* terkait *stop work authority*	Penambahan *Stop Work Authority* (SWA) memberikan kewenangan kepada setiap pekerja untuk menghentikan pekerjaan ketika ditemukan kondisi yang tidak aman. Dalam hal tersebut, potensi kecelakaan dapat dicegah sebelum terjadi (Occupational Safety and Health Administration, 2022).
Welding / Hot Work	*Administrative controls*: kontraktor menyediakan personel medic untuk aktivitas konstruksi dan instalasi	Aktivitas hot work memiliki potensi menimbulkan luka bakar, sengatan listrik, maupun ledakan. Maka dari itu personel medis di lokasi pekerjaan diperlukan agar respons terhadap kondisi darurat (emergency response) dapat dilakukan lebih cepat sehingga tingkat keparahan cedera dapat diminimalkan (National Fire Protection Association, 2024; OSHA).
Installations	*Administrative controls*: menambahkan dokumen *installation procedure* RTP *pipeline* dari *manufacture* dengan batasan beban tarik di dalam dokumen SOP pekerjaan *construction and installation procedure*	Dokumen Installation Procedure dari manufaktur memuat persyaratan teknis, seperti batas beban tarik maksimum, radius pembengkokan, metode penanganan, serta prosedur instalasi yang harus dipenuhi untuk menjaga integritas pipa (American Petroleum Institute RP 1111).

Kategori Aktivitas	Prioritas	Alasan Memilih
Inscpections	*Eliminiation*: digital *inspection* mengurangi personil memasuki area berbahaya atau ALARA	proses inspeksi dilakukan tanpa melibatkan banyak personel di area radiasi. Dengan demikian, Paparan radiasi dapat diminimalkan sesuai prinsip ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), sekaligus mendukung pencapaian tingkat risiko yang berada pada kategori ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) (International Atomic Energy Agency, 2018).
Pre-commissioning	*Administrative controls*: menambahkan organisasi chart untuk tim *pre-commissioning* dan *commissioning* didalam dokumen *project organization chart*	Penyusunan *organization chart* yang jelas membantu menetapkan pembagian tugas, jalur komunikasi, serta kewenangan setiap personel selama pelaksanaan *pre-commissioning* (CCPS; IOGP 577).
Commissioning	*Engineering controls*: PSV	Penggunaan *Pressure Safety Valve* (PSV) dipilih sebagai pengendalian rekayasa karena berfungsi melindungi sistem dari kondisi *overpressure*. Ketika tekanan melebihi batas desain, PSV akan membuka secara otomatis untuk melepaskan tekanan sehingga risiko kegagalan peralatan, kebocoran, maupun ledakan dapat diminimalkan (Stouffer et al., 2015; API).

4.4 Pengolahan Data

4.4.1 *Transformasi data HIRADC ke AHP*.

Hasil identifikasi bahaya dan penilaian risiko menggunakan metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control* (HIRADC) menghasilkan 16 potensi risiko yang tersebar pada tujuh kategori aktivitas pekerjaan pembangunan pipa penyalur gas asosiasi SAS-1, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.6. Meskipun demikian, hasil identifikasi tersebut belum dapat langsung digunakan sebagai alternatif dalam metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Diperlukannya proses transformasi untuk mengelompokkan 16 potensi risiko hasil HIRADC menjadi sejumlah alternatif risiko yang lebih ringkas, tetapi tetap mampu mewakili seluruh potensi bahaya yang telah diidentifikasi.

Pada penelitian ini, proses pengelompokan tidak dilakukan berdasarkan kesamaan tahapan aktivitas maupun kategori pekerjaan, melainkan berdasarkan kesamaan jenis kejadian risiko (*risk event*), yaitu konsekuensi akhir yang muncul ketika suatu potensi bahaya terealisasi,

sebagaimana tercantum pada Tabel 4.6. Dalam hal ini dipilih karena beberapa aktivitas yang berasal dari tahapan pekerjaan yang berbeda dapat memiliki mekanisme kegagalan teknis yang serupa. Dengan demikian, apabila terjadi kegagalan, jenis kecelakaan yang ditimbulkan juga cenderung sama. Oleh sebab itu, aktivitas-aktivitas tersebut dikelompokkan ke dalam satu alternatif agar bobot prioritas yang dihasilkan pada tahap AHP dapat mencerminkan pengaruh suatu jenis risiko secara lebih menyeluruh, bukan hanya menggambarkan risiko dari satu aktivitas kerja tertentu.

Berdasarkan pendekatan tersebut, seluruh 16 potensi risiko hasil HIRADC kemudian dipetakan menjadi tujuh alternatif risiko yang digunakan sebagai level alternatif pada struktur hierarki AHP. Hasil pemetaan tersebut disajikan pada Tabel 4.9.

Table 4. 9 Pemetaan alternatif risiko dengan aktivitas kerja

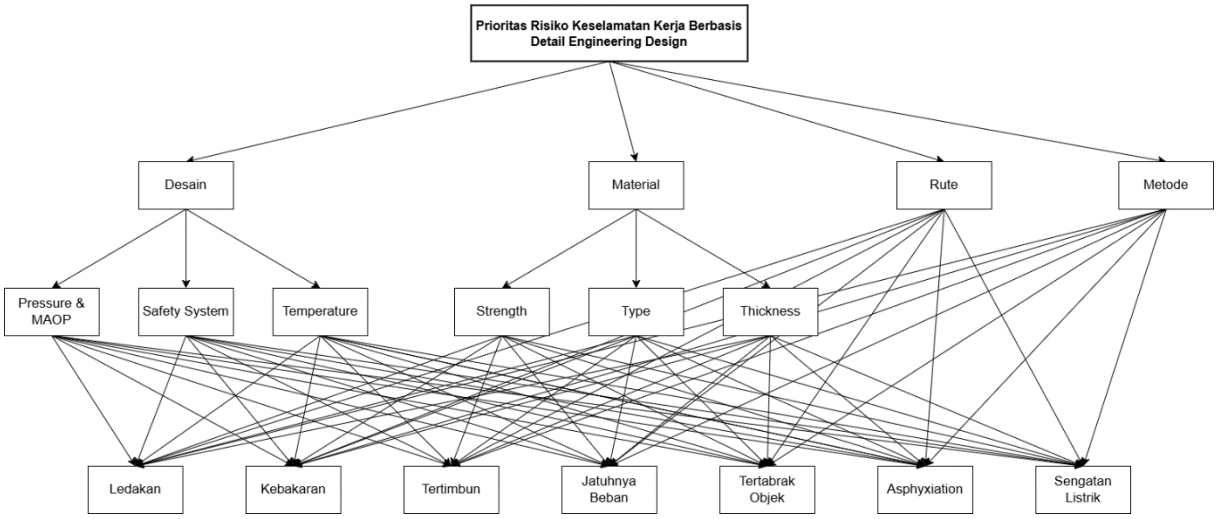
No	**Alternatif Risiko AHP**	**Aktivitas HIRADC yang Dikelompokkan**	**Dasar Pengelompokan (Kesamaan *Risk Event*)**
1	Ledakan	*Welding pipeline*, *Isolation*, *Hydrotest*, *Leak test*, *Gas-in*, *Commissioning*, *Pigging*	Seluruh aktivitas berpotensi menimbulkan pelepasan energi bertekanan atau keberadaan sumber penyalaan yang dapat berkembang menjadi ledakan apabila pengendalian tidak memadai.
2	Kebakaran	*Welding pipeline*, *Cutting pipeline*	Aktivitas melibatkan sumber panas dan percikan api secara langsung, terpisah dari mekanisme ledakan karena tidak selalu melibatkan sistem bertekanan.
3	Tertimbun/Longsor	Penggalian *trench*, *Material trench*, Cuaca buruk	Ketiganya berkaitan dengan kondisi kestabilan tanah pada area galian.
4	Jatuhnya Beban	*Lifting spool*	Kegagalan proses pengangkatan yang menyebabkan beban terjatuh.
5	Tertabrak Objek	*Lifting area*	Pekerja berada pada jalur perpindahan beban yang sedang diangkat, berbeda mekanisme dari kegagalan alat angkat.
6	*Asphyxiation*	*Tie-in*, *Leak test*, *Commissioning*	Ketiganya berpotensi menyebabkan pelepasan/kebocoran gas yang menurunkan kadar oksigen di area kerja.
7	Sengatan Listrik	*Electrical*	Mekanisme kontak langsung atau tidak langsung dengan sumber energi listrik.

Satu aktivitas dapat dikelompokkan ke dalam lebih dari satu alternatif apabila memiliki lebih dari satu konsekuensi teknis. Sebagai contoh, aktivitas *Welding pipeline* dimasukkan ke dalam alternatif ledakan dan kebakaran. Hal ini karena proses pengelasan pada sistem perpipaan gas berpotensi menimbulkan dua jenis kejadian risiko yang berbeda, yaitu pelepasan energi bertekanan apabila terjadi kegagalan sistem yang dapat memicu ledakan, serta percikan api dari proses pengelasan yang dapat menjadi sumber penyalaan dan menyebabkan kebakaran. Kondisi yang sama juga berlaku pada aktivitas *Leak test* dan *Commissioning*. Kedua aktivitas tersebut dikelompokkan ke dalam alternatif ledakan maupun *asphyxiation* karena kebocoran atau pelepasan gas dapat berkembang menjadi ledakan apabila terdapat sumber penyalaan. Sebaliknya, apabila gas terakumulasi di area kerja dengan ventilasi yang tidak memadai, kondisi tersebut dapat menyebabkan *asphyxiation*.

Melalui proses tersebut, diperoleh tujuh alternatif risiko, yaitu ledakan, kebakaran, tertimbun/longsor, jatuhnya beban, tertabrak objek, *asphyxiation*, dan sengatan listrik. Ketujuh alternatif ini selanjutnya digunakan sebagai elemen pada level alternatif dalam struktur hierarki AHP pada Gambar 4.2. Pada tahap berikutnya, masing-masing alternatif dibandingkan secara berpasangan terhadap setiap sub-kriteria *Detail Engineering Design* (DED) untuk memperoleh bobot prioritas global.

4.4.2 *Penyusunan struktur hierarki AHP.*

Struktur hierarki AHP dalam penelitian ini disusun dalam empat level utama, yaitu tujuan (*goal*), kriteria, sub-kriteria, dan alternatif. Tujuan dari analisis ini adalah menentukan prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek *pipeline*. Untuk kriteria, faktor yang digunakan mencakup desain, *Material*, rute, dan metode. Pada kriteria desain, sub-kriteria yang digunakan terdiri dari *pressure* & MAOP, *safety system*, dan temperatur. Sementara itu, pada kriteria *Material* digunakan sub-kriteria *strength*, *type*, dan *thickness*. Adapun alternatif dalam penelitian ini berupa jenis-jenis risiko yang sebelumnya telah diidentifikasi.



Gambar 4. 2 Struktur hirarki AHP prioritas risiko

4.4.3 *Perbandingan berpasangan (Pairwise comparisons).*

Pembobotan dilakukan melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) berdasarkan pendapat ahli. Setiap kriteria dibandingkan untuk menentukan tingkat kepentingannya dalam mempengaruhi risiko.

1. Kuesioner perbandingan antar kriteria

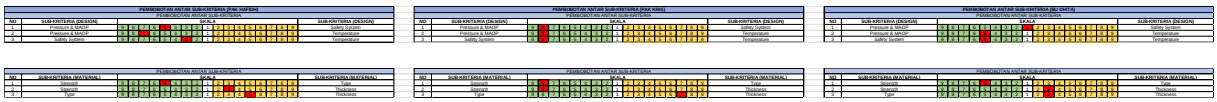
Berikut ini merupakan kuesioner perbandingan antar kriteria yang telah diisi berdasarkan tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek:



Gambar 4. 3 Kuesioner perbandingan antar kriteria

2. Kuesioner perbandingan antar sub-kriteria

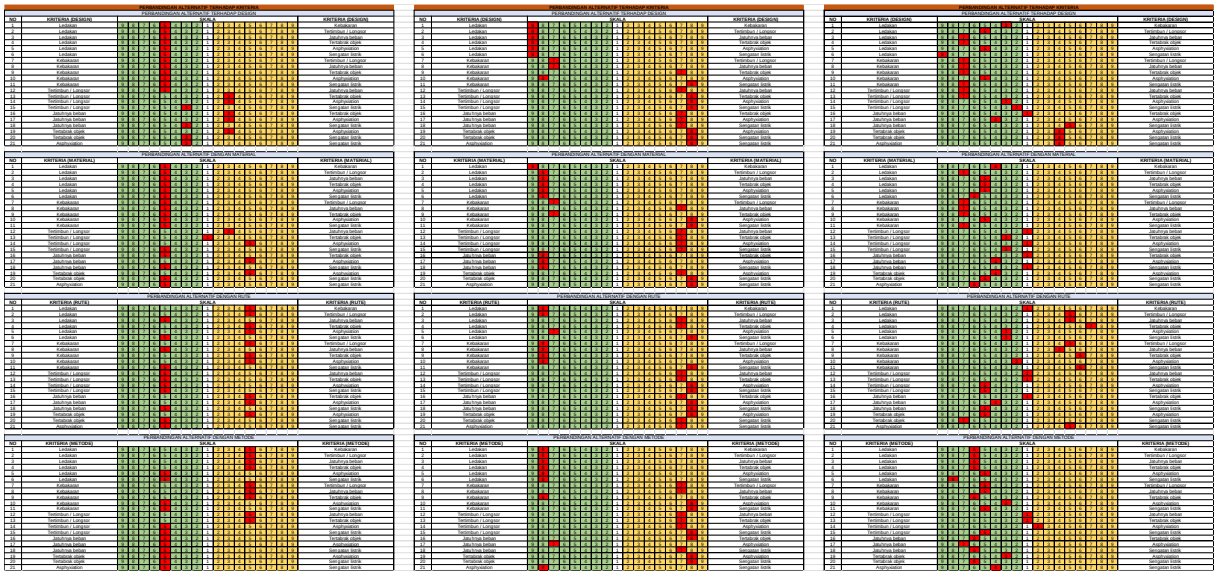
Berikut ini merupakan kuesioner perbandingan antar sub-kriteria yang telah diisi berdasarkan tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek:



Gambar 4. 4 Kuesioner perbandingan antar sub-kriteria

3. Kuesioner perbandingan alternatif terhadap kriteria

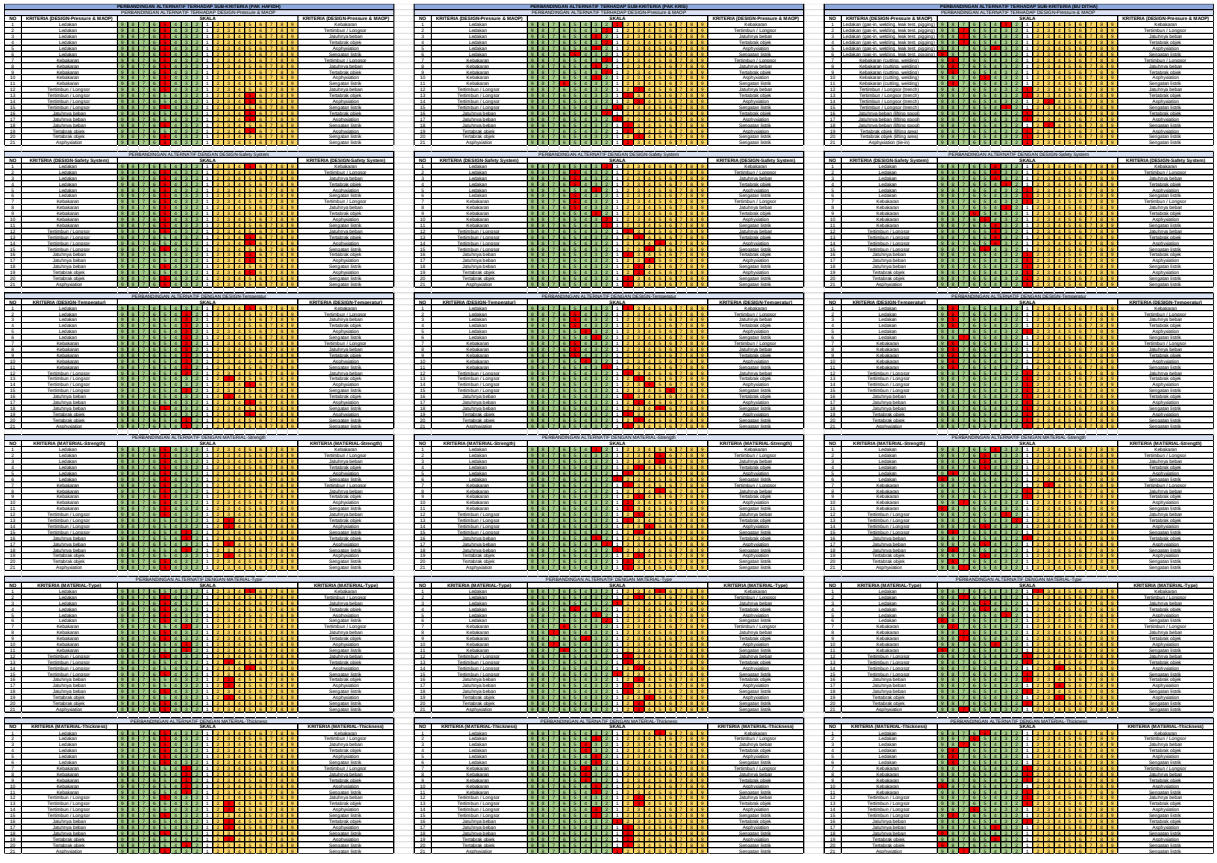
Berikut ini merupakan kuesioner perbandingan alternatif terhadap kriteria yang telah diisi berdasarkan tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek:



Gambar 4. 5 Kuesioner perbandingan alternatif terhadap kriteria

4. Kuesioner perbandingan alternatif terhadap sub-kriteria

Berikut ini merupakan kuesioner perbandingan alternatif terhadap sub-kriteria yang telah diisi berdasarkan tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek:



Gambar 4. 6 Kuesioner perbandingan alternatif terhadap sub-kriteria

4.4.4 *Perhitungan geometric mean.*

Perhitungan *geometric mean* dilakukan untuk menggabungkan hasil penilaian dari tiga orang *expert* terhadap perbandingan berpasangan antar kriteria. Proses ini bertujuan menghasilkan satu matriks perbandingan kelompok (*group pairwise comparison matrix*) yang dapat merepresentasikan keseluruhan penilaian para *expert*. Nilai *geometric mean* dihitung pada setiap pasangan kriteria menggunakan rumus rata-rata geometrik sehingga diperoleh satu nilai representatif untuk masing-masing pasangan. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses normalisasi matriks, perhitungan bobot prioritas, serta pengujian konsistensi. Hasil perhitungan *geometric mean* untuk kriteria design, material, route, dan metode disajikan dibawah ini:

1. Perhitungan *Geometric mean* Kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan geometric mean kriteria berdasarkan penilaian dari tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek pembangunan pipa gas SAS-1 sebagaimana disajikan pada tabel dibawah ini:

PERHITUNGAN GEOMEAN KRITERIA					
No	**Kriteria**	Desain	Material	Rute	Metode
1	Desain	1	4.932424149	6.54213262	7.31861142
2	Material	0.202740067	1	5.517848353	1.635533155
3	Rute	0.152855354	0.181230062	1	1.040041912
4	Metode	0.136637942	0.611421417	0.961499714	1
Total		1.492233363	6.725075628	14.02148069	10.99418649

Gambar 4. 7 Hasil perhitungan *geometric mean* antar kriteria

2. Perhitungan *Geometric mean* Sub-kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan geometric mean sub-kriteria berdasarkan penilaian dari tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek pembangunan pipa gas SAS-1 sebagaimana disajikan pada tabel dibawah ini:

PERHITUNGAN GEOMEAN SUB-KRITERIA				
No	**Sub-Kriteria (DESIGN)**	Pressure&MAOP	Safety System	Temperature
1	Pressure&MAOP	1	3.419951893	6.54213262
2	Safety System	0.292401774	1	4.932424149
3	Temperature	0.152855354	0.202740067	1
Total		1.445257128	4.62269196	12.47455677

No	**Sub-Kriteria (MATERIAL)**	Strength	Type	Thickness
1	Strength	1	5.848035476	0.961499714
2	Type	0.170997595	1	0.211967967
3	Thickness	1.040041912	4.71769398	1
Total		2.211039506	11.56572946	2.17346768

Gambar 4. 8 Hasil perhitungan *geometric mean* antar sub-kriteria

3. Perhitungan *Geometric mean* Alternatif Terhadap Kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan geometric mean alternatif terhadap kriteria berdasarkan penilaian dari tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek pembangunan pipa gas SAS-1 sebagaimana disajikan pada tabel dibawah ini:

PERHITUNGAN GEOMEAN ALTERNATIF TERHADAP KRITERIA

No	**DESIGN**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	4.71769398	6.082201996	6.804092116	6.257324746	5.59344471	4.481404747
2	Kebakaran	0.211967967	1	5.943921953	4.71769398	3.27106631	2.924017738	2.268030705
3	Tertimbun / Longsor	0.164414138	0.168239087	1	2.596247051	0.729919857	0.550321208	0.873580465
4	Jatuhnya beban	0.146970379	0.211967967	0.385171357	1	0.480749857	0.763142828	0.405480133
5	Tertabrak objek	0.159812706	0.305710709	1.370013421	2.080083823	1	0.436790232	0.629960525
6	Asphyxiation	0.178780707	0.341995189	1.817120593	1.310370697	2.289428485	1	0.629960525
7	Sengatan listrik	0.223144317	0.440911138	1.144714243	2.466212074	1.587401052	1.587401052	1
Total		2.085090214	7.18651807	17.74314356	20.97469974	15.61589031	12.85511777	10.2884171

No	**MATERIAL**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	3.914867641	6.804092116	2.924017738	6.082201996	4.217163327	3.914867641
2	Kebakaran	0.255436477	1	5.59344471	2.268030705	4.71769398	2.924017738	2.596247051
3	Tertimbun / Longsor	0.146970379	0.178780707	1	0.333333333	1.144714243	0.341995189	1.185631101
4	Jatuhnya beban	0.341995189	0.440911138	3	1	3.556893304	1.3388659	2.15443469
5	Tertabrak objek	0.164414138	0.211967967	0.873580465	0.281144222	1	0.64365959	1.609148974
6	Asphyxiation	0.23712622	0.341995189	2.924017738	0.746900791	1.553616253	1	2.466212074
7	Sengatan listrik	0.255436477	0.385171357	0.843432665	0.464158883	0.621446501	0.405480133	1
Total		2.401378882	6.473694	21.03856769	8.017585673	18.67656628	10.87118188	14.92654153

No	**RUTE**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	0.584803548	0.711378661	1.44224957	0.385171357	0.510872955	1.185631101
2	Kebakaran	1.709975947	1	0.711378661	1.553616253	0.405480133	0.928317767	0.941036029
3	Tertimbun / Longsor	1.405721109	1.405721109	1	1.185631101	0.941036029	1.609148974	1.405721109
4	Jatuhnya beban	0.693361274	0.64365959	0.843432665	1	0.464158883	0.7368063	2.027400665
5	Tertabrak objek	2.596247051	2.466212074	1.062658569	2.15443469	1	1	2.596247051
6	Asphyxiation	1.957433821	1.077217345	0.621446501	1.357208808	1	1	0.793700526
7	Sengatan listrik	0.843432665	1.062658569	0.711378661	0.493242415	0.385171357	1.25992105	1
Total		10.20617187	8.240272235	5.661673718	9.186382838	4.58101776	7.045067046	9.949736481

No	**METODE**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	2.210418899	2.210418899	1.930978769	2.210418899	4.217163327	4.932424149
2	Kebakaran	0.452402936	1	1	0.693361274	0.843432665	1.357208808	1.609148974
3	Tertimbun / Longsor	0.452402936	1	1	0.405480133	0.464158883	0.746900791	1.609148974
4	Jatuhnya beban	0.517872084	1.44224957	2.466212074	1	3.914867641	2.596247051	2.466212074
5	Tertabrak objek	0.452402936	1.185631101	2.15443469	0.255436477	1	1.709975947	2.15443469
6	Asphyxiation	0.23712622	0.7368063	1.3388659	0.385171357	0.584803548	1	2.714417617
7	Sengatan listrik	0.202740067	0.621446501	0.621446501	0.405480133	0.464158883	0.36840315	1
Total		3.314947179	8.196552372	10.79137806	5.075908144	9.48184052	11.99589907	16.48578648

Gambar 4. 9 Hasil perhitungan *geometric mean* alternatif terhadap kriteria

4. Perhitungan *Geometric mean* Alternatif Terhadap Sub-kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan geometric mean alternatif terhadap sub-kriteria berdasarkan penilaian dari tiga orang *expert* yang bertanggungjawab dalam proyek pembangunan pipa gas SAS-1 sebagaimana disajikan pada tabel

PERHITUNGAN GEOMEAN ALTERNATIF TERHADAP SUB-KRITERIA

No	**Pressure & MAOP**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	2.466212074	4.1212853	4.71769398	4.1212853	3.914867641	6.082201996
2	Kebakaran	0.405480133	1	4.30886938	4.932424149	4.30886938	4.217163327	6.214465012
3	Tertimbun / Longsor	0.24264275	0.232079442	1	1.185631101	0.464158883	0.281144222	1.709975947
4	Jatuhnya beban	0.211967967	0.202740067	0.843432665	1	0.7368063	0.584803548	0.941036029
5	Tertabrak objek	0.24264275	0.232079442	2.15443469	1.357208808	1	0.464158883	1.185631101
6	Asphyxiation	0.255436477	0.23712622	3.556893304	1.709975947	2.15443469	1	1.357208808
7	Sengatan listrik	0.164414138	0.160914897	0.584803548	1.062658569	0.843432665	0.7368063	1
Total		2.522584216	4.531152142	16.56971889	15.96559255	13.62898722	11.19894392	18.49051889

No	**Safety System**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	1.169607095	4.641588834	4.641588834	4.217163327	2.466212074	2.924017738
2	Kebakaran	0.854987973	1	2.924017738	4.217163327	4.481404747	3.684031499	3.419951893
3	Tertimbun / Longsor	0.215443469	0.341995189	1	2.15443469	0.64365959	0.542883523	1.842015749
4	Jatuhnya beban	0.215443469	0.23712622	0.464158883	1	0.464158883	0.36840315	1.185631101
5	Tertabrak objek	0.23712622	0.223144317	1.553616253	2.15443469	1	0.405480133	1.357208808
6	Asphyxiation	0.405480133	0.271441762	1.842015749	2.714417617	2.466212074	1	1.357208808
7	Sengatan listrik	0.341995189	0.292401774	0.542883523	0.843432665	0.7368063	0.7368063	1
Total		3.270476454	3.535716357	12.96828098	17.72547182	14.00940492	9.203816679	13.0860341

No	**Temperature**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	0.928317767	4.932424149	4.932424149	4.932424149	2.289428485	3.979057208
2	Kebakaran	1.077217345	1	4.932424149	4.932424149	4.932424149	4.57885697	3.634241186
3	Tertimbun / Longsor	0.202740067	0.202740067	1	1.144714243	0.480749857	0.36840315	0.793700526
4	Jatuhnya beban	0.202740067	0.202740067	0.873580465	1	0.550321208	0.405480133	1
5	Tertabrak objek	0.202740067	0.202740067	2.080083823	1.817120593	1	0.464158883	1
6	Asphyxiation	0.436790232	0.218395116	2.714417617	2.466212074	2.15443469	1	1.144714243
7	Sengatan listrik	0.251315814	0.275160604	1.25992105	1	1	0.873580465	1
Total		3.373543591	3.030093687	17.79285125	17.29289521	15.05035405	9.979908086	12.55171316

No	**Strength**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	3.914867641	1.709975947	1.709975947	2.027400665	2.714417617	3.556893304
2	Kebakaran	0.255436477	1	0.941036029	1	1.185631101	2.596247051	2.823108087
3	Tertimbun / Longsor	0.584803548	1.062658569	1	1.709975947	0.693361274	0.746900791	2
4	Jatuhnya beban	0.584803548	1	0.584803548	1	2.080083823	1.493801582	2.884499141
5	Tertabrak objek	0.493242415	0.843432665	1.44224957	0.480749857	1	0.822070691	2.714417617
6	Asphyxiation	0.36840315	0.385171357	1.3388659	1.062658569	1.216440399	1	4.1212853
7	Sengatan listrik	0.281144222	0.354219523	0.5	0.346680637	0.36840315	0.24264275	1
Total		3.567833359	8.560349756	7.516930994	7.310040956	8.571320413	9.616080483	19.10020345

No	**Type**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	0.271441762	2.268030705	2.924017738	5	3.556893304	4.481404747
2	Kebakaran	3.684031499	1	5.241482788	6.257324746	5.192494102	4.37951914	5.451361778
3	Tertimbun / Longsor	0.440911138	0.190785707	1	1.357208808	0.550321208	0.255436477	1.709975947
4	Jatuhnya beban	0.341995189	0.159812706	0.7368063	1	0.480749857	0.346680637	1.357208808
5	Tertabrak objek	0.584803548	0.24264275	1.817120593	2.080083823	1	0.275160604	1.185631101
6	Asphyxiation	0.281144222	0.22833557	3.914867641	2.884499141	3.634241186	1	2.268030705
7	Sengatan listrik	0.223144317	0.183440403	0.584803548	0.7368063	0.843432665	0.440911138	1
Total		6.556029912	2.276458898	15.56311158	17.23994056	16.70123902	10.2546013	17.45361309

No	**Thickness**	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik
1	Ledakan	1	1.709975947	4.481404747	5.192494102	5.428835233	4.932424149	4.932424149
2	Kebakaran	0.584803548	1	2.289428485	2.289428485	2.289428485	4.326748711	2.080083823
3	Tertimbun / Longsor	0.223144317	0.436790232	1	1.185631101	0.480749857	1.817120593	4.932424149
4	Jatuhnya beban	0.192585679	0.436790232	0.843432665	1	0.693361274	0.873580465	2.823108087
5	Tertabrak objek	0.184201575	0.436790232	2.080083823	1.44224957	1	0.873580465	2.381101578
6	Asphyxiation	0.202740067	0.231120425	0.550321208	1.144714243	1.144714243	1	3.27106631
7	Sengatan listrik	0.202740067	0.480749857	0.202740067	0.354219523	0.419973683	0.305710709	1
Total		2.590215251	4.732216925	11.44741099	12.60873702	11.45706278	14.12916509	21.4202081

Gambar 4. 10 Hasil perhitungan *geometric mean* terhadap sub-kriteria

4.4.5 *Pembobotan dan uji konsistensi.*

Pembobotan antar kriteria dilakukan melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) berdasarkan penilaian dari tiga orang *expert*. Pada tahap ini, setiap kriteria dibandingkan dengan kriteria lainnya untuk mengetahui tingkat kepentingannya dalam memengaruhi risiko. Hasil perhitungan kemudian diuji konsistensinya. Suatu penilaian dinyatakan konsisten apabila memiliki nilai *Consistency Ratio* (CR) < 0,1 atau 10%.

1. Pembobotan dan uji konsistensi kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan pembobotan dan uji konsistensi kriteria:

PEMBOBOTAN DAN UJI KONSISTENSI KRITERIA

No	Kriteria	Desain	Material	Rute	Metode	Desain	Material	Rute	Metode	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	*λ maks*	CI	IR	CR
1	Desain	1	4.93242415	6.54213262	7.31861142	0.6701	0.7334	0.4666	0.6657	2.5358336	0.6339584	2.7622947	4.3572177				
2	Material	0.20274007	1	5.51784835	1.63553316	0.1359	0.1487	0.3935	0.1488	0.8268524	0.2067131	0.8824416	4.2689194				
3	Rute	0.15285535	0.18123006	1	1.04004191	0.1024	0.0269	0.0713	0.0946	0.2953008	0.0738252	0.2971188	4.024626	4.2430519	0.0810173	0.9	0.0900192
4	Metode	0.13663794	0.61142142	0.96149971	1	0.0916	0.0909	0.0686	0.091	0.3420132	0.0855033	0.3694978	4.3214445				
	Total	1.49223336	6.72507563	14.0214807	10.9941865	1	1	1	1	4	1	4.3113529	16.972208				

Gambar 4. 11 Hasil pembobotan dan uji konsistensi kriteria

2. Pembobotan dan uji konsistensi sub-kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan pembobotan dan uji konsistensi sub-kriteria:

PEMBOBOTAN DAN UJI KONSISTENSI SUB-KRITERIA

No	Kriteria	Pressure&MAOP	Safety System	Temperature	Pressure & MAOP	Safety System	Temperature	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	*λ maks*	CI	IR	CR
1	Pressure&MAOP	1	3.419951893	6.54213262	0.6919184	0.7398	0.5244	1.9562	0.6521	2.0811449	3.1916549				
2	Safety System	0.292401774	1	4.932424149	0.20231817	0.2163	0.3954	0.814	0.2713	0.8398077	3.0949581	3.1020397	0.0510198	0.58	0.0879652
3	Temperature	0.152855354	0.202740067	1	0.10576343	0.0439	0.0802	0.2298	0.0766	0.2312782	3.019506				
	Total	1.445257128	4.62269196	12.47455677	1	1	1	3	1	3.1522308	9.306119				

No	Kriteria	Strength	Type	Thickness	Stength	Type	Thickness	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	*λ maks*	CI	IR	CR
1	Strength	1	5.848035476	0.961499714	0.45227595	0.5056	0.4424	1.4003	0.4668	1.4051293	3.0103652				
2	Type	0.170997595	1	0.211967967	0.0773381	0.0865	0.0975	0.2613	0.0871	0.2614888	3.0018728	3.0071801	0.00359	0.58	0.0061897
3	Thickness	1.040041912	4.71769398	1	0.47038595	0.4079	0.4601	1.3384	0.4461	1.3425331	3.0093023				
	Total	2.211039506	11.56572946	2.17346768	1	1	1	3	1	3.0091513	9.0215403				

Gambar 4. 12 Hasil pembobotan dan uji konsistensi sub-kriteria

3. Pembobotan dan uji konsistensi alternatif terhadap kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan pembobotan dan uji konsistensi alternetif terhadap kriteria:

PEMBOBOTAN DAN UJI KONSISTENSI ALTERNATIF TERHADAP KRITERIA

No	DESIGN	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	4.717694	6.082202	6.8040921	6.2573247	5.5934447	4.4814047	0.47959556	0.6564645	0.34279168	0.32439521	0.4007024	0.43511423	0.43557767	3.0746412	0.4392345	3.4132764	7.7709668				
2	Kebakaran	0.211968	1	5.943922	4.717694	3.2710663	2.9240177	2.2680307	0.10165889	0.13914944	0.33499824	0.22492308	0.2094707	0.22745943	0.22044506	1.4581045	0.2083006	1.5652118	7.5141958				
3	Tertimbun /	0.1644141	0.1682391	1	2.5962471	0.7299199	0.5503212	0.8735805	0.07885229	0.02341038	0.0563598	0.12377994	0.04674212	0.0428095	0.08490912	0.4568632	0.0652662	0.4606868	7.0585851				
4	Jatuhnya beban	0.1469704	0.211968	0.3851714	1	0.4807499	0.7631428	0.4054801	0.07048634	0.02949522	0.02170818	0.04767649	0.03078594	0.0593649	0.03941132	0.2989284	0.0427041	0.3104099	7.2688631	7.37225	0.06204	1.32	0.047
5	Tertabrak objek	0.1598127	0.3057107	1.3700134	2.0800838	1	0.4367902	0.6299605	0.07664546	0.04253948	0.07721368	0.09917109	0.06403734	0.03397793	0.06123007	0.454815	0.0649736	0.4740716	7.2963756				
6	Asphyxiation	0.1787807	0.3419952	1.8171206	1.3103707	2.2894285	1	0.6299605	0.08574243	0.04758844	0.10241255	0.06247387	0.1466089	0.07779003	0.06123007	0.5838463	0.0834066	0.6170264	7.3978114				
7	Sengatan listrik	0.2231443	0.4409111	1.1447142	2.4662121	1.5874011	1.5874011	1	0.10701902	0.06135254	0.06451586	0.11758033	0.10165293	0.12348398	0.09719668	0.6728013	0.0961145	0.7015365	7.2989677				
	Total	2.0850902	7.1865181	17.743144	20.9747	15.61589	12.855118	10.288417	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.5422195	51.605765				

No	MATERIAL	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	3.9148676	6.8040921	2.9240177	6.082202	4.2171633	3.9148676	0.41642741	0.60473474	0.32341042	0.36470053	0.32565954	0.38792133	0.2622756	2.6851296	0.3835899	2.9634076	7.7254572				
2	Kebakaran	0.2554365	1	5.5934447	2.2680307	4.717694	2.9240177	2.5962471	0.10637075	0.15447131	0.26586623	0.282882	0.25259964	0.26896963	0.17393494	1.5050945	0.2150135	1.6157824	7.514795				
3	Tertimbun /	0.1469704	0.1787807	1	0.3333333	1.1447142	0.3419952	1.1856311	0.0612025	0.02761649	0.04753175	0.04157528	0.06129147	0.03145888	0.07943107	0.3501074	0.0500153	0.3579043	7.15589				
4	Jatuhnya beban	0.3419952	0.4409111	3	1	3.5568933	1.3388659	2.1544347	0.14241617	0.06810812	0.14259526	0.12472583	0.19044685	0.12315735	0.14433583	0.9357854	0.1336836	0.9741773	7.2871847				
5	Tertabrak objek	0.1644141	0.211968	0.8735805	0.2811442	1	0.6436596	1.609149	0.06846655	0.03274297	0.04152281	0.03506595	0.05354303	0.05920788	0.10780454	0.3983537	0.0569077	0.4056885	7.1288893	7.33169	0.05528	1.32	0.04188
6	Asphyxiation	0.2371262	0.3419952	2.9240177	0.7469008	1.5536163	1	2.4662121	0.09874586	0.05282845	0.13898369	0.09315782	0.08318533	0.09198632	0.16522327	0.7241107	0.1034444	0.7438703	7.1910161				
7	Sengatan listrik	0.2554365	0.3851714	0.8434327	0.4641589	0.6214465	0.4054801	1	0.10637075	0.05949792	0.04008983	0.0578926	0.03327413	0.03729862	0.06699476	0.4014186	0.0573455	0.4196902	7.318622				
	Total	2.4013789	6.473694	21.038568	8.0175857	18.676566	10.871182	14.926542	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.4805206	51.321854				

No	RUTE	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	0.5848035	0.7113787	1.4422496	0.3851714	0.510873	1.1856311	0.09797993	0.07096896	0.12564812	0.15699864	0.08407987	0.07251499	0.11916206	0.7273526	0.1039075	0.7575302	7.2904282				
2	Kebakaran	1.7099759	1	0.7113787	1.5536163	0.4054801	0.9283178	0.941036	0.16754332	0.12135521	0.12564812	0.16912165	0.08851311	0.13176848	0.09457899	0.8985289	0.1283613	0.9366441	7.2969367				
3	Tertimbun /	1.4057211	1.4057211	1	1.1856311	0.941036	1.609149	1.4057211	0.13773246	0.17059159	0.17662622	0.12906398	0.20542073	0.2284079	0.14128225	1.1891251	0.169875	1.2348449	7.2691375				
4	Jatuhnya beban	0.6933613	0.6438596	0.8434327	1	0.4641589	0.7368063	2.0274007	0.06793549	0.07811145	0.14897232	0.10885677	0.10132222	0.10458471	0.20376426	0.8135472	0.116221	0.8459148	7.2785				
5	Tertabrak objek	2.5962471	2.4662121	1.0626586	2.1544347	1	1	2.5962471	0.2543801	0.29928769	0.18769336	0.23452481	0.2182921	0.14194329	0.26093626	1.5970576	0.2281511	1.6709018	7.3236633	7.28777	0.04796	1.32	0.03633
6	Asphyxiation	1.9574338	1.0772173	0.6214465	1.3572088	1	1	0.7937005	0.19178923	0.13072594	0.10976374	0.14774137	0.2182921	0.14194329	0.07977101	1.0200267	0.1457181	1.0643726	7.3043268				
7	Sengatan listrik	0.8434327	1.0626586	0.7113787	0.4932424	0.3851714	1.259921	1	0.08263947	0.12895916	0.12564812	0.05369278	0.08407987	0.17883734	0.10050517	0.7543619	0.107766	0.7814503	7.2513635				
	Total	10.206172	8.2402722	5.6616737	9.1863828	4.5810178	7.045067	9.9497365	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.2916586	51.014356				

No	METODE	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	2.2104189	2.2104189	1.9309788	2.2104189	4.2171633	4.9324241	0.30166393	0.26967666	0.20483194	0.38042035	0.23312129	0.35155042	0.29919253	2.0404571	0.2914939	2.1499127	7.3754986				
2	Kebakaran	0.4524029	1	1	0.6933613	0.8434327	1.3572088	1.609149	0.13647365	0.12200251	0.09266657	0.13659847	0.08895242	0.1131394	0.09760826	0.7874413	0.1124916	0.823055	7.31659				
3	Tertimbun /	0.4524029	1	1	0.4054801	0.4641589	0.7469008	1.609149	0.13647365	0.12200251	0.09266657	0.07988327	0.0489524	0.06226301	0.09760826	0.6398497	0.0914071	0.6520576	7.1335558				
4	Jatuhnya beban	0.5178721	1.4422496	2.4662121	1	3.9148676	2.5962471	2.4662121	0.15622333	0.17595807	0.22853542	0.19700908	0.41288056	0.21642788	0.14959626	1.5366306	0.2195187	1.6619819	7.5710279				
5	Tertabrak objek	0.4524029	1.1856311	2.1544347	0.2554365	1	1.7099759	2.1544347	0.13647365	0.04447436	0.05090205	0.19964407	0.05032331	0.10546476	0.14254671	0.1368437	0.9097868	0.1299695	0.939805	7.2309631	7.29923	0.04987	1.32	0.03778
6	Asphyxiation	0.2371262	0.7368063	1.3388659	0.3851714	0.5848035	1	2.7144176	0.07153243	0.08989222	0.12406811	0.07588226	0.06167616	0.08336182	0.16465199	0.671065	0.0958664	0.6916494	7.2147195				
7	Sengatan listrik	0.2027401	0.6214465	0.6214465	0.4054801	0.4641589	0.3684031	1	0.06115937	0.07581804	0.05758732	0.07988327	0.0489524	0.03071076	0.06065831	0.4147695	0.0592528	0.4297169	7.2522652				
	Total	3.3149472	8.1965524	10.791378	5.0759081	9.4818405	11.995899	16.485786	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.3481785	51.09462				

Gambar 4. 13 Hasil pembobotan dan uji konsistensi alternatif terhadap kriteria

4. Pembobotan dan uji konsistensi alternatif terhadap sub-kriteria

Berikut merupakan hasil perhitungan pembobotan dan uji konsistensi alterntif terhadap sub-kriteria:

PEMBOBOTAN DAN UJI KONSISTENSI ALTERNATIF TERHADAP SUB-KRITERIA

No	Pressure & MAOP	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	2.4662121	4.1212853	4.717694	4.1212853	3.9148676	6.082202	0.39641888	0.54427925	0.24872391	0.29549132	0.30239116	0.34957472	0.32893625	2.4658155	0.3522594	2.6720305	7.5854068				
2	Kebakaran	0.4054801	1	4.3088694	4.9324241	4.3088694	4.2171633	6.214465	0.16073998	0.22069442	0.26004481	0.30894088	0.31615477	0.37656795	0.33608927	1.9792321	0.2827474	2.1280631	7.5263743				
3	Tertimbun /	0.2426428	0.2320794	1	1.1856311	0.4641589	0.2811442	1.7099759	0.09618817	0.05121864	0.06035105	0.07426164	0.03405674	0.02510453	0.09247853	0.4336593	0.0619513	0.4424586	7.1420352				
4	Jatuhnya beban	0.211968	0.2027401	0.8434327	1	0.7368063	0.5848035	0.941036	0.0840281	0.0447436	0.05090205	0.06263469	0.05406171	0.05221953	0.05089289	0.3994826	0.0570689	0.4164716	7.2976934	7.3451	0.05752	1.32	0.04357
5	Tertabrak objek	0.2426428	0.2320794	2.1544347	1.3572088	1	0.4641589	1.8356311	0.09618817	0.05121864	0.1300224	0.08500836	0.07337302	0.04144667	0.06412103	0.5413783	0.0773398	0.557239	7.2050784				
6	Asphyxiation	0.2554365	0.2371262	3.5568933	1.7099759	2.1544347	1	1.3572088	0.10125984	0.05233243	0.21466226	0.10710382	0.15807739	0.08929413	0.07340026	0.7961301	0.1137329	0.829835	7.2963512				
7	Sengatan listrik	0.1644141	0.1609149	0.5848035	1.0626586	0.8434327	0.7368063	1	0.06517687	0.03551302	0.03529351	0.06655929	0.0618852	0.06579248	0.05408177	0.3843021	0.0549003	0.4042191	7.3627845				
	Total	2.5225842	4.5311521	16.569719	15.965593	13.628987	11.198944	18.490519	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.4503169	51.415724				

No	Safety System	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	1.1696071	4.6415888	4.6415888	4.2171633	2.4662121	2.9240177	0.30576585	0.33079777	0.35791859	0.26185982	0.30102373	0.26795537	0.22344568	2.0487668	0.292681	2.1589927	7.3766078				
2	Kebakaran	0.854988	1	2.9240177	4.2171633	4.4814047	3.6840315	3.4199519	0.26142612	0.28282812	0.22547458	0.23791543	0.31988545	0.40027215	0.26134365	1.9891455	0.2841636	2.1066189	7.4134006				
3	Tertimbun /	0.2154435	0.3419952	1	2.1544347	0.6436596	0.5428835	1.8420157	0.06587525	0.09672586	0.07711122	0.12154456	0.04594482	0.05898461	0.14076196	0.6069483	0.0867069	0.617872	7.1259841				
4	Jatuhnya beban	0.2154435	0.2371262	0.4641589	1	0.4641589	0.3684031	1.1856311	0.06587525	0.06706596	0.03579186	0.05641599	0.03313195	0.04002722	0.09060278	0.388911	0.0555587	0.3945919	7.1022497				
5	Tertabrak objek	0.2371262	0.2231443	1.5536163	2.1544347	1	0.4054801	1.3572088	0.0725051	0.06311149	0.11980125	0.12154456	0.07138062	0.04405565	0.1037143	0.596113	0.085159	0.61779	7.2545479				
6	Asphyxiation	0.4054801	0.2714418	1.8420157	2.7144176	2.4662121	1	1.3572088	0.12398198	0.07677136	0.14204009	0.15313655	0.17603975	0.10865058	0.1037143	0.8843346	0.1263335	0.9368755	7.4158902				
7	Sengatan listrik	0.3419952	0.2924018	0.5428835	0.8434327	0.7368063	0.7368063	1	0.10457045	0.08269944	0.04186241	0.04758309	0.05259369	0.08005443	0.07641735	0.4857809	0.0693973	0.5023435	7.2386641				
	Total	3.2704765	3.5357164	12.968281	17.725472	14.009405	9.2038167	13.086034	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.3350844	50.927344				

No	Temperature	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	0.9283178	4.9324241	4.9324241	4.9324241	2.2894285	3.9790572	0.29642421	0.30636603	0.27721381	0.28522836	0.32772811	0.22943376	0.31713308	2.0393774	0.2913396	2.0923461	7.1818108				
2	Kebakaran	1.0772173	1	4.9324241	4.9324241	4.9324241	4.578857	3.6342412	0.3193133	0.3300228	0.27721381	0.28522836	0.32772811	0.45880753	0.28954145	2.2878554	0.3268365	2.3841586	7.2946526				
3	Tertimbun /	0.2027401	0.2027401	1	1.1447142	0.4807499	0.3684031	0.7937005	0.06009706	0.06690884	0.05620235	0.06619564	0.03194276	0.03691448	0.06323444	0.3814956	0.0544994	0.3845031	7.0551839				
4	Jatuhnya beban	0.2027401	0.2027401	0.8735805	1	0.5503212	0.4054801	1	0.06009706	0.06690884	0.04909727	0.05782722	0.03656533	0.04062965	0.0796704	0.3907958	0.055828	0.394869	7.0729598	7.15923	0.02654	1.32	0.02011
5	Tertabrak objek	0.2027401	0.2027401	2.0800838	1.8171206	1	0.4641589	1	0.06009706	0.06690884	0.11690559	0.10507903	0.06644362	0.04650933	0.0796704	0.5416139	0.0773734	0.5480023	7.0825659				
6	Asphyxiation	0.4367902	0.2183951	2.7144176	2.4662121	2.1544347	1	1.1447142	0.1294752	0.07207537	0.15255664	0.14261418	0.14314844	0.10020132	0.09119984	0.831271	0.118753	0.8559777	7.2080511				
7	Sengatan listrik	0.2513158	0.2751606	1.259921	1	1	0.8735805	1	0.07449609	0.09080927	0.07081052	0.05782722	0.06644362	0.08753392	0.0796704	0.527591	0.0753701	0.5441275	7.2194034				
	Total	3.3735436	3.0300937	17.792851	17.292895	15.050354	9.9799081	12.551713	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.2039842	50.114628				

No	Strength	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	3.9148676	1.7099759	1.7099759	2.0274007	2.7144176	3.5568933	0.28028215	0.45732566	0.22748326	0.23392153	0.23653306	0.282279	0.1862728	1.9046475	0.2720068	2.099448	7.7183663				
2	Kebakaran	0.2554365	1	0.941036	1	1.1856311	2.5962471	2.8231081	0.07159428	0.11681766	0.12518686	0.13679814	0.13482937	0.26999015	0.14780513	1.1962796	0.1437885	1.1172087	7.7698045				
3	Tertimbun /	0.5848035	1.0626586	1	1.7099759	0.6933613	0.7469008	2	0.16390999	0.12413728	0.13303302	0.23392153	0.08089317	0.07767206	0.10471093	0.918278	0.1311826	0.9821799	7.4871223				
4	Jatuhnya beban	0.5848035	1	0.5848035	1	2.0800838	1.4938016	2.8844991	0.16390999	0.11681766	0.07779818	0.13679814	0.24267951	0.15534412	0.15101929	1.0443669	0.1491953	1.1233373	7.529309				
5	Tertabrak objek	0.4932424	0.8434327	1.4422496	0.4807499	1	0.8220707	2.7144176	0.13824704	0.09852783	0.19186681	0.06576569	0.11666814	0.08548917	0.14211459	0.8386793	0.1198113	0.8833351	7.3727183	7.50695	0.08449	1.32	0.06401
6	Asphyxiation	0.3684031	0.3851714	1.3388659	1.0626586	1.2164404	1	4.1228853	0.10325683	0.04499482	0.17811137	0.14536971	0.14191984	0.10399247	0.2157718	0.9334188	0.1339455	0.9776536	7.3319678				
7	Sengatan listrik	0.2811442	0.3542195	0.5	0.3466806	0.3684031	0.2426428	1	0.07879971	0.04137909	0.06651651	0.04742527	0.04298091	0.02523302	0.05235546	0.35469	0.05067	0.3718844	7.339342				
	Total	3.5678334	8.5603498	7.516931	7.310041	8.5713204	9.6160805	19.100203	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.5550787	52.54863				

No	Type	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	0.2714418	2.2680307	2.9240177	5	3.5568933	4.4814047	0.15253134	0.1192386	0.14573119	0.16960718	0.29937899	0.34685827	0.25676086	1.4901064	0.2128723	1.7720317	8.3243865				
2	Kebakaran	3.6840315	1	8.2414828	6.2572247	5.1924941	4.3795191	5.4513618	0.56193025	0.43927874	0.33678887	0.36295512	0.31090472	0.42707844	0.31233429	2.7512704	0.3930386	3.1785301	8.0870679				
3	Tertimbun /	0.4409111	0.1907857	1	1.3572088	0.5503212	0.2554365	1.7099759	0.06725276	0.08380811	0.0642545	0.07872468	0.03295092	0.02490945	0.09797261	0.449873	0.0642676	0.4718948	7.3426572				
4	Jatuhnya beban	0.3419952	0.1598127	0.7368063	1	0.4807499	0.3466806	1.3572088	0.05216498	0.07020232	0.04734312	0.05800484	0.02878528	0.03380732	0.07776091	0.3680688	0.0525813	0.3928297	7.470908	7.73326	0.12221	1.32	0.09258
5	Tertabrak objek	0.5848035	0.2426428	1.8171206	2.0800838	1	0.2751606	1.8356311	0.08920087	0.1065878	0.11675818	0.12065493	0.0598758	0.02683289	0.06793041	0.5878409	0.0839773	0.6281349	7.4798208				
6	Asphyxiation	0.2811442	0.2283356	3.9148676	2.8844991	3.6342412	1	2.2680307	0.0428833	0.10030296	0.25154787	0.16731491	0.21760309	0.0975172	0.1259462	1.0071155	0.1438736	1.1139459	7.7425287				
7	Sengatan listrik	0.2231443	0.1834404	0.5848035	0.7368063	0.8434327	0.4409111	1	0.0340365	0.08058147	0.03757626	0.04273833	0.05065012	0.04299642	0.0572973	0.3457249	0.0493893	0.3795805	7.6854839				
	Total	6.5560299	2.2764589	15.563112	17.239941	16.701239	10.254601	17.453613	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.9369475	54.132853				

No	Thickness	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Ledakan	Kebakaran	Tertimbun / Longsor	Jatuhnya beban	Tertabrak objek	Asphyxiation	Sengatan listrik	Total Weight	Eugen Vector	Perkalian Matriks	Eugen Value	λ maks	CI	IR	CR
1	Ledakan	1	1.7099759	4.4814047	5.1924941	5.4288352	4.4324241	4.9324241	0.3860683	0.36134775	0.39147758	0.41181715	0.4738418	0.34909523	0.23026967	2.6039175	0.3719882	2.838422	7.6304086				
2	Kebakaran	0.5848035	1	2.2894285	2.2894285	2.2894285	4.3267487	2.0800838	0.22577411	0.21131745	0.19995531	0.18157477	0.19982683	0.30622819	0.09710848	1.4218251	0.2031179	1.5550677	7.6559862				
3	Tertimbun /	0.2231443	0.4367902	1	1.1756311	0.4807499	1.8171206	4.9324241	0.08614895	0.0923014	0.087356	0.0940325	0.041961	0.12860778	0.23026967	0.7606773	0.1086682	0.8129931	7.4814016				
4	Jatuhnya beban	0.1925857	0.4367902	0.8434327	1	0.6933613	0.8735805	2.8231081	0.07435123	0.0923014	0.0736789	0.07931008	0.06051824	0.06182817	0.13179648	0.5737845	0.0819692	0.6121794	7.4684069				
5	Tertabrak objek	0.1842016	0.4367902	0.2800838	1.4422496	1	0.8735805	2.3811016	0.07111439	0.0923014	0.1817078	0.11438494	0.08728241	0.06182817	0.11116146	0.7197806	0.1028258	0.7903484	7.6862854	7.51969	0.08662	1.32	0.06562
6	Asphyxiation	0.2027401	0.2311204	0.5503212	1.1447142	1.1447142	1	3.2710663	0.07827151	0.04883978	0.04807386	0.09078738	0.09991341	0.07077559	0.15270936	0.5893709	0.0841958	0.6324057	7.511128				
7	Sengatan listrik	0.2027401	0.4807499	0.2027401	0.3542195	0.4199737	0.3057107	1	0.07827151	0.10159083	0.01771056	0.02809318	0.03665631	0.02163686	0.04668489	0.3306441	0.0472349	0.3402909	7.2042289				
	Total	2.5902153	4.7322169	11.447411	12.608737	11.457063	14.129165	21.420208	1	1	1	1	1	1	1	7	1	7.5817045	52.637846				

Gambar 4. 14 Hasil pembobotan dan uji konsistensi alternatif terhadap sub-kriteria

4.4.6 *Pengambilan keputusan.*

Prioritas global diperoleh dari hasil perkalian bobot alternatif dengan bobot kriteria. Dari proses tersebut, dihasilkan ranking risiko yang menunjukkan risiko paling dominan pada proyek *pipeline*. Risiko dengan nilai tertinggi kemudian menjadi prioritas utama dalam pengendalian keselamatan kerja:

PENGAMBILAN KEPUTUSAN									
Atribute Weight	***Atribute***								***Alt. Weight Evaluation***
	Design			**Material**			**Rute**	**Metode**	
	0.633958404			0.2067131			0.07382519	0.08550331	
	Pressure & MAOP	**Safety System**	**Temperature**	**Strength**	**Type**	**Thickness**			
	0.652058245	0.271347029	0.076594726	0.46676376	0.08710856	0.44612768			
	Alternatif								
Ledakan	0.352259355	0.292680971	0.291339624	0.27200678	0.21287235	0.37198821	0.10390751	0.29149388	0.307088384
Kebakaran	0.28274744	0.284163643	0.326836481	0.14378851	0.39303863	0.20311788	0.12836127	0.11249161	0.240411771
Tertimbun / Longsor	0.061951328	0.086706897	0.054499368	0.13118257	0.06426758	0.10866819	0.16987502	0.0914071	0.087363864
Jatuhnya beban	0.057068939	0.055558716	0.055827968	0.14919527	0.05258125	0.08196921	0.11622103	0.21951866	0.086110215
Tertabrak objek	0.077339755	0.085158994	0.077373412	0.11981132	0.08397727	0.10282579	0.22815109	0.12996955	0.100887944
Asphyxiation	0.113732876	0.126333513	0.118752999	0.13334555	0.14387365	0.08419584	0.1457181	0.09586643	0.116689076
Sengatan listrik	0.054900307	0.069397265	0.075370148	0.05067	0.04938927	0.04723488	0.10776599	0.05925278	0.061448745
									1

Gambar 4. 15 Hasil pengambilan keputusan risiko

BAB V
PEMBAHASAN

5.1 Analisis Hasil Identifikasi Bahaya dan Risiko

Berdasarkan hasil identifikasi menggunakan metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control* (HIRADC), diperoleh berbagai potensi bahaya dan risiko pada seluruh tahapan pekerjaan pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1, mulai dari *lifting operation*, *trenching*/*excavation*, *welding/hot work*, *installation*, *inspection*, *pre-commissioning*, hingga *commissioning*. Masing-masing tahapan memiliki karakteristik bahaya yang berbeda karena dipengaruhi oleh jenis aktivitas, peralatan yang digunakan, serta sumber energi yang terlibat dalam pekerjaan. Secara umum, hasil identifikasi menunjukkan bahwa proyek pembangunan pipa gas merupakan pekerjaan dengan tingkat kompleksitas keselamatan yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh beragam aktivitas yang dilakukan, mulai dari pengangkatan material berat, pekerjaan penggalian, *hot work*, pekerjaan pada sistem bertekanan, hingga proses pengoperasian awal jaringan pipa.

Pada tahap *lifting operation*, bahaya yang teridentifikasi meliputi beban jatuh (*dropped object*) saat pengangkatan *spool* dan pekerja yang tertabrak objek yang sedang diangkat (*struck by object*). Risiko tersebut umumnya dipicu oleh kegagalan alat angkat, kerusakan sling, kesalahan komunikasi antara *operator crane* dan *rigger*, maupun keberadaan pekerja di dalam area pengangkatan. Kondisi ini dapat menimbulkan cedera serius bahkan kematian mengingat material pipa memiliki dimensi dan berat yang cukup besar. Hal ini serupa dengan penelitian Sadewa dan Syaifullah (2025) yang menyatakan bahwa aktivitas pengangkatan material merupakan salah satu pekerjaan dengan tingkat bahaya tinggi karena melibatkan interaksi antara alat berat, beban berkapasitas besar, dan pekerja di lapangan. Marhavilas et al. (2025) juga menjelaskan bahwa pekerjaan pengangkatan material memerlukan identifikasi bahaya dan analisis risiko yang komprehensif karena kegagalan pada salah satu komponen sistem pengangkatan dapat berujung pada kecelakaan dengan konsekuensi fatal. Dengan demikian, risiko pada aktivitas *lifting* tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi teknis peralatan, tetapi juga oleh penerapan prosedur kerja dan faktor manusia selama proses pengangkatan berlangsung.

Pada tahap *trenching*/*excavation*, bahaya yang ditemukan antara lain berasal dari kondisi tanah yang labil, penempatan material galian (*spoil*) yang tidak aman, serta perubahan kondisi tanah akibat cuaca. Ketiga kondisi tersebut dapat memicu longsor *trench*, runtuhnya dinding

galian, maupun ketidakstabilan area kerja. Karakteristik risiko pada tahap ini sangat dipengaruhi oleh kondisi geoteknik, kedalaman galian, dan lingkungan di sekitar lokasi proyek.

Hasil ini mendukung penelitian Ferlania et al. (2024) yang menjelaskan bahwa pekerjaan galian pada proyek konstruksi merupakan salah satu aktivitas dengan tingkat risiko tinggi karena sangat dipengaruhi oleh stabilitas tanah dan penerapan sistem pengamanan galian. Selain itu, Hariri et al. (2021) mengemukakan bahwa perubahan karakteristik tanah akibat faktor lingkungan dapat meningkatkan potensi kegagalan lereng maupun longsoran tanah. Meskipun penelitian tersebut berfokus pada bahaya lingkungan, penelitian yang disampaikan tetap relevan untuk menjelaskan bahwa kondisi geologi serta perubahan kadar air tanah perlu menjadi perhatian dalam pekerjaan penggalian pipa.

5.2 Analisis Tingkat Risiko Berdasarkan HIRADC

Setelah proses identifikasi bahaya selesai dilakukan, tahapan berikutnya dalam metode HIRADC adalah penilaian risiko (*Risk Assessment*). Tahap ini bertujuan untuk menentukan tingkat risiko dari setiap potensi bahaya melalui kombinasi nilai *severity*, yang menggambarkan tingkat keparahan dampak apabila risiko terjadi, dan *likelihood*, yang menunjukkan kemungkinan terjadinya risiko tersebut. Hasil penilaian ini menjadi dasar dalam menentukan prioritas pengendalian sehingga sumber daya perusahaan dapat difokuskan pada aktivitas yang memiliki tingkat risiko paling tinggi.

Berdasarkan hasil penilaian risiko terhadap seluruh aktivitas pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1, diperoleh enam risiko yang termasuk dalam kategori *High Risk*, yaitu ketidakstabilan *trench*, sengatan listrik pada pekerjaan *welding*, pelepasan tekanan mendadak pada tahap *installation*, *overpressure system*, *loss of containment*, serta lonjakan tekanan (*pressure surge*) pada tahap *commissioning*. Sementara itu, sepuluh risiko lainnya berada pada kategori *Medium Risk*, yaitu jatuhnya beban, tertabrak objek terangkat, longsor *trench*, runtuhnya dinding galian, kebakaran atau ledakan saat *welding*, penyalaan (*ignition*), kebocoran gas, paparan radiasi, *rupture* pipa, dan pelepasan gas. Dari seluruh risiko yang diidentifikasi, tidak ditemukan risiko yang termasuk kategori *Low Risk* maupun *Extreme Risk*. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh aktivitas yang dianalisis merupakan pekerjaan kritis dengan konsekuensi yang relatif besar sehingga memerlukan pengendalian yang memadai sebelum pekerjaan dilaksanakan.

Dominasi risiko pada kategori *Medium* dan *High* menggambarkan bahwa proyek pembangunan pipa gas memiliki karakteristik bahaya yang cukup tinggi karena melibatkan kombinasi pekerjaan konstruksi, sistem bertekanan, energi listrik, serta keberadaan gas yang mudah terbakar. Menariknya, beberapa aktivitas memiliki nilai *likelihood* yang relatif rendah, tetapi tetap berada pada kategori risiko tinggi karena nilai *severity*-nya sangat besar. Kondisi ini terlihat pada risiko sengatan listrik, *loss of containment*, dan lonjakan tekanan yang masing-masing memiliki nilai *severity* sebesar lima. Meskipun peluang kejadiannya tidak terlalu sering, dampak yang dapat ditimbulkan berupa cedera berat, ledakan, maupun kegagalan sistem yang berpengaruh signifikan terhadap pekerja dan fasilitas.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Ismail et al. (2020) yang menjelaskan bahwa pada industri minyak dan gas, tingkat risiko tidak hanya ditentukan oleh frekuensi kejadian, tetapi juga oleh besarnya konsekuensi apabila kegagalan terjadi. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa pekerjaan yang melibatkan hidrokarbon, sistem bertekanan, dan berbagai sumber energi lainnya cenderung memiliki nilai *severity* yang tinggi sehingga tetap dikategorikan sebagai risiko prioritas meskipun probabilitas kejadiannya relatif rendah. Pada penelitian ini semakin memperkuat bahwa penilaian risiko pada proyek pembangunan pipa gas perlu mempertimbangkan besarnya konsekuensi kegagalan secara menyeluruh, bukan hanya kemungkinan terjadinya kecelakaan.

Jika dilihat berdasarkan jenis aktivitasnya, risiko dengan kategori *High Risk* didominasi oleh pekerjaan yang berkaitan dengan integritas sistem bertekanan, yaitu pelepasan tekanan mendadak, *overpressure system*, *loss of containment*, dan lonjakan tekanan pada tahap *commissioning*. Kondisi ini menunjukkan bahwa fase transisi dari konstruksi menuju pengoperasian merupakan tahapan yang paling kritis karena pada fase tersebut sistem mulai menerima tekanan aktual sesuai kondisi operasi. Akibatnya, energi yang tersimpan di dalam fluida bertekanan meningkat secara signifikan sehingga kegagalan kecil pada sambungan, *flange*, maupun komponen perpipaan dapat berkembang menjadi kecelakaan yang lebih besar.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Jabbari et al. (2021) yang menunjukkan bahwa risiko utama pada sistem perpipaan gas berasal dari pelepasan gas, ledakan, dan kegagalan sistem akibat tekanan tinggi. Pada penelitian (Jabbari et al., 2021) juga menjelaskan bahwa fasilitas dengan potensi bahaya besar (*major hazard facilities*) memerlukan penilaian risiko yang lebih

komprehensif karena kegagalan sistem bertekanan tidak hanya berdampak pada keselamatan pekerja, tetapi juga dapat memengaruhi aset perusahaan dan lingkungan di sekitarnya.

Selain risiko yang berasal dari sistem bertekanan, penelitian ini juga menunjukkan bahwa beberapa risiko kategori tinggi muncul pada pekerjaan konstruksi, yaitu ketidakstabilan *trench* dan sengatan listrik saat *welding*. Ketidakstabilan *trench* dikategorikan sebagai *High Risk* karena memiliki kombinasi nilai *severity* sebesar empat dan *likelihood* sebesar tiga. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi tanah akibat cuaca, karakteristik geoteknik, maupun metode penggalian dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya longsoran yang membahayakan pekerja di dalam galian. Hasil tsersebut mendukung penelitian Ferlania et al. (2024) yang menyatakan bahwa pekerjaan galian merupakan salah satu aktivitas konstruksi dengan tingkat risiko tinggi apabila stabilitas tanah dan sistem proteksi galian tidak dikendalikan secara memadai. Sementara itu, risiko sengatan listrik pada pekerjaan *welding* termasuk dalam kategori tinggi karena memiliki konsekuensi yang paling berat dibandingkan risiko lain pada aktivitas *hot work*. Penjelasan ini juga sejalan dengan Amalia et al. (2023) dan Ismail et al. (2020) yang menyebutkan bahwa pekerjaan pengelasan tidak hanya memiliki potensi kebakaran, tetapi juga risiko kontak langsung dengan energi listrik yang dapat menyebabkan cedera berat hingga kematian.

Di sisi lain, sebagian besar aktivitas masih berada pada kategori *Medium Risk*. Meskipun tingkat risikonya lebih rendah dibandingkan kategori tinggi, bukan berarti risiko tersebut dapat diabaikan. Risiko-risiko tersebut tetap memerlukan pengendalian karena berpotensi berkembang menjadi kecelakaan yang lebih serius apabila tidak dikelola dengan baik. Sebagai contoh, risiko jatuhnya beban pada aktivitas *lifting* maupun kebakaran saat *welding* memiliki nilai *severity* yang tinggi, tetapi peluang kejadiannya relatif lebih rendah karena aktivitas tersebut umumnya telah didukung oleh prosedur operasi, inspeksi peralatan, serta pengawasan kerja yang memadai. Dengan demikian, kategori *Medium Risk* tetap menunjukkan perlunya pengendalian sesuai tingkat prioritas risiko yang telah ditetapkan.

Secara keseluruhan, hasil penilaian risiko menunjukkan bahwa sumber risiko yang paling dominan pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1 berasal dari sistem bertekanan, energi listrik, serta ketidakstabilan kondisi kerja di lapangan. Selain itu, terlihat bahwa tingkat risiko cenderung meningkat ketika proyek memasuki tahap *pre-commissioning* dan *commissioning*, yaitu saat sistem mulai dioperasikan menggunakan tekanan aktual.

5.3 Analisis Pengendalian Risiko Berdasarkan Hierarki Control

Setelah identifikasi bahaya dan penilaian risiko dilakukan menggunakan metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control* (HIRADC), tahap berikutnya adalah menentukan pengendalian risiko (*Determining Control*) melalui wawancara dengan Bapak Kusno Kurniawan selaku Manager Divisi *Production and Operation*. Wawancara ini bertujuan untuk menentukan tindakan pengendalian yang paling sesuai dengan mempertimbangkan kondisi aktual di lapangan, tingkat bahaya, ketersediaan fasilitas, serta efektivitas penerapannya. Hasil penentuan pengendalian tersebut disajikan pada Tabel 4.15. Pada pembahasan ini, pengendalian pada kategori aktivitas dengan tingkat risiko *High* dibahas secara lebih mendalam, yaitu *trenching/excavation*, *welding/hot work*, *installation*, dan *commissioning*. Sedangkan, kategori aktivitas dengan tingkat risiko *medium* diuraikan secara lebih ringkas.

Pada aktivitas *trenching/excavation*, hasil wawancara menunjukkan bahwa pengendalian diprioritaskan pada *administrative control* berupa revisi *Standard Operating Procedure* (SOP) *construction and installation procedure* dengan menambahkan ketentuan *Stop Work Authority* (SWA). Penerapan SWA memberikan kewenangan kepada setiap pekerja untuk menghentikan pekerjaan apabila ditemukan kondisi yang tidak aman, sehingga potensi kecelakaan akibat ketidakstabilan *trench* dapat dicegah sebelum terjadi (Occupational Safety and Health Administration, 2022). Pengendalian administratif ini dipilih karena kondisi tanah dan cuaca yang memengaruhi kestabilan galian bersifat dinamis. Dalam kondisi seperti ini, kewenangan pekerja untuk menghentikan pekerjaan secara langsung dinilai lebih responsif dibandingkan hanya mengandalkan pengendalian teknis.

Pada aktivitas *welding/hot work*, pengendalian diprioritaskan pada penyediaan personel medis oleh kontraktor selama pelaksanaan pekerjaan konstruksi dan instalasi. Aktivitas *hot work* memiliki potensi menimbulkan luka bakar, sengatan listrik, maupun ledakan. Oleh karena itu, keberadaan personel medis di lokasi kerja diperlukan agar respons terhadap kondisi darurat (*emergency response*) dapat dilakukan lebih cepat dan tingkat keparahan cedera, khususnya akibat sengatan listrik, dapat diminimalkan (National Fire Protection Association, 2024; OSHA). Prioritas ini menunjukkan bahwa pada risiko dengan nilai *severity* yang tinggi, seperti sengatan listrik, kecepatan respons darurat menjadi faktor yang sangat penting dalam mengurangi dampak kecelakaan.

Pada aktivitas *installation*, pengendalian diprioritaskan pada penambahan dokumen *Installation Procedure RTP Pipeline* dari manufaktur yang memuat batasan beban tarik dan diintegrasikan ke dalam SOP *construction and installation procedure*. Dokumen tersebut berisi persyaratan teknis, seperti batas beban tarik maksimum, radius pembengkokan, metode penanganan, serta prosedur instalasi yang harus dipenuhi untuk menjaga integritas pipa (American Petroleum Institute RP 1111). Hasil wawancara menunjukkan bahwa risiko pelepasan tekanan secara tiba-tiba pada tahap *isolation* lebih efektif dikendalikan melalui kepatuhan terhadap persyaratan teknis dari manufaktur dibandingkan hanya mengandalkan pengawasan selama pekerjaan berlangsung.

Pada tahap *commissioning*, pengendalian diprioritaskan pada *engineering control* berupa penggunaan *Pressure Safety Valve* (PSV) yang berfungsi melindungi sistem dari kondisi *overpressure*. Ketika tekanan melebihi batas desain, PSV akan membuka secara otomatis untuk melepaskan tekanan sehingga risiko kegagalan peralatan, kebocoran, maupun ledakan dapat diminimalkan (Stouffer et al., 2015; API). Pemilihan pengendalian ini sejalan dengan karakteristik tiga risiko berkategori *High* pada tahap *commissioning*, yaitu *overpressure system*, *loss of containment*, dan lonjakan tekanan. Ketiga risiko tersebut berkaitan langsung dengan integritas sistem bertekanan sehingga memerlukan sistem proteksi otomatis, bukan hanya pengendalian administratif.

Sementara itu, pada kategori aktivitas dengan tingkat risiko medium, hasil wawancara juga menghasilkan beberapa pengendalian yang relevan. Pada aktivitas *lifting*, diprioritaskan penyusunan *Journey Management Plan* (JMP) atau *rigging plan engineering* untuk memastikan kapasitas alat angkat dan jalur perpindahan beban telah direncanakan dengan baik (Subbiah et al., 2025). Pada aktivitas *inspection*, pengendalian dilakukan melalui penerapan *digital inspection* untuk mengurangi paparan personel di area radiasi sesuai prinsip *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA) (International Atomic Energy Agency, 2018). Sementara itu, pada tahap *pre-commissioning* dan *commissioning*, diprioritaskan penyusunan *organization chart* tim guna memperjelas pembagian tugas serta jalur komunikasi (CCPS; IOGP 577). Meskipun demikian, pengendalian pada kategori aktivitas ini tidak menjadi fokus pembahasan lebih lanjut karena tingkat urgensinya relatif lebih rendah dibandingkan aktivitas yang termasuk kategori *High*.

Secara keseluruhan, hasil wawancara menunjukkan bahwa pemilihan pengendalian pada setiap kategori aktivitas tidak mengikuti satu tingkat *Hierarchy of Control* secara seragam. Jenis pengendalian yang dipilih disesuaikan dengan karakteristik risiko dan kondisi yang dihadapi di lapangan. Pada aktivitas *trenching*, misalnya, pengendalian lebih menitikberatkan pada aspek administratif karena dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang dinamis. Sebaliknya, pada aktivitas *welding* penekanannya berada pada kesiapan respons darurat akibat tingginya potensi cedera langsung. Untuk aktivitas *installation*, pengendalian difokuskan pada kepatuhan terhadap persyaratan teknis dari manufaktur guna menjaga integritas material, sedangkan pada tahap *commissioning* diprioritaskan penggunaan sistem proteksi otomatis untuk mengendalikan risiko pada sistem bertekanan. Pola tersebut menunjukkan bahwa keempat aktivitas dengan tingkat risiko *High* memerlukan strategi pengendalian yang lebih spesifik dan ketat dibandingkan aktivitas dengan tingkat risiko medium, sejalan dengan prinsip bahwa pengendalian risiko perlu disesuaikan dengan tingkat keparahan risiko yang dihadapi (ISO 45001:2018).

5.4 Analisis Hasil Pembobotan AHP

Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) digunakan untuk menentukan tingkat prioritas faktor-faktor *Detail Engineering Design* (DED) yang memengaruhi risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1. Pembobotan dilakukan berdasarkan *expert judgment* melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) terhadap empat kriteria utama, yaitu desain, material, rute, dan metode.

Pengisian *pairwise comparison* pada penelitian ini melibatkan tiga *expert* yang berasal dari staf *engineering* Divisi *Production and Operation* (PnO). Ketiga *expert* tersebut dipilih karena terlibat secara langsung dalam penyusunan dan peninjauan dokumen *Detail Engineering Design* (DED), sehingga memahami keterkaitan antara aspek desain, material, rute, dan metode konstruksi dengan potensi risiko keselamatan kerja. Selain itu, mereka juga memiliki pengalaman pada proyek *pipeline* serupa, sehingga penilaian yang diberikan tidak hanya didasarkan pada pemahaman teknis, tetapi juga pengalaman praktis di lapangan.

Sementara itu, Manager Divisi *Production and Operation* tidak dilibatkan dalam pengisian *pairwise comparison*, melainkan sebagai *key informant* pada tahap wawancara untuk memperoleh informasi mengenai pelaksanaan proyek serta memvalidasi rekomendasi *hazard*

controls. Hal ini karena proses perbandingan berpasangan dalam AHP memerlukan penilaian teknis yang rinci dan konsisten terhadap setiap pasangan kriteria, sub-kriteria, maupun alternatif. Oleh sebab itu, pengisian kuesioner lebih sesuai dilakukan oleh staf *engineering* yang terlibat secara langsung dalam penyusunan dan implementasi aspek teknis *Detail Engineering Design* (DED). Sedangkan, Manager *Production and Operation* lebih berperan dalam memberikan masukan terkait pengambilan keputusan dan pengelolaan proyek secara keseluruhan, sehingga keterlibatannya difokuskan pada tahap validasi hasil penelitian serta penyusunan rekomendasi pengendalian risiko.

Selanjutnya, dilakukan pengujian konsistensi untuk memastikan bahwa penilaian yang diberikan oleh responden memiliki tingkat konsistensi yang dapat diterima sehingga hasil pembobotan dapat digunakan sebagai dasar dalam proses analisis.

Berdasarkan hasil perhitungan AHP, kriteria desain memperoleh bobot tertinggi sebesar 0,633, diikuti oleh material sebesar 0,206, metode sebesar 0,085, dan rute sebesar 0,073. Hasil tersebut menunjukkan bahwa desain merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap munculnya risiko keselamatan kerja dibandingkan ketiga faktor lainnya. Pengujian konsistensi juga menghasilkan nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,090, yang masih berada di bawah batas maksimum 0,10 sebagaimana dikemukakan oleh Saaty (1980). Dengan demikian, penilaian yang diberikan oleh responden dapat dinyatakan konsisten sehingga hasil pembobotan memiliki tingkat keandalan yang memadai untuk dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan. Besarnya bobot pada faktor desain menunjuk2kan bahwa keputusan-keputusan yang diambil pada tahap *Detail Engineering Design* (DED) memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan pipa gas. Keputusan tersebut mencakup penentuan tekanan operasi, spesifikasi perpipaan, konfigurasi sistem, desain sambungan, metode *crossing*, hingga filosofi keselamatan yang diterapkan pada sistem. Dibandingkan faktor lainnya, aspek-aspek tersebut memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap munculnya risiko selama proyek berlangsung. Hal ini mengindikasikan bahwa berbagai potensi bahaya yang teridentifikasi dalam penelitian ini tidak hanya dipengaruhi oleh aktivitas konstruksi di lapangan, tetapi juga oleh keputusan teknis yang telah ditetapkan sejak tahap perencanaan.

Dalam hal ini juga konsisten dengan hasil identifikasi bahaya dan penilaian risiko yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Risiko seperti *overpressure system, loss of containment*,

rupture pipa, maupun *pressure surge* memiliki keterkaitan yang erat dengan keputusan desain sistem perpipaan. Karakteristik risiko tersebut pada dasarnya telah terbentuk sejak proses perancangan sehingga tidak dapat sepenuhnya dihilangkan ketika proyek memasuki tahap konstruksi. Oleh karena itu, peningkatan kualitas *Detail Engineering Design* menjadi salah satu langkah yang paling efektif untuk menurunkan tingkat risiko keselamatan, baik selama proses pembangunan maupun pada tahap awal pengoperasian sistem perpipaan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Marhavilas et al. (2025) yang menjelaskan bahwa pengambilan keputusan dalam sistem keselamatan perlu mempertimbangkan faktor-faktor teknis yang memiliki pengaruh terbesar terhadap konsekuensi kecelakaan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode AHP mampu mengidentifikasi faktor-faktor yang menjadi prioritas sehingga pengendalian risiko dapat difokuskan pada aspek yang memberikan dampak paling signifikan terhadap keselamatan sistem. Penjelasan serupa juga disampaikan oleh Cadena et al. (2026), yang menyatakan bahwa pada *major hazard facilities*, kualitas desain teknik merupakan salah satu faktor utama yang menentukan efektivitas pengendalian risiko sepanjang siklus hidup fasilitas. Selain itu, Fajri et al. (2026) menegaskan bahwa pada sistem perpipaan bertekanan, keputusan desain yang berkaitan dengan spesifikasi material, konfigurasi sistem, serta sistem proteksi tekanan memiliki kontribusi yang besar dalam mencegah terjadinya kegagalan sistem. Di sisi lain, faktor rute memperoleh bobot paling rendah, yaitu sebesar 0,073. Hasil ini bukan berarti faktor rute tidak penting, tetapi menunjukkan bahwa menurut *expert*, pengaruhnya terhadap risiko keselamatan kerja relatif lebih kecil dibandingkan faktor desain, material, dan metode. Kondisi tersebut dapat dipahami karena setelah jalur perpipaan ditetapkan melalui survei dan kajian teknis, sebagian besar risiko keselamatan selama konstruksi lebih dipengaruhi oleh bagaimana sistem dirancang dan dibangun daripada lokasi jalurnya. Meskipun demikian, faktor rute tetap memberikan kontribusi terhadap beberapa risiko tertentu, seperti stabilitas tanah, pekerjaan penggalian, maupun kebutuhan penerapan metode konstruksi khusus pada area penyeberangan.

Secara keseluruhan, hasil pembobotan AHP menunjukkan bahwa peningkatan kualitas *Detail Engineering Design* perlu menjadi fokus utama dalam upaya pengendalian risiko keselamatan kerja. Hal ini terutama terlihat pada aspek desain dan material. Penelitian tersebut memberikan implikasi bahwa peningkatan keselamatan proyek tidak cukup hanya dilakukan melalui pengawasan selama pelaksanaan konstruksi, tetapi juga harus dimulai sejak tahap

perancangan teknik. Dengan demikian, potensi bahaya dapat diminimalkan lebih awal sebelum pekerjaan konstruksi dilaksanakan di lapangan.

5.5 Analisis Prioritas Risiko

Setelah dilakukan pembobotan terhadap kriteria, sub-kriteria, dan alternatif menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP), diperoleh urutan prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1. Urutan tersebut menggambarkan tingkat kepentingan relatif setiap risiko berdasarkan faktor *Detail Engineering Design* (DED) yang ditentukan melalui *pairwise comparison* dan *expert judgment*.

Berdasarkan hasil pembobotan global, urutan prioritas ketujuh alternatif risiko adalah ledakan sebesar 0,3070, kebakaran sebesar 0,2404, *asphyxiation* sebesar 0,1166, tertabrak objek sebesar 0,1008, tertimbun/longsor sebesar 0,0873, jatuhnya beban sebesar 0,0861, dan sengatan listrik sebesar 0,0614. Secara umum, risiko yang berkaitan dengan sistem perpipaan bertekanan dan fluida gas memperoleh bobot lebih tinggi dibandingkan risiko yang berasal dari aktivitas konstruksi konvensional.

Ledakan menempati prioritas tertinggi karena memiliki konsekuensi paling besar terhadap keselamatan pekerja maupun keberlangsungan proyek. Pada pembangunan pipa gas, ledakan dapat dipicu oleh kebocoran gas, akumulasi gas mudah terbakar, kegagalan sistem bertekanan, maupun adanya sumber penyalaan pada tahap *pre-commissioning* dan *commissioning*. Dampaknya tidak hanya mengancam keselamatan pekerja, tetapi juga berpotensi menyebabkan kerusakan fasilitas, keterlambatan proyek, dan kerugian ekonomi. Temuan ini sejalan dengan hasil penilaian HIRADC yang menempatkan *overpressure system, loss of containment*, dan *pressure surge* sebagai risiko berkategori *High* Risk dengan konsekuensi utama berupa ledakan. Dengan demikian, HIRADC dan AHP saling melengkapi. HIRADC mengidentifikasi aktivitas yang memiliki tingkat risiko tinggi, sedangkan AHP menunjukkan bahwa risiko tersebut juga memiliki prioritas tertinggi jika ditinjau dari faktor DED. Temuan ini didukung oleh Cadena et al. (2026) yang menyatakan bahwa risiko dominan pada sistem perpipaan gas berasal dari kebakaran, ledakan, dan pelepasan gas akibat kegagalan sistem bertekanan. Cadena et al. (2026) juga menjelaskan bahwa pada *major hazard facilities*, ledakan merupakan salah satu skenario dengan konsekuensi terbesar sehingga menjadi fokus dalam *Quantitative Risk Assessment*.

Selain itu, Fajri et al. (2026) menegaskan bahwa kegagalan integritas sistem perpipaan bertekanan berpotensi berkembang menjadi ledakan.

Dengan mempertimbangkan keterbatasan sumber daya pengendalian yang dimiliki perusahaan serta tingkat urgensi penanganan, pembahasan pada subbab berikut difokuskan pada risiko yang termasuk kategori *High* Risk berdasarkan hasil HIRADC, yaitu ledakan yang merepresentasikan *overpressure system*, *loss of containment*, lonjakan tekanan, dan pelepasan tekanan mendadak; tertimbun/longsor yang merepresentasikan ketidakstabilan *trench*; serta sengatan listrik. Pemilihan ketiga risiko tersebut didasarkan pada dua pertimbangan. Pertama, ketiganya memiliki nilai *severity* tertinggi pada hasil HIRADC sehingga berpotensi menimbulkan dampak paling fatal apabila terjadi. Kedua, risiko ledakan juga menempati peringkat pertama pada hasil AHP, sehingga kedua metode secara konsisten menunjukkan bahwa risiko tersebut menjadi prioritas utama untuk dikendalikan

Meskipun berada pada peringkat kelima dengan bobot global sebesar 0,0873, risiko tertimbun/longsor tetap menjadi fokus pembahasan karena mewakili risiko ketidakstabilan *trench* yang termasuk kategori *High Risk* pada HIRADC, dengan nilai *severity* sebesar empat dan *likelihood* sebesar tiga. Risiko ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti perubahan kondisi tanah akibat cuaca, karakteristik geoteknik, maupun metode penggalian yang digunakan, sehingga dapat meningkatkan potensi longsoran dan membahayakan pekerja di dalam galian. Temuan tersebut sejalan dengan Ferlania et al. (2024) yang menyatakan bahwa pekerjaan galian merupakan salah satu aktivitas konstruksi dengan tingkat risiko tinggi apabila stabilitas tanah dan sistem proteksi galian tidak dikendalikan secara memadai. Pendapat tersebut juga didukung oleh Hariri et al. (2021) yang menjelaskan bahwa perubahan karakteristik tanah akibat faktor lingkungan dapat meningkatkan potensi kegagalan lereng.

Hal yang sama juga terlihat pada risiko sengatan listrik. Meskipun memiliki bobot prioritas paling rendah di antara ketujuh alternatif, yaitu sebesar 0,0614, risiko ini tetap dipertahankan sebagai fokus pembahasan karena termasuk kategori *High Risk* pada HIRADC dengan nilai *severity* tertinggi, yaitu lima, setara dengan risiko *loss of containment* dan lonjakan tekanan. Dengan artian, peluang kejadiannya memang relatif lebih rendah, tetapi konsekuensi yang ditimbulkan pada pekerjaan *welding/hot work* dapat berakibat fatal. Temuan ini sejalan dengan Amalia et al. (2023) dan Ismail et al. (2020) yang menjelaskan bahwa pekerjaan pengelasan

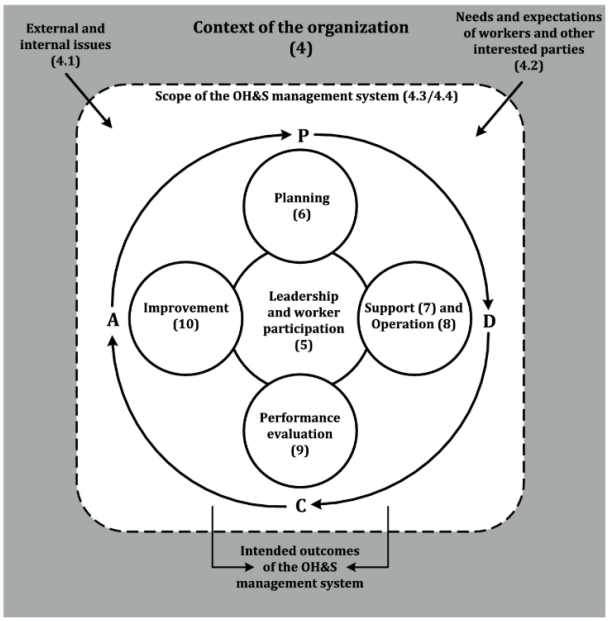
tidak hanya memiliki potensi kebakaran, tetapi juga risiko kontak langsung dengan energi listrik yang dapat menyebabkan cedera berat hingga kematian.

Di sisi lain, risiko kebakaran, *asphyxiation*, tertabrak objek, dan jatuhnya beban juga memperoleh bobot AHP yang cukup besar, bahkan kebakaran dan *asphyxiation* menempati peringkat kedua dan ketiga secara global. Namun, keempat risiko tersebut masih berada pada kategori *Medium Risk* berdasarkan hasil HIRADC. Oleh karena itu, pengendaliannya dinilai masih dapat dilakukan melalui penerapan prosedur kerja, pengawasan lapangan, dan penggunaan peralatan keselamatan yang telah tersedia tanpa memerlukan pengendalian tambahan yang bersifat prioritas seperti pada risiko berkategori *High Risk*.

Secara keseluruhan, hasil pembobotan AHP menunjukkan bahwa prioritas risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1 didominasi oleh risiko yang berkaitan dengan sistem perpipaan bertekanan, karakteristik fluida gas, serta kondisi kerja di lapangan. Ketika hasil AHP dipadukan dengan hasil penilaian HIRADC, terlihat bahwa ledakan, tertimbun/longsor, dan sengatan listrik menjadi tiga risiko yang paling membutuhkan perhatian dalam upaya pengendalian keselamatan kerja.

5.6 Analisis Keterkaitan Keselamatan Kerja Proyek Pipeline dengan Faktor DED

Selain memberikan kontribusi teknis melalui integrasi HIRADC dan AHP, penelitian ini juga menunjukkan bahwa kualitas *Detail Engineering Design* (DED) memiliki keterkaitan dengan efektivitas setiap elemen dalam siklus *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) sebagaimana diadopsi dalam ISO 45001:2018 tentang *Occupational Health and Safety Management Systems*. Dalam konteks penelitian ini, DED tidak hanya memengaruhi satu tahapan tertentu, tetapi juga menjadi dasar yang mendukung pelaksanaan seluruh siklus manajemen K3, mulai dari perencanaan, pelaksanaan, evaluasi, hingga perbaikan berkelanjutan.



Gambar 5. 1 Kerangka SMK3 ISO 45001:2018

Pada elemen *leadership and worker participation*, keberadaan DED menjadi dasar dalam proses pengambilan keputusan yang berkaitan dengan K3, baik oleh pihak manajemen maupun pekerja. Pada penelitian ini, penilaian dari tiga *expert* yang berasal dari staf *engineering* Divisi *Production and Operation* melalui *pairwise comparison* AHP dapat dilakukan secara objektif karena mengacu pada dokumen DED yang memuat parameter desain, material, rute, dan metode. Dokumen yang sama juga menjadi acuan bagi Manager dalam menentukan pengendalian melalui proses wawancara. Tanpa DED yang memadai, penilaian maupun keputusan yang dihasilkan cenderung lebih bersifat asumtif karena tidak didasarkan pada acuan teknis yang sama.

Pengaruh DED juga terlihat pada elemen *Planning*. Proses identifikasi bahaya menggunakan HIRADC mengacu pada parameter teknis yang tercantum dalam DED, seperti *pressure* dan *Maximum Allowable Operating Pressure* (MAOP), spesifikasi material, serta metode konstruksi yang direncanakan. Informasi tersebut memungkinkan risiko yang berasal dari keputusan desain, seperti ledakan akibat *overpressure system* maupun ketidakstabilan *trench* akibat pemilihan rute, dapat dikenali sejak tahap perencanaan. Sebaliknya, apabila DED tidak tersedia atau tidak memadai, proses perencanaan K3 akan lebih bergantung pada observasi lapangan sehingga risiko yang sebenarnya telah terbentuk sejak tahap desain berpotensi baru diketahui ketika pekerjaan konstruksi berlangsung.

Keterkaitan tersebut berlanjut pada elemen *Support and Operation*. Pengendalian risiko, seperti penggunaan *Pressure Safety Valve* (PSV) pada tahap *commissioning* maupun penerapan *shoring system* pada pekerjaan *trenching*, dapat dirancang secara lebih spesifik karena didukung oleh parameter teknis yang tersedia dalam DED. Tanpa informasi tersebut, pilihan pengendalian cenderung terbatas pada prosedur administratif dan penggunaan alat pelindung diri karena penerapan *engineering control* yang tepat sasaran menjadi lebih sulit dilakukan.
Pada elemen *Performance Evaluation*, ketersediaan data teknis dari DED turut mendukung proses evaluasi risiko. Penilaian tingkat risiko menggunakan HIRADC maupun pembobotan prioritas melalui AHP disusun berdasarkan data teknis yang bersumber dari DED, bukan semata-mata hasil observasi lapangan. Dengan demikian, hasil evaluasi dapat memberikan gambaran yang lebih sesuai dengan kondisi teknis proyek dan digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan. Sebaliknya, tanpa DED akan lebih sulit menelusuri apakah suatu risiko berasal dari kelemahan desain atau dari pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Hasil evaluasi tersebut kemudian menjadi dasar pada elemen *Improvement*. Dalam penelitian ini, rekomendasi pengendalian difokuskan pada tiga risiko berkategori *High Risk*, yaitu ledakan, ketidakstabilan *trench*, dan sengatan listrik. Rekomendasi tersebut diarahkan pada aspek DED yang memerlukan perbaikan, seperti peninjauan kembali parameter tekanan desain, pemilihan rute, maupun spesifikasi sistem kelistrikan sementara. Dengan cara ini, tindakan perbaikan tidak hanya ditujukan untuk mengatasi permasalahan pada proyek yang sedang berjalan, tetapi juga dapat menjadi masukan dalam penyusunan DED untuk proyek sejenis di masa mendatang. Pendekatan tersebut sejalan dengan prinsip *continual improvement* yang menjadi salah satu dasar dalam ISO 45001:2018.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa DED bukan sekadar menjadi dokumen pendukung dalam siklus PDCA, tetapi memiliki keterkaitan dengan efektivitas setiap elemennya. Pengaruh tersebut terlihat mulai dari proses pengambilan keputusan, perencanaan, penerapan pengendalian operasional, evaluasi kinerja, hingga penyusunan tindakan perbaikan. Temuan ini memperkuat bahwa penyusunan DED yang berkualitas sejak awal proyek merupakan salah satu langkah penting untuk mendukung penerapan sistem manajemen K3 yang efektif dan berkelanjutan pada proyek pembangunan *pipeline*.

BAB VI
PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil identifikasi potensi bahaya dan risiko keselamatan kerja menggunakan metode *Hazard Identification, Risk Assessment and Determining Control* (HIRADC) menunjukkan adanya 16 potensi risiko yang berasal dari tujuh kategori aktivitas, yaitu *lifting operation*, *trenching/excavation*, *welding/hot work*, *installation*, *inspection*, *pre-commissioning*, dan *commissioning*.

   Risiko yang berhasil diidentifikasi meliputi jatuhnya beban, tertabrak objek terangkat, longsor *trench*, runtuhnya dinding galian, ketidakstabilan *trench*, kebakaran atau ledakan saat *welding*, penyalaan (*ignition*), sengatan listrik, kebocoran gas, pelepasan tekanan mendadak, paparan radiasi, *rupture* pipa, pelepasan gas, *overpressure system*, *loss of containment*, dan lonjakan tekanan (*pressure surge*).
2. Hasil penilaian tingkat risiko menggunakan metode HIRADC menunjukkan bahwa dari 16 risiko yang teridentifikasi, sebanyak 10 risiko termasuk dalam kategori *Medium Risk*, yaitu jatuhnya beban, tertabrak objek terangkat, longsor *trench*, runtuhnya dinding galian, kebakaran atau ledakan saat *welding*, penyalaan, kebocoran gas, paparan radiasi, *rupture* pipa, dan pelepasan gas. Sedangkan 6 risiko berada pada kategori *High Risk*, yaitu ketidakstabilan *trench*, sengatan listrik, pelepasan tekanan mendadak, *overpressure system*, *loss of containment*, dan lonjakan tekanan. Penilaian tersebut juga menunjukkan bahwa tidak terdapat risiko yang termasuk dalam kategori *Low Risk* maupun *Extreme Risk*.
3. Hasil penentuan prioritas risiko menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menunjukkan bahwa faktor desain menjadi faktor *Detail Engineering Design* (DED) dengan bobot tertinggi, yaitu sebesar 0,633. Selanjutnya, faktor material memiliki bobot sebesar 0,206, diikuti metode sebesar 0,085 dan rute sebesar 0,073. Hasil pembobotan tersebut dinyatakan konsisten karena nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,090 masih berada di bawah batas yang dapat diterima.

   Berdasarkan hasil pembobotan alternatif risiko, ledakan menempati urutan pertama dengan nilai 0,3070, diikuti kebakaran (0,2404), *asphyxiation* (0,1166), tertabrak objek (0,1008),

tertimbun atau longsor (0,0873), jatuhnya beban (0,0861), dan sengatan listrik (0,0614). Meskipun seluruh alternatif telah memperoleh bobot prioritas, penelitian ini memfokuskan tindak lanjut pengendalian pada risiko yang termasuk kategori *High Risk* berdasarkan hasil HIRADC, yaitu ledakan, ketidakstabilan *trench*, dan sengatan listrik. Pemilihan ketiga risiko tersebut didasarkan pada tingkat urgensi penanganannya serta keterbatasan sumber daya pengendalian yang dimiliki perusahaan.

4. Hasil dari identifikasi, penilaian, dan penentuan prioritas risiko keselamatan kerja yang berkaitan dengan aspek *Detail Engineering Design* (DED), disusun rekomendasi pengendalian terhadap risiko berkategori *high risk* yang terdapat pada aktivitas *trenching, welding/hot work, installation,* dan *commissioning*. Pada aktivitas *trenching,* rekomendasi yang diberikan berupa revisi *Standard Operating Procedure* (SOP) *Construction and Installation Procedure* dengan menambahkan ketentuan *Stop Work Authority* (SWA). Untuk aktivitas *welding/hot work,* rekomendasinya berupa penyediaan personel medis oleh kontraktor guna mempercepat respons terhadap kondisi darurat. Pada aktivitas *installation,* disarankan penambahan dokumen *Installation Procedure RTP Pipeline* dari manufaktur yang memuat batasan beban tarik ke dalam SOP terkait. Sementara itu, pada tahap *commissioning*, penggunaan *Pressure Safety Valve* (PSV) direkomendasikan sebagai bentuk pengendalian rekayasa untuk mencegah kondisi *overpressure*.

   Rekomendasi tersebut dapat menjadi masukan bagi PT Sele Raya Belida dalam meningkatkan efektivitas pengendalian risiko keselamatan kerja pada proyek pembangunan Pipa Penyalur Gas Asosiasi SAS-1. Selain itu, penelitian ini juga menghasilkan rekomendasi pengendalian untuk aktivitas berkategori *medium risk* sebagai bagian dari upaya peningkatan pengelolaan risiko secara berkelanjutan, dengan tetap memprioritaskan implementasi pengendalian pada risiko berkategori *high risk.*

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai masukan bagi perusahaan maupun peneliti selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Bagi Perusahaan

   Perusahaan perlu memberikan perhatian lebih terhadap risiko keselamatan kerja yang memiliki prioritas tertinggi, yaitu risiko ledakan, kebakaran, *asphyxiation*, tertabrak

objek, tertimbun atau longsor, jatuhnya beban, dan sengatan listrik. Dengan demikian, upaya pengendalian dapat difokuskan pada aktivitas yang memiliki tingkat prioritas risiko paling tinggi. Selain itu, perusahaan juga perlu melakukan peninjauan dan pembaruan secara berkala terhadap dokumen *Detail Engineering Design* (DED), prosedur kerja, serta dokumen keselamatan yang berkaitan dengan pekerjaan konstruksi. Langkah ini bertujuan untuk memastikan seluruh dokumen tetap sesuai dengan kondisi aktual di lapangan sehingga potensi risiko yang dapat muncul selama pelaksanaan proyek dapat diminimalkan.

2. Bagi Peneliti Selanjutnya

   Penelitian selanjutnya diharapkan dapat melibatkan lebih banyak responden ahli dari berbagai disiplin ilmu, seperti *engineering*, *construction*, HSE, *project management*, dan *operation*. Keterlibatan responden dengan latar belakang yang beragam diharapkan dapat menghasilkan pembobotan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang lebih komprehensif karena mempertimbangkan berbagai perspektif yang relevan.

DAFTAR PUSTAKA

2024, S. (2024). *Laporan SKK MIGAS*.

Amalia, R., Herwanto, D., & Zahra, W. R. (2023). *ANALISIS POTENSI BAHAYA DAN RISIKO KECELAKAAN KERJA DENGAN MENGGUNAKAN METODE HAZARD IDENTIFICATION RISK ASSESSMENT AND RISK CONTROL (HIRARC) PADA PEMOTONGAN KAYU*. 13–19.

Bíl, M., Dobiáš, M., Andrášik, R., Bílová, M., & Hejna, P. (2018). Cycling fatalities: When a helmet is useless and when it might save your life. *Safety Science*, *105*(February), 71–76. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.02.005

Cadena, J., Torero, J. L., & Lange, D. (2026). Enablers of Quantitative *Risk Assessment*s in Major Hazard Facilities versus those in Fire Safety *Engineering*. *Safety Science*, *199*(February), 107165. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2026.107165

Crawley, F., & Tyler, B. (2019). *HAZOP Guide to Best Pratice Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries*.

Davis, E. M., Sliva, D. E., Murphy, J. F., Johnson, R. W., & Rudy, S. W. S. W. (2012). Chemical Reactivity Evaluation Tool Help Guide. *Processing*, *January*.

Fajri, A., Rio, A., Muhayat, N., & Adiputra, R. (2026). *Assessment of risk , safety , hazard , and economic challenges of CCS pipeline and wellbore implementation : Exploring emerging achievements*. *11*(February). https://doi.org/10.1016/j.uncres.2026.100337

Ferlania, D., Ardlianti, R., & Andriani, A. (2024). *ANALISA PENERAPAN SMK3 (SISTEM MANAJEMEN*. *3*(September), 244–248.

Gerasimova, V. (2016). Underground *Engineering* and Trenchless Technologies at the Defense of Environment. *Procedia Engineering*, *165*, 1395–1401. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.870

Giammarile, F., Knoll, P., Kunikowska, J., Paez, D., Estrada Lobato, E., Mikhail-Lette, M., Wahl, R., Holmberg, O., Abdel-Wahab, M., Scott, A. M., & Delgado Bolton, R. C. (2024). Guardians of precision: advancing radiation protection, safety, and quality systems in nuclear medicine. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, *51*(6), 1498–1505. https://doi.org/10.1007/s00259-024-06633-w

Gunawan, A., Susihono, W., Irman, A., Mutaqin, S., Machfuzhoh, A., Sonda, A., Desmiani, D. G., Amelia, E., & Purbasari, I. (2023). *PENERAPAN METODE HAZARD IDENTIFICATION AND RISK ASESSMENT (HIRA) DAN PENERAPAN STANDAR OPERASIONAL UKM HALO OMA*. *September*, 86–91.

Hariri, M., Stephen, J., Khairel, M., Ismail, I., Manan, A., Embrandiri, A., Shahidah, N., Nazer, M., & Azmi, A. (2021). Environmental hazard assessment of industrial and municipal waste materials with the applications of RES2-D method and 3-D Oasis Montaj modeling : A case study at Kepong , Kuala Lumpur , Peninsula Malaysia. *Journal of Hazardous Materials*, *406*(October 2020), 124282. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124282

Health and Safety Executive. (2014). Avoiding Dangers from Underground Services. *HSE Publications*, *47*, 40. http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/hsg47.pdf%0Ahttp://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg47.htm

Henny, H., Heri, A., Budi, S., Andriyansyah, M., Rizzki, M., & Rozzak, A. (2025). *ASEAN Journal for Science and Engineering in Materials Hazard Identification , Risk Assessment , and Determining Control (HIRADC) for Workplace Safety in Manufacturing Industry : A Risk-Control Framework Compelete with Bibliometric Literature Review Ana*. *4*(2),

267–284.

Ismail, M., Isaac, O., Al, I., Khuthbuddin, S., & Ameen, A. (2020). Materials Today : Proceedings *Hazard Identification* and *Risk Assessment* with controls (Hirac) in oil industry – A proposed approach. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.800

Jabbari, M., Gholamnia, R., Esmaeili, R., & Kouhpaee, H. (2021). *Heliyon Risk Assessment of fi re , explosion and release of toxic gas of Siri – Assalouyeh sour gas pipeline using fuzzy Analytical Hierarchy Process*. *7*(May). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07835

Jin, Z., Gambatese, J., Karakhan, A., & Nnaji, C. (2023). Analysis of prevention through design studies in construction: A subject review. *Journal of Safety Research*, *84*(July 2007), 138–154. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.10.015

KEMENPU-PR. SPIP. No 4 Tahun. (2018). Berita Negara. *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2018*, *151*(2), 10–17.

Kletz, T. (n.d.). *AN ENGINEER'S VIEW OF HUMAN ERROR*.

Kumi, L., Jeong, J., & Song, M. (2026a). Automated design for safety performance evaluation system using accident probability and risk cost analytics: A case study of industrial construction. *Reliability Engineering and System Safety*, *275*(P2), 112869. https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112869

Kumi, L., Jeong, J., & Song, M. (2026b). Automated design for safety performance evaluation system using accident probability and risk cost analytics: A case study of industrial construction. *Reliability Engineering and System Safety*, *275*(May). https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112869

Lou, P., Wu, T., Yin, G., Chen, J., Zhu, X., Wu, X., & Li, R. (2024). *Catena A novel framework for multiple thermokarst hazards Risk Assessment and controlling environmental factors analysis on the Qinghai-Tibet Plateau*. *246*(February).

Lyu, F., Zhou, X., Ding, Z., Qiao, X., & Song, D. (2024). Application Research of Ultrasonic-Guided Wave Technology in *Pipeline* Corrosion Defect Detection: A Review. *Coatings*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/coatings14030358

Marhavilas, P. K., Delianidis, N., Koulinas, G., & Boustras, G. (2025). Safety Assessment By Amalgamating Mcdm/Ahp, Hazop, Decision Risk-Matrices' Analysis, and Fta, Through a Safety'S Color-Mapping Visualization − Application To Industrial and Technological Systems. *Safety Science*, *191*(March). https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106941

Marhavilas, P. K., Filippidis, M., Koulinas, G. K., & Koulouriotis, D. E. (2022). Safety-assessment by hybridizing the MCDM / AHP & HAZOP-DMRA techniques through safety ' s level colored maps : Implementation in a petrochemical industry. *Alexandria Engineering Journal*, *61*(9), 6959–6977. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.040

MinayHashemi, S. M. A., Han, S. H., Olearczyk, J., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., & Kosa, J. (2020). Automated rigging design for heavy industrial lifts. *Automation in Construction*, *112*(October 2019), 103083. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103083

Puspitasari, T., Ismianti, I., Industri, T., Industri, J. T., Industri, F. T., Pembangunan, U., & Veteran, N. (2023). *Analysis of Potential Hazards and Control in PT XYZ ' s Production Process with the HIRADC Method Analisis Potensi Bahaya dan Pengendalian pada Proses Produksi PT XYZ dengan Metode HIRADC*. *16*(1), 11–15.

Qonitah, I., & Rosyid, D. M. (2026). *Optimasi Penjadwalan Untuk Mengurangi Risiko Keterlambatan Proyek Pada Fase Detailed Engineering Design di Konsultan Teknik Bidang Minyak Bumi dan Gas*. *10*(5), 1673–1684.

Rahayu, F. I., Pratama, R. D., & Yulianingsih, I. (2025). Analisis Risiko Kesehatan dan

Keselamatan Kerja pada Unit Power Plant dengan Metode *Hazard Identification Risk Assessment* and *Determining Control* (HIRADC) di PT. X. *Jurnal Nasional Pengelolaan Energi MigasZoom*, *7*(1), 27–32. https://doi.org/10.37525/mz/2025-1/946

Saaty, T., & Vargas, L. (2012). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. In *... -Driven Demand and Operations Management Models*. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6

Sadewa, & Syaifullah, H. (2025). *Implementation of Hazard Identification , Risk Assessment , and Determining Control (Hiradc) System for Hazard Risk Management in Mining Work Environment at PT XYZ*. *4*(2), 2–6.

Satuan Kerja Khusus Migas. (2018). *PTK-005 Tentang Pengelolaan Kesehatan, Keselamatan Kerja dan Lindungan Lingkungan Di Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi*. 1–134.

Savukaitis, G., Daukšys, M., Juočiūnas, S., Grinys, A., & Kriptavičius, D. (2021a). The influence of new and used formwork coated with different release agents on the appearance of the formed concrete surface. *Journal of Building Engineering*, *42*(May). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102807

Savukaitis, G., Daukšys, M., Juočiūnas, S., Grinys, A., & Kriptavičius, D. (2021b). The influence of new and used formwork coated with different release agents on the appearance of the formed concrete surface. *Journal of Building Engineering*, *42*(June). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102807

Siahaan, S. B., Alisjahbana, S. W., & Gondokusumo, O. (2023). Analisis Risiko Detail *Engineering* Proyek Konstruksi Fasilitas Industri Di Lingkungan Multi-Proyek Dengan Pendekatan Sistem Dinamik. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran Dan Ilmu Kesehatan*, *7*(2), 93–104. https://doi.org/10.24912/jmstkik.v7i2.25347

Sinaga, S., & Yuneta, T. O. (2024). *ANALISIS PEMILIHAN SUPPLIER BAHAN BAKU ALUMINIUM PADA PT XYZ MENGGUNAKAN METODE ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)*. *September*, 311–322.

Stouffer, K., Pillitteri, V., Lightman, S., Abrams, M., & Hahn, A. (2015). Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security NIST Special Publication 800-82 Revision 2. *NIST Special Publication 800-82 Rev 2*, *September*, 1–157. http://industryconsulting.org/pdfFiles/NIST Draft-SP800-82.pdf

Subbiah, A., Subburaj, S., Muthukrishnan, S., Pandey, S., & Anand, P. (2025). Mitigating road risks in the oil & gas industry: A comprehensive approach through journey risk management plans. *Journal of Safety and Sustainability*, *2*(2), 127–133. https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2025.03.002

Taghaddos, H., Hermann, U., & Abbasi, A. B. (2018). Automated Crane Planning and Optimization for modular construction. *Automation in Construction*, *95*(November 2017), 219–232. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.009

Toole, T. M., & Gambatese, J. (2008). The Trajectories of Prevention through Design in Construction. *Journal of Safety Research*, *39*(2), 225–230. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.02.026

Tyas, R. L., Nurfuadia, F., & Meliana, A. (2021). Risk Management of Industrial Radiography Personnel Certification Activities To Ensure Worker Safety and Health. *Jurnal Forum Nuklir*, *14*(2), 67. https://doi.org/10.17146/jfn.2020.14.2.5950

Yan, X., Ariaratnam, S. T., Dong, S., & Zeng, C. (2018). Horizontal directional drilling: State-of-the-art review of theory and applications. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *72*(November 2017), 162–173. https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.10.005

Zhang, Z., & Pan, W. (2020). Lift planning and optimization in construction: A thirty-year review. *Automation in Construction*, *118*(February), 103271. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103271

LAMPIRAN

1. HAZID Study Report

skkmigas SRB	Job No 23220	Doc No 23220-PRO-RPT-003-A4	Page 1 of 22
grigora	EPCI TRANSFERLINE GAS ASOSIASI SUNGAI ANGGUR SELATAN-1		

HAZID STUDY REPORT

skkmigas IOG 4.0 SRB

EPCI TRANSFERLINE GAS ASOSIASI
SUNGAI ANGGUR SELATAN-1 (SAS-1)

A	☐	APRROVED
B	☐	APPROVED WITH COMMENTS (RE-SUBMITTED)
C	☐	REJECTED
D	☐	INFORMATION ONLY

Date :

Sign :

Rev	Date	Description	Prep'd	Chk'd	App'd	App'd
0	26-06-2025	Approved for Construction	ERZ/RB	OWL	JHN	
B	16-05-2025	Issued for Approval	ERZ/RB	OWL	JHN	
A	25-04-2025	Issued for Review	ERZ/RB	OWL	JHN	
			Contractor			Owner

Total or partial reproduction and/or utilization of this document are forbidden
Without prior written authorization of the owner

2. HAZOP Study Report

skkmigas SRB	**Job No** 23220	**Doc No** 23220-PRO-RPT-002-A4	**Page** 1 of 20
grigora	**EPCI TRANSFERLINE GAS ASOSIASI SUNGAI ANGGUR SELATAN-1**		

HAZOP STUDY REPORT

skkmigas IOG 4.0 SRB

EPCI TRANSFERLINE GAS ASOSIASI
SUNGAI ANGGUR SELATAN-1 (SAS-1)

A	☒	APRROVED
B	☐	APPROVED WITH COMMENTS (RE-SUBMITTED)
C	☐	REJECTED
D	☐	INFORMATION ONLY

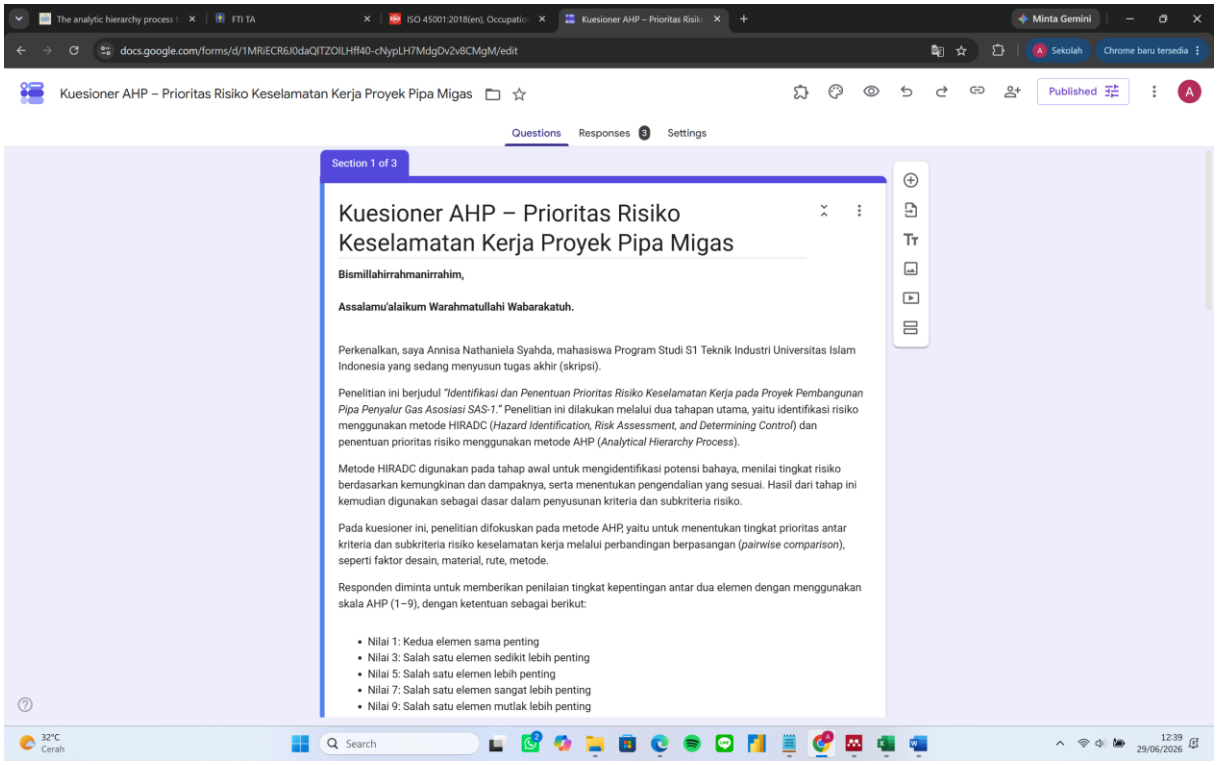
Date :

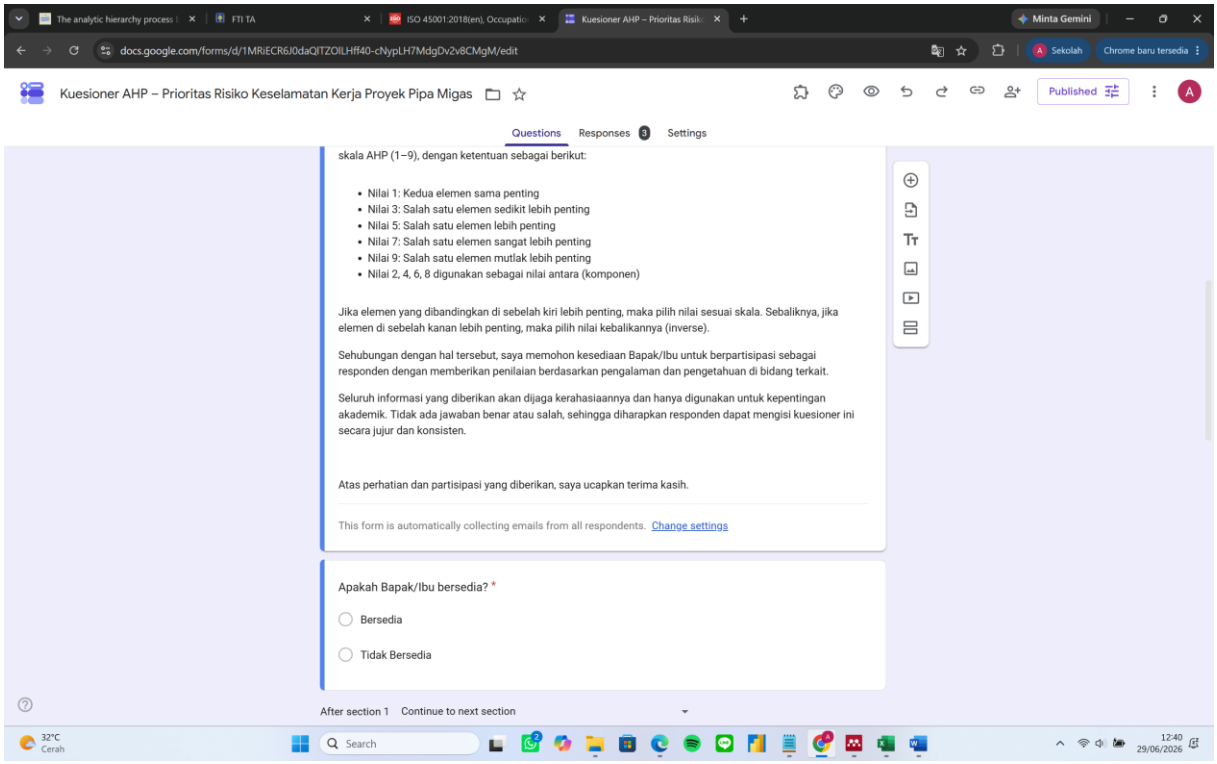
Sign :

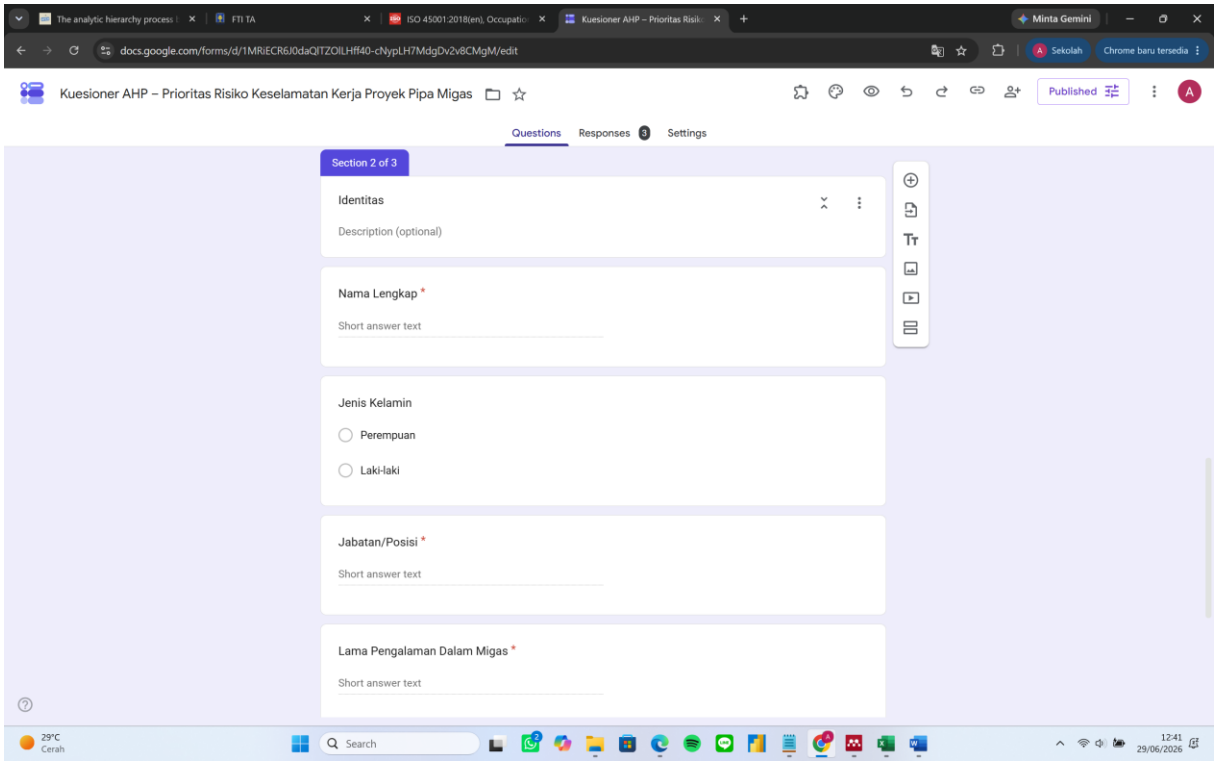
Rev	Date	Description	Prep'd	Chk'd	App'd	App'd
0	26-06-2025	Approved for Construction	ERZ/RB	OWL	JHN	
B	16-05-2025	Issued for Approval	ERZ/RB	OWL	JHN	
A	25-04-2025	Issued for Review	ERZ/RB	OWL	JHN	
			Contractor			Owner

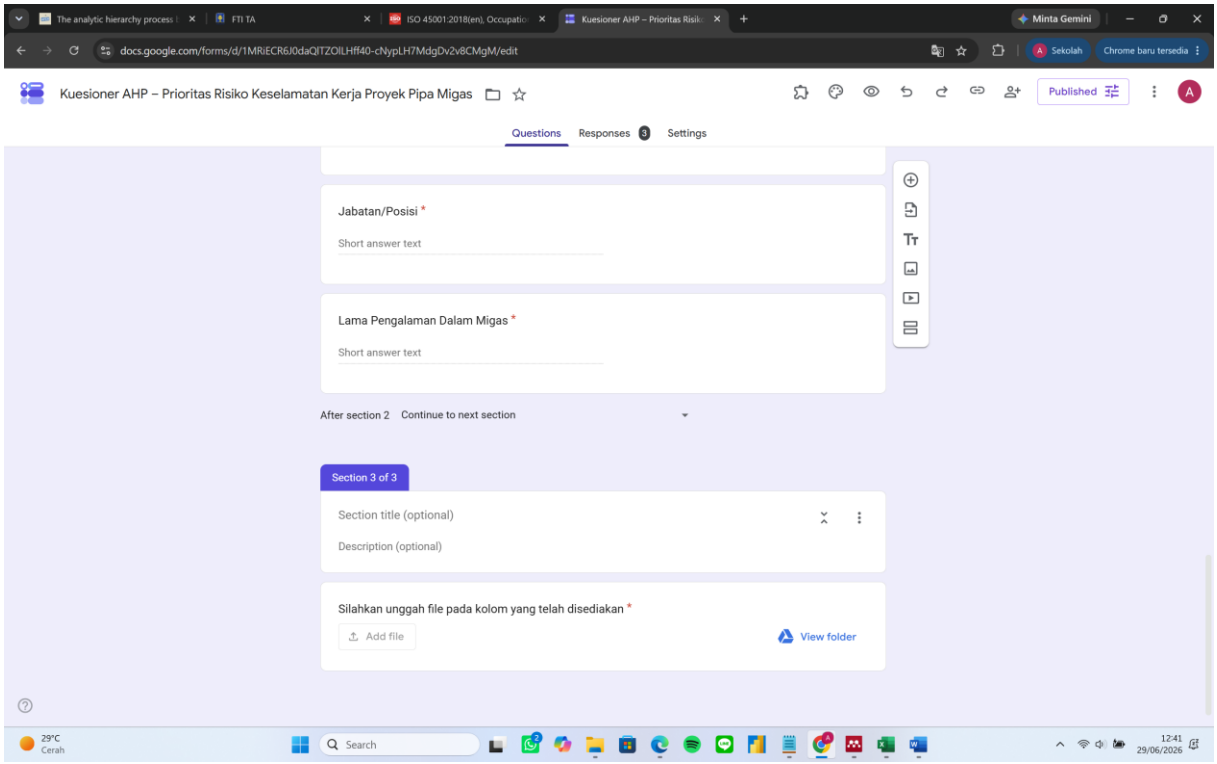
Total or partial reproduction and/or utilization of this document are forbidden
Without prior written authorization of the owner

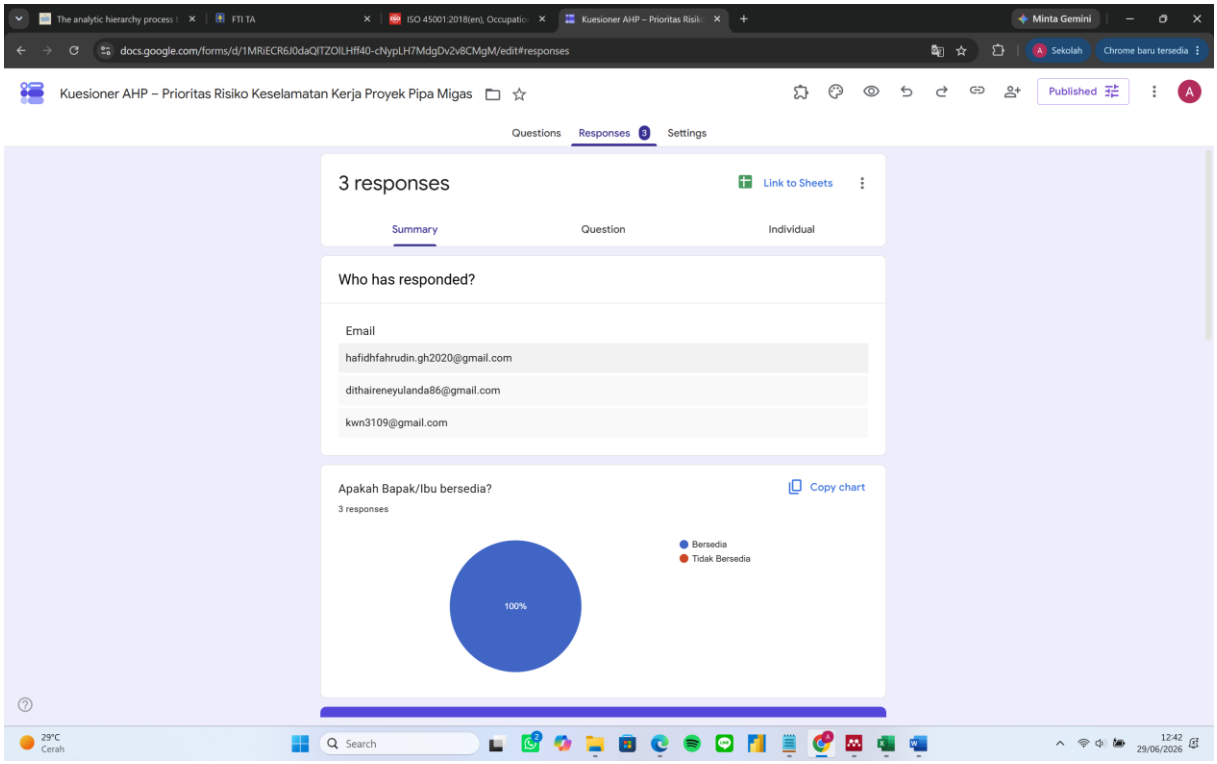
3. Hasil Pengisian Kuesioner

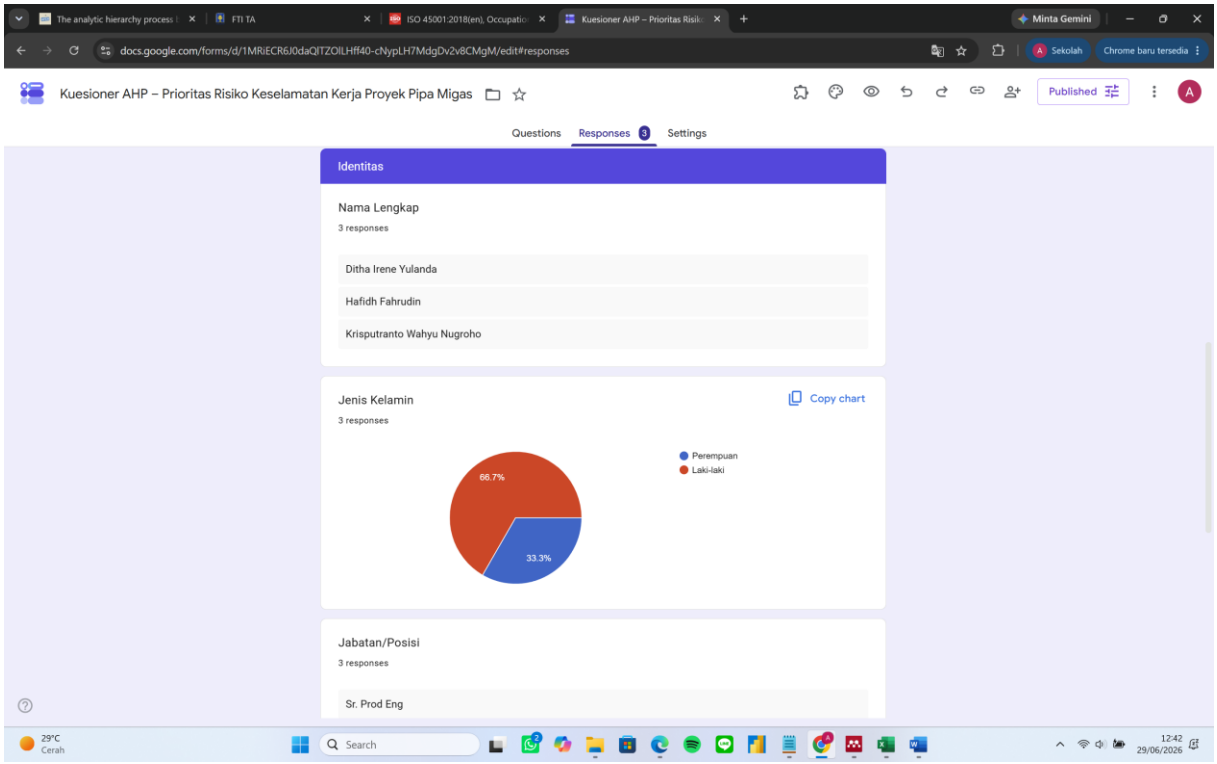


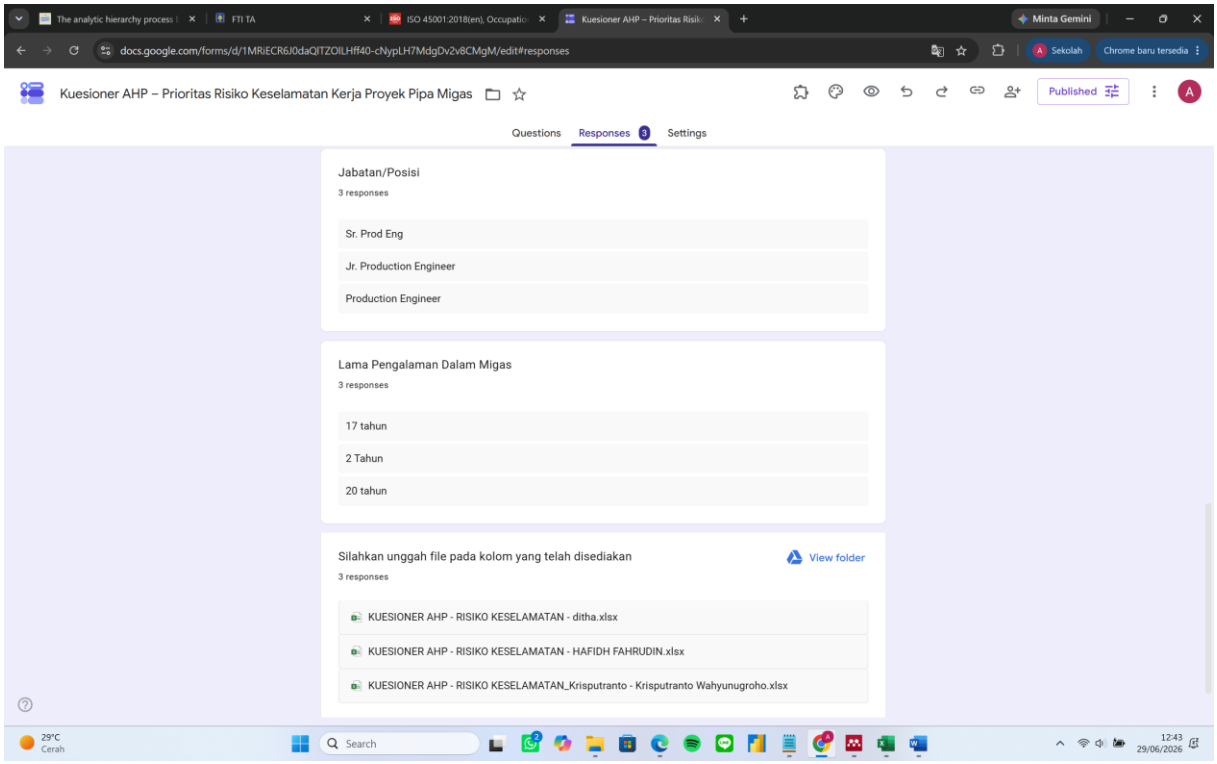



Kuesioner AHP – Prioritas Risiko Keselamatan Kerja Proyek Pipa Migas
Published
Questions
Responses 3
Settings
Section 2 of 3
Identitas
Description (optional)
Nama Lengkap *
Short answer text
Jenis Kelamin
Perempuan
Laki-laki
Jabatan/Posisi *
Short answer text
Lama Pengalaman Dalam Migas *
Short answer text


Kuesioner AHP – Prioritas Risiko Keselamatan Kerja Proyek Pipa Migas
Published
Questions
Responses 3
Settings
Jabatan/Posisi *
Short answer text
Lama Pengalaman Dalam Migas *
Short answer text
After section 2 Continue to next section
Section 3 of 3
Section title (optional)
Description (optional)
Silahkan unggah file pada kolom yang telah disediakan *
Add file
View folder


Kuesioner AHP – Prioritas Risiko Keselamatan Kerja Proyek Pipa Migas
Published
Questions
Responses 3
Settings
3 responses
Link to Sheets
Summary
Question
Individual
Who has responded?
Email
hafidhfahrudin.gh2020@gmail.com
dithaireneyulanda86@gmail.com
kwn3109@gmail.com
Apakah Bapak/Ibu bersedia?
Copy chart
3 responses
Bersedia
Tidak Bersedia
100%


Kuesioner AHP – Prioritas Risiko Keselamatan Kerja Proyek Pipa Migas
Published
Questions
Responses 3
Settings
Identitas
Nama Lengkap
3 responses
Ditha Irene Yulanda
Hafidh Fahrudin
Krisputranto Wahyu Nugroho
Jenis Kelamin
Copy chart
3 responses
Perempuan
Laki-laki
66.7%
33.3%
Jabatan/Posisi
3 responses
Sr. Prod Eng


Kuesioner AHP – Prioritas Risiko Keselamatan Kerja Proyek Pipa Migas
Published
Questions
Responses 3
Settings
Jabatan/Posisi
3 responses
Sr. Prod Eng
Jr. Production Engineer
Production Engineer
Lama Pengalaman Dalam Migas
3 responses
17 tahun
2 Tahun
20 tahun
Silahkan unggah file pada kolom yang telah disediakan
View folder
3 responses
KUESIONER AHP - RISIKO KESELAMATAN - ditha.xlsx
KUESIONER AHP - RISIKO KESELAMATAN - HAFIDH FAHRUDIN.xlsx
KUESIONER AHP - RISIKO KESELAMATAN_Krisputranto - Krisputranto Wahyunugroho.xlsx