

# Analisis Keselamatan dan Penentuan Safety Integrity Level (SIL) pada Sistem Pengisian Tabung LPG menggunakan Metode LOPA

Roswina Dianawati<sup>1</sup>, Ali Mokhtar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas 246 Malang

Kontak Person:

Roswina Dianawati

Jl. Raya Tlogomas 246 Malang

E-mail: Roswinadianawati@unesa.ac.id

## Abstrak

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan aspek penting yang harus diperhatikan dalam industri berisiko tinggi, seperti pengisian tabung gas LPG. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan keselamatan operasional pada Unit Filling Machine (UFM) melalui analisis Safety Integrity Level (SIL) menggunakan metode Layer of Protection Analysis (LOPA). Metode ini diawali dengan pengumpulan data dari Piping and Instrumentation Diagram (P&ID), Process Flow Diagram (PFD), data pemeliharaan, dan hasil wawancara. Selanjutnya, dilakukan analisis risiko dengan pendekatan Hazard and Operability (HAZOP) untuk mengidentifikasi potensi bahaya, diikuti dengan estimasi probabilitas kejadian menggunakan LOPA. Hasil penelitian menunjukkan adanya dua skenario risiko yang termasuk kategori NON-SIL dan empat skenario lainnya berada dalam kategori SIL 1. Untuk memenuhi standar keselamatan, dilakukan perbaikan dengan menambahkan panel kontrol pada sistem main tank, yang terbukti mampu meningkatkan nilai Probability of Failure on Demand (PFD) dan memastikan sistem berada dalam kategori SIL 1. Dengan langkah-langkah ini, risiko bahaya dapat diminimalkan, dan keselamatan operasional meningkat sesuai standar IEC 61508. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengelolaan risiko industri LPG dan dapat dijadikan referensi untuk implementasi K3 di sektor serupa.

**Kata kunci:** Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), Safety Integrity Level (SIL), Layer of Protection Analysis (LOPA), Hazard and Operability Study (HAZOP), Unit Filling Machine (UFM).

## 1. PENDAHULUAN

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan isu krusial yang wajib menjadi perhatian utama bagi pelaku usaha, pekerja, dan pemerintah. Salah satu langkah penting untuk mengurangi risiko kecelakaan kerja adalah dengan melaksanakan analisis K3 secara mendalam, baik oleh manajemen perusahaan maupun badan independen yang bertanggung jawab atas keselamatan pekerja. Data dari penelitian menunjukkan bahwa penerapan K3 yang baik dapat secara signifikan mengurangi risiko kecelakaan kerja dan meningkatkan produktivitas karyawan [1].

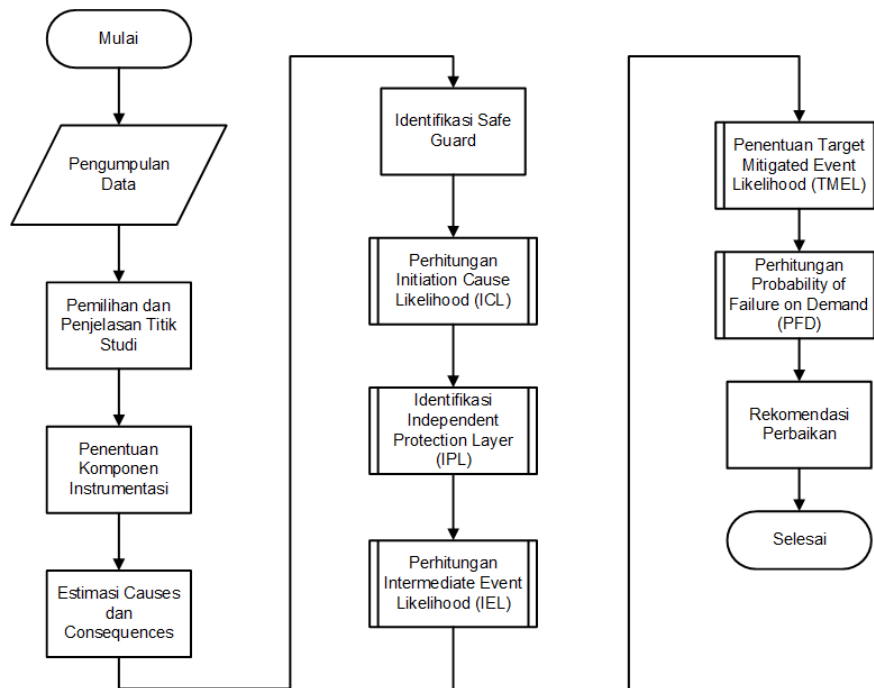
Pengisian Tabung Gas LPG Mayangkara Group, sebuah perusahaan yang bergerak di bidang pengisian tabung gas *liquefied petroleum gas* (LPG) di Kota Blitar, Jawa Timur, menggunakan *Unit Filling Machine* (UFM) dalam proses produksinya. Proses ini memiliki potensi risiko tinggi jika terjadi kerusakan atau kegagalan mesin. Berdasarkan penelitian, metode *Layer of Protection Analysis* (LOPA) dan *Hazard Operability Study* (HAZOP) sering digunakan untuk mengidentifikasi dan mengelola risiko ini dengan tepat [2], [3].

Penelitian ini berfokus pada analisis *Safety Integrity Level* (SIL) menggunakan metode LOPA untuk meningkatkan keselamatan kerja di proses pengisian tabung LPG. SIL adalah alat penting untuk menentukan tingkat integritas sistem keselamatan di berbagai sektor industri [4]. Dalam hal ini, pendekatan HAZOP membantu mengidentifikasi risiko-risiko awal seperti tekanan berlebih atau kebocoran gas, sementara metode LOPA mengukur efektivitas lapisan perlindungan yang ada [5].

Berdasarkan hasil analisis, beberapa skenario menunjukkan tingkat risiko yang membutuhkan pengendalian lebih lanjut. Misalnya, penambahan sistem keselamatan tambahan dapat meningkatkan SIL, sehingga menurunkan potensi risiko kecelakaan [6]. Studi lain menunjukkan bahwa pengelolaan risiko berbasis metode semikuantitatif seperti LOPA dapat memberikan hasil yang lebih akurat dalam mitigasi risiko di sektor LPG [7].

Dengan pendekatan ini, diharapkan Mayangkara Group dapat mengoptimalkan operasional mesin UFM sekaligus mendukung keselamatan pekerja. Lebih lanjut, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan untuk implementasi K3 yang lebih baik di sektor industri serupa.

## 2. METODE PENELITIAN



Gambar 1 *Flowchart* Penelitian

Berikut ini adalah *flowchart* yang menggambarkan alur penelitian ini secara sistematis. *Flowchart* tersebut dapat dilihat pada Gambar 1. Adapun langkah-langkah tersebut akan diuraikan secara rinci di bawah ini.

### 2.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data adalah langkah penting yang menyediakan dasar informasi untuk analisis lebih lanjut. Data yang dikumpulkan mencakup *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID) dan *Process Flow Diagram* (PFD) untuk memahami tata letak serta alur proses. Selain itu, data pemeliharaan dan hasil analisis *Hazard and Operability* (HAZOP) digunakan untuk mengidentifikasi risiko. Wawancara dengan operator, dan tim pemeliharaan digunakan untuk melengkapi informasi kontekstual yang relevan.

### 2.2. Pemilihan dan Penjelasan Titik Studi (*Node*)

Pemilihan titik studi (*node*) adalah langkah penting dalam analisis untuk membagi unit proses menjadi segmen kecil guna mempermudah evaluasi. Tiap *node* dianalisis berdasarkan input, proses, dan outputnya, dengan fokus pada komponen yang berdampak signifikan terhadap performa Unit Functional Model (UFM). Penerapan tabel *Hazard and Operability* (HAZOP) memastikan identifikasi dan pencatatan risiko secara sistematis, sehingga mendukung pengelolaan risiko yang lebih baik. Penelitian menunjukkan bahwa evaluasi *node* penting untuk memahami kontribusi tiap elemen dalam jaringan dan meningkatkan ketahanan sistem [8].

### 2.3. Penentuan Komponen Instrumentasi

Penentuan komponen seperti *transmitter*, *indicator*, *controller*, dan *actuator* memastikan kelancaran proses dari input hingga output. Analisis dilakukan untuk menjaga kinerja sesuai desain yang aman dan efisien. Studi menunjukkan bahwa integrasi instrumentasi meningkatkan akurasi pengukuran dan kontrol proses hingga 98% [9] dan mendukung efisiensi operasional secara signifikan [10].

## 2.4. Estimasi *Causes* dan *Consequences*

Estimasi penyebab (*causes*) dan akibat (*consequences*) dalam analisis risiko bertujuan mengidentifikasi faktor pemicu kejadian berbahaya serta dampak yang dihasilkan. Proses ini mencakup penetapan titik akhir konsekuensi (*endpoint consequences*) untuk mengevaluasi apakah risiko dapat diterima sesuai dengan standar perusahaan. Teknik ini memperhitungkan dimensi risiko seperti keselamatan, aset, dan lingkungan, serta membantu pengambilan keputusan berdasarkan tingkat keparahan risiko yang teridentifikasi [11].

## 2.5. Identifikasi *Safe Guard*

*Safe guard* adalah lapisan perlindungan untuk mencegah atau mengurangi risiko apabila berfungsi sesuai desain. Proses ini melibatkan identifikasi *safe guard* yang tersedia, analisis efektivitasnya, dan penilaian kemampuan mitigasi risiko. Evaluasi yang cermat memastikan langkah mitigasi memberikan perlindungan optimal terhadap skenario risiko potensial [12].

## 2.6. Perhitungan SIL dengan Metode LOPA

Proses penentuan *Safety Integrity Level* (SIL) dilakukan melalui beberapa langkah sistematis yang dirancang untuk memastikan tingkat keselamatan operasional sesuai dengan standar yang berlaku. Langkah-langkah tersebut meliputi:

### 2.7.1. Perhitungan *Initiation Cause Likelihood* (ICL)

Perhitungan *Initiation Cause Likelihood* (ICL) adalah langkah awal yang bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan penyebab awal bahaya dan menentukan frekuensi kejadian yang berkaitan dengan skenario risiko pada komponen tertentu. Langkah ini sangat penting untuk memberikan dasar kuantitatif dalam analisis risiko, sehingga langkah mitigasi dapat direncanakan dengan lebih efektif. Proses penentuan nilai ICL melibatkan beberapa tahapan yang harus dilakukan secara sistematis.

Langkah pertama adalah menentukan *Mean Time to Failure* (MTTF) dari komponen yang dianalisis. Berdasarkan data historis, MTTF memberikan estimasi rata-rata durasi sebelum kegagalan terjadi. Data ini penting untuk mengevaluasi kinerja komponen dan sistem [13].

$$MTTF = \frac{\text{operating time}}{\text{Number of Failure}} \quad (1)$$

Setelah MTTF dihitung, langkah selanjutnya adalah menentukan *failure rate* (tingkat kegagalan) baik per jam maupun per tahun. Dengan menggunakan MTTF, *failure rate* dihitung untuk mengetahui probabilitas kegagalan dalam skala waktu tertentu. Langkah ini memberikan wawasan tentang frekuensi kegagalan potensial [14].

$$\frac{\lambda}{\text{jam}} = \frac{1}{MTTF} \quad (2)$$

$$\frac{\lambda}{\text{tahun}} = \frac{1}{MTTF} \times 24(\text{jam}) \times 365(\text{hari}) \quad (3)$$

Tahap berikutnya adalah menghitung *reliability* (keandalan) dari komponen tersebut. *Reliability* dihitung menggunakan distribusi eksponensial untuk memperkirakan kemungkinan komponen berfungsi tanpa kegagalan dalam periode waktu tertentu [15].

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Langkah terakhir adalah menentukan nilai ICL. Kombinasi *failure rate* dan *reliability* menghasilkan nilai ICL, yang digunakan dalam analisis risiko lanjutan seperti evaluasi mitigasi risiko.

$$ICL = 1 - R(t) \quad (5)$$

### 2.7.2. Identifikasi *Independent Protection Layer* (IPL)

Identifikasi *Independent Protection Layer* (IPL) bertujuan untuk mengkategorikan lapisan perlindungan menjadi IPL aktif dan IPL pasif, serta menghitung nilai *Probability of Failure on Demand* (PFD) untuk setiap lapisan. Nilai PFD dihitung berdasarkan standar probabilitas kegagalan: jika lapisan tersedia dan memenuhi syarat, nilai PFD mengikuti nilai referensi, umumnya 0,1, atau nilai lainnya berdasarkan kondisi system [16].

### 2.7.3. Perhitungan *Intermediate Event Likelihood* (IEL)

IEL dihitung dengan mengalikan nilai *Initiation Cause Likelihood* (ICL) dengan *Probability of Failure on Demand* (PFD) dari masing-masing *Independent Protection Layer* (IPL) seperti sistem kontrol, alarm, dan perangkat mitigasi lainnya. Kombinasi ini memberikan gambaran kuantitatif tentang keandalan setiap lapisan perlindungan [4].

$$IEL = ICL \times PFD_{GPD} \times PFD_{BPCS} \times PFD_{AR} \times PFD_{AMR} \times PFD_{AMD} \quad (6)$$

Dimana :

ICL = *initiating causes likelihood*

PFD<sub>GPD</sub> = Nilai PFD *general process design*

PFD<sub>BPCS</sub> = Nilai PFD *basic process control system*

PFD<sub>AR</sub> = Nilai PFD *alarms dan respon dari operator*

PFD<sub>AMR</sub> = Nilai PFD *additional restricted access*

PFD<sub>AMD</sub> = Nilai PFD *additional mitigation dike*

### 2.7.4. Penentuan Target *Mitigated Event Likelihood* (TMEL)

Penentuan Target *Mitigated Event Likelihood* (TMEL) adalah langkah penting untuk menetapkan target perusahaan dalam mengurangi kemungkinan terjadinya bahaya. TMEL ditentukan berdasarkan kebijakan risiko perusahaan, yang mempertimbangkan toleransi risiko dan tingkat keparahan konsekuensi dari skenario bahaya. Nilai TMEL digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi efektivitas langkah mitigasi yang diterapkan, memastikan bahwa risiko telah diturunkan ke tingkat yang dapat diterima sesuai standar perusahaan [17].

Tabel 1 Target Mitigated Event Likelihood (TMEL)

| Tingkat Keparahan<br>( <i>Severity Level</i> ) | Konsekuensi Keamanan<br>( <i>Safety Consequences</i> )   | Target Likelihood Kejadian yang<br>Dimitigasi per Tahun<br>( <i>Target Mitigated Event<br/>Likelihood/year</i> ) |
|--|--|--|
| CA   | Satu orang mengalami cedera ( <i>single first aid injury</i> )   | 3,00E-02   |
| CB   | Banyak orang mengalami cedera ( <i>multiple first aid injuries</i> )   | 3,00E-03   |
| CC   | Satu orang mengalami cacat fisik atau banyak orang mengalami cedera serius ( <i>single disabling injury or multiple serious injuries</i> ) | 3,00E-04   |
| CD   | Kematian tunggal di lokasi kejadian ( <i>single on-site fatality</i> )   | 3,00E-05   |
| CE   | Kematian lebih dari satu sampai tiga di lokasi kejadian ( <i>more than one and up to three on-site fatalities</i> )                        | 1,00E-05   |

### 2.7.5 Perhitungan *Probability of Failure on Demand* (PFD)

TMEL dan IEL dihitung sebagai hasil perkalian nilai lapisan perlindungan individu yang diwakili oleh *Probability of Failure on Demand* (PFD). Nilai PFD dihitung dengan membagi TMEL dengan IEL, memberikan gambaran kuantitatif tentang kemampuan sistem untuk mengurangi atau menahan risiko bahaya.

$$PFD = \frac{TMEL}{IEL} \quad (7)$$

Hasil akhir digunakan untuk mengukur tingkat integritas keselamatan (*Safety Integrity Level*, SIL). SIL menunjukkan efektivitas sistem dalam mengurangi risiko sesuai standar seperti IEC 61508 [18].

Tabel 2 Kategori Safety Integrity Level (SIL) (IEC 61508)

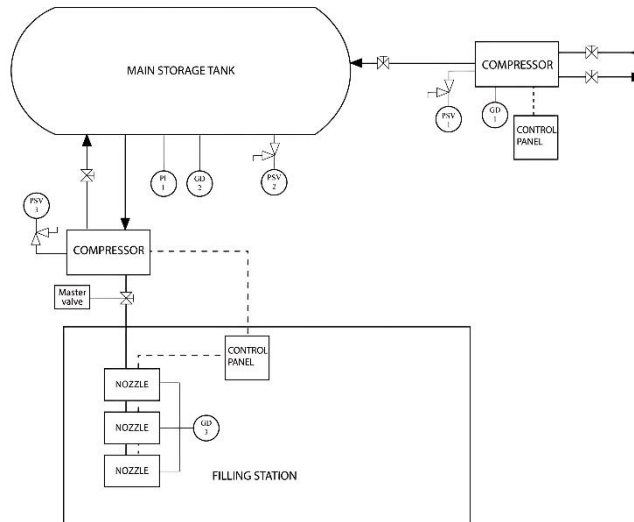
| SIL | Probability of Failure on Demand (PFD) | Risk Reduction Factor (RRF) |
|-----|--|-----------------------------|
| 4   | 0.00001 s/d 0.0001                     | >100000 s/d ≤10000          |
| 3   | 0.0001 s/d 0.001                       | >10000 s/d ≤1000            |
| 2   | 0.001 s/d 0.01                         | >1000 s/d ≤100              |
| 1   | 0.01 s/d 0.1                           | >100 s/d ≤10                |

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah pengumpulan data, yang merupakan langkah penting untuk memastikan akurasi dan kelengkapan analisis risiko. Data yang dikumpulkan meliputi *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID), *Process Flow Diagram* (PFD), dan data proses dari mesin *Unit Filling Machine* (UFM). P&ID memberikan gambaran tentang tata letak serta interaksi antar komponen dalam sistem, sementara PFD memberikan pemahaman tentang alur proses secara keseluruhan. Data-data ini digunakan untuk memahami desain proses, mengidentifikasi potensi bahaya, serta menganalisis risiko yang mungkin terjadi selama operasi [19].

Tahap berikutnya adalah pemilihan titik studi (*node*), yang dalam konteks ini difokuskan pada *Unit Filling Machine* (UFM) sebagai sistem pengisian tabung gas LPG. UFM dipilih karena merupakan bagian yang sangat penting, memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi proses secara keseluruhan. Analisis dilakukan dengan memetakan aliran material dari tangki utama hingga proses pengisian tabung LPG menggunakan diagram alir proses. Pendekatan ini memastikan setiap langkah dalam alur proses teridentifikasi dengan baik, sehingga risiko dapat dimitigasi secara efektif [20].

Komponen utama yang dianalisis mencakup *main storage tank*, *master valve*, dan *filling nozzle* (Gambar 2). Setiap komponen diidentifikasi untuk memastikan fungsinya dalam mengatur aliran gas, baik dari sisi input, proses, maupun output. Analisis integritas operasional komponen ini dilakukan untuk mendeteksi potensi kegagalan dan meningkatkan efisiensi sistem. Tahap ini penting untuk menjaga stabilitas operasional dan memastikan keselamatan serta produktivitas sistem secara keseluruhan [21].



Gambar 2 Komponen Unit Filling Machine (UFM)

Pada tahap estimasi *cause* dan *consequence*, analisis dilakukan untuk mengidentifikasi penyebab utama (*cause*) dan konsekuensi (*consequence*) dari potensi kegagalan dalam sistem. Sebagai contoh, tekanan rendah dari kompresor dapat menyebabkan pengisian lambat, sementara tekanan tinggi berpotensi memicu ledakan. Analisis ini bertujuan untuk memahami hubungan antara penyebab dan dampak bahaya serta menilai tingkat keparahan risiko. Hasil rinci analisis ditampilkan pada Tabel 3, yang menguraikan penyebab, konsekuensi, dan tingkat risiko dari berbagai skenario kegagalan.

Tabel 3 *Cause and Consequence Node UFM*

| <i>Instrument</i> | <i>Guide Word</i> | <i>Deviation</i> | <i>Cause</i>                    | <i>Consequence</i>  |
|-------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|---|
| Main Tank         | Kurang            | Tekanan kurang   | Tekanan kurang dari kompresor   | Proses pengisian lambat dan memperlambat laju produksi                            |
|                   | Lebih             | Tekanan lebih    | Tekanan berlebih dari kompresor | Tekanan berlebih pada tangki utama yang dapat menyebabkan ledakan                 |
| Master Valve      | Kurang            | Aliran kurang    | Aliran pipa rendah              | Proses pengisian tidak konsisten dan memperlambat laju produksi                   |
|                   | Lebih             | Aliran lebih     | Aliran pipa tinggi              | Kemungkinan kebocoran gas pada pipa yang dapat menyebabkan kebakaran              |
| Filling Nozzle    | Buka              | Gagal membuka    | Ujung nozel macet               | Kebocoran gas yang dapat menyebabkan penghentian aktivitas produksi dan kebakaran |
|                   | Tutup             | Gagal menutup    | Ujung nozel macet               | Produksi melambat   |

Tahap berikutnya adalah perhitungan *Safety Integrity Level (SIL)* menggunakan *Layer of Protection Analysis (LOPA)*. Proses ini dimulai dengan menghitung *Initiation Cause Likelihood (ICL)*, yang memberikan probabilitas awal dari bahaya berdasarkan data historis. Hasil ICL ditampilkan pada Tabel 4, yang menunjukkan nilai *likelihood* untuk skenario kegagalan yang diidentifikasi.

Tabel 4 Hasil Perhitungan ICL

| No | Cause                           | Consequence   | ICL   |
|----|---------------------------------|---|-------|
| 1  | Tekanan kurang dari kompresor   | Proses pengisian lambat dan memperlambat laju produksi                            | 0.451 |
| 2  | Tekanan berlebih dari kompresor | Tekanan berlebih pada tangki utama yang dapat menyebabkan ledakan                 | 0.451 |
| 3  | Aliran pipa rendah              | Proses pengisian tidak konsisten dan memperlambat laju produksi                   | 0.551 |
| 4  | Aliran pipa tinggi              | Kemungkinan kebocoran gas pada pipa yang dapat menyebabkan kebakaran              | 0.551 |
| 5  | Ujung nozel macet               | Kebocoran gas yang dapat menyebabkan penghentian aktivitas produksi dan kebakaran | 0.33  |
| 6  | Ujung nozel macet               | Produksi melambat   | 0.33  |

Selanjutnya, dilakukan identifikasi *Independent Protection Layers (IPL)* seperti *general process design (GPD)*, *basic process control system (BPCS)*, *additional mitigation dikes/pressure relief (AMD)*, dan *alarm (AI)*. Nilai *Intermediate Event Likelihood (IEL)* dihitung dengan mengalikan ICL dengan *Probability of Failure on Demand (PFD)* dari masing-masing IPL. Hasil perhitungan IEL ditampilkan pada Tabel 5, yang menggambarkan efektivitas setiap IPL dalam mengurangi risiko

Tabel 5 Hasil perhitungan IEL

| No | Cause                           | Consequence   | ICL   | Protection Layers (PLs) |      |    |     |     | IEL       |
|----|---------------------------------|---|-------|-------------------------|------|----|-----|-----|-----------|
|    |                                 |   |       | GPD                     | BPCS | AI | AMR | AMD |           |
| 1  | Tekanan kurang dari kompresor   | Proses pengisian lambat dan memperlambat laju produksi                            | 0.451 | 0.01                    | 0.1  | 1  | 0.1 | 1   | 0.0000451 |
| 2  | Tekanan berlebih dari kompresor | Tekanan berlebih pada tangki utama yang dapat menyebabkan ledakan                 | 0.451 | 0.01                    | 0.1  | 1  | 0.1 | 1   | 0.0000451 |
| 3  | Aliran pipa rendah              | Proses pengisian tidak konsisten dan memperlambat laju produksi                   | 0.551 | 0.01                    | 1    | 1  | 0.1 | 1   | 0.000551  |
| 4  | Aliran pipa tinggi              | Kemungkinan kebocoran gas pada pipa yang dapat menyebabkan kebakaran              | 0.551 | 0.01                    | 1    | 1  | 0.1 | 1   | 0.000551  |
| 5  | Ujung nozel macet               | Kebocoran gas yang dapat menyebabkan penghentian aktivitas produksi dan kebakaran | 0.33  | 0.01                    | 1    | 1  | 0.1 | 1   | 0.00033   |
| 6  | Ujung nozel macet               | Produksi melambat   | 0.33  | 0.01                    | 1    | 1  | 0.1 | 1   | 0.00033   |

Langkah selanjutnya adalah menentukan Target *Mitigated Event Likelihood* (TMEL), yang merupakan nilai target perusahaan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya bahaya dari suatu konsekuensi. Nilai TMEL ditentukan berdasarkan tingkat keparahan risiko (*severity level*) yang telah dipilih oleh perusahaan. Dalam penelitian ini, tingkat keparahan yang dipilih adalah kategori CE, dengan nilai TMEL sebesar  $1, E-05$ . Setelah menentukan nilai TMEL, nilai *Probability of Failure on Demand* (PFD) dihitung untuk mengevaluasi apakah sistem telah memenuhi standar keselamatan yang ditetapkan. Hasil perhitungan PFD dapat dilihat pada Tabel 6.

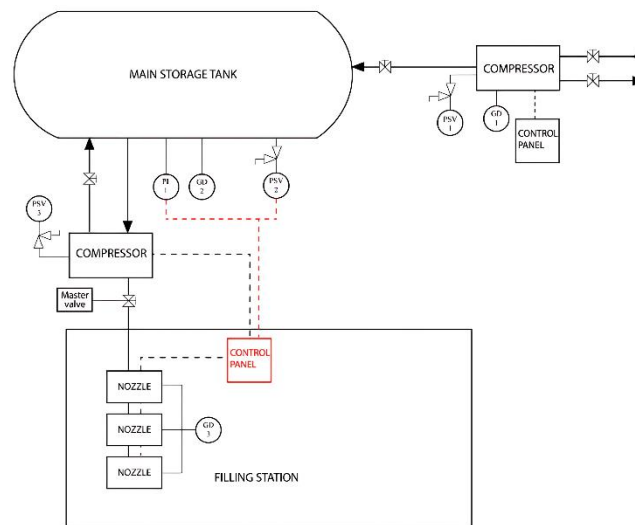
Tabel 6 *Worksheet Layer of Protection Analysis*

| No | Cause                           | Consequence   | SL | IEL       | TMEL    | PFD    | Catatan |
|----|---------------------------------|---|----|-----------|---------|--------|---------|
| 1  | Tekanan kurang dari kompresor   | Proses pengisian lambat dan memperlambat laju produksi                            | CE | 0.0000451 | 0.00001 | 0.221  | NON-SIL |
| 2  | Tekanan berlebih dari kompresor | Tekanan berlebih pada tangki utama yang dapat menyebabkan ledakan                 | CE | 0.0000451 | 0.00001 | 0.221  | NON-SIL |
| 3  | Aliran pipa rendah              | Proses pengisian tidak konsisten dan memperlambat laju produksi                   | CE | 0.000551  | 0.00001 | 0.0181 | SIL 1   |
| 4  | Aliran pipa tinggi              | Kemungkinan kebocoran gas pada pipa yang dapat menyebabkan kebakaran              | CE | 0.000551  | 0.00001 | 0.0181 | SIL 1   |
| 5  | Ujung nozel macet               | Kebocoran gas yang dapat menyebabkan penghentian aktivitas produksi dan kebakaran | CE | 0.00033   | 0.00001 | 0.0303 | SIL 1   |
| 6  | Ujung nozel macet               | Produksi melambat   | CE | 0.00033   | 0.00001 | 0.0303 | SIL 1   |

Berdasarkan hasil analisis yang disajikan dalam tabel, nilai *Probability of Failure on Demand* (PFD) target menunjukkan dua skenario *impact event* berada pada kategori NON-SIL, sedangkan empat skenario lainnya berada pada kategori SIL 1. Skenario yang berada pada kategori NON-SIL mengindikasikan bahwa sistem belum sepenuhnya memenuhi standar keselamatan. Oleh karena itu, diperlukan langkah perbaikan untuk meningkatkan tingkat *Safety Integrity Level* (SIL).

Perbaikan dilakukan pada instrument main tank, salah satu komponen kritis dalam sistem. Langkah utama yang diambil adalah penambahan panel kontrol yang diintegrasikan dengan panel kontrol utama (Gambar 3). Penambahan ini dirancang untuk mempermudah penanganan kejadian seperti *over pressure* atau *low pressure*, dengan akses yang lebih cepat dan responsif. Dengan panel kontrol tambahan, pekerja dapat menangani potensi kegagalan sistem secara lebih efisien [22].

Setelah implementasi, nilai PFD dari *Basic Process Control System* (BPCS) meningkat dari 0,1 menjadi 1, memastikan bahwa seluruh lapisan perlindungan pada main tank memenuhi kategori SIL 1. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah berhasil memberikan mitigasi risiko yang memadai untuk skenario kegagalan yang diidentifikasi. Penambahan panel kontrol juga meningkatkan efisiensi operasional dengan memungkinkan monitoring dan pengendalian sistem secara lebih efektif [23]. Selain meningkatkan keandalan sistem, integrasi panel kontrol memberikan manfaat tambahan berupa kemudahan akses bagi pekerja dalam mengontrol proses pada main tank. Pendekatan sistematis dalam analisis dan perbaikan sistem ini memastikan bahwa seluruh skenario kegagalan dapat diatasi sesuai standar keselamatan internasional IEC 61508 dan IEC 61511. Dengan langkah mitigasi yang terstruktur, risiko bahaya dapat diminimalkan secara efektif [24].



Gambar 3 Rekomendasi Perbaikan Unit Filling Machine (UFM)

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengevaluasi tingkat keselamatan operasional pada *Unit Filling Machine* (UFM) melalui analisis *Safety Integrity Level* (SIL) dengan metode *Layer of Protection Analysis* (LOPA). Hasil analisis menunjukkan bahwa dari enam skenario risiko yang diidentifikasi, terdapat dua skenario dalam kategori NON-SIL, sementara empat skenario lainnya telah memenuhi kategori SIL 1. Untuk meningkatkan keselamatan sistem, dilakukan perbaikan berupa penambahan panel kontrol pada main tank, yang secara signifikan meningkatkan nilai *Probability of Failure on Demand* (PFD) hingga mencapai standar SIL yang ditentukan.

Penambahan panel kontrol tidak hanya meningkatkan kemampuan mitigasi risiko, tetapi juga mempermudah pekerja dalam menangani situasi seperti *over pressure* dan *low pressure*, sehingga keselamatan operasional dapat ditingkatkan secara keseluruhan. Dengan penerapan langkah-langkah perbaikan ini, sistem berhasil memenuhi standar keselamatan internasional IEC 61508.

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengelolaan risiko di industri pengisian LPG dan dapat dijadikan acuan untuk meningkatkan keselamatan kerja di sektor serupa. Pendekatan berbasis SIL yang diterapkan menunjukkan efektivitas dalam mengidentifikasi dan mengurangi risiko, serta meningkatkan keandalan sistem operasional secara signifikan.

#### REFERENSI

- [1] A. Firdaus, "EVALUASI PENERAPAN KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA (K3) PADA PROYEK GATEWAY PASTEUR APARTEMENT BANDUNG," p., 2014, [Online]. Available: <https://consensus.app/papers/evaluasi-penerapan-keselamatan-dan-kesehatan-kerja-k3-firdaus/af4544a547ac507c97ac4c1ee1237e0b/>
- [2] B. Ahmad and K. Olinawati, "Analisis Risiko Dengan Metode Hazard and Operability Study (Hazops) Dalam Penentuan Safety Integrity Level (SIL) Berbasis Risk Graph Dan Quantitative Method Pada Unit Boiler PT X," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 25, no. 2, pp. 53–66, 2019.
- [3] T. Vimalasari, "Hazard And Operability Study (HAZOP) Dan Penentuan Safety Integrity Level (SIL) Pada Boiler SB-02 PT. Smart Tbk Surabaya," p., 2016, [Online]. Available: <https://consensus.app/papers/hazard-and-operability-study-hazop-dan-penentuan-safety-vimalasari/9ba00bae8301519d88ad2da562c5f85d/>
- [4] A. M. Dowell III, "Layer of protection analysis for determining safety integrity level," *ISA Trans*, vol. 37, no. 3, pp. 155–165, 1998.
- [5] A. S. Darwish, M. S. Mansour, H. Farag, and K. H. Ezzat, "Applying LOPA and fuzzy logic to identify SIL requirement for safety critical functions in a direct reduction iron industry," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 5, pp. 3575–3585, 2020.

- [6] W. Rozaaq and I. R. D. Noriyati, "ANALISIS HAZARD AND OPERABILITY STUDY (HAZOPS) DAN PENENTUAN NILAI SAFETY INTEGRITY LEVEL (SIL) PADA SULFUR FURNACE UNIT ASAM SULFAT PABRIK III PT. PETROKIMIA GRESIK," 2015.
- [7] D. Febriyan, G. Anindita, and N. E. Mayangsari, "Analisis Potensi Bahaya menggunakan Metode Hazop dan Fuzzy Layer of Protection Analysis Pada Desiccant 1 Dehydration Unit di PT Lapindo Brantas. Inc.," in *Conference on Safety Engineering and Its Application*, 2017, pp. 328–333.
- [8] P. Hu, W. Fan, and S. Mei, "Identifying node importance in complex networks," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 429, pp. 169–176, 2015.
- [9] W. Gao, Y. Zhao, and C. Smidts, "Component detection in piping and instrumentation diagrams of nuclear power plants based on neural networks," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 128, p. 103491, 2020.
- [10] J. Lu and R. E. Skelton, "Integrating instrumentation and control design," *Int J Control*, vol. 72, no. 9, pp. 799–814, 1999.
- [11] Z. Ji, H. Su, Y. Wang, Y. Cao, and S. Yang, "Assessing the risk of hazards with multidimensional consequences for industrial processes," *Processes*, vol. 10, no. 6, p. 1145, 2022.
- [12] G. Landucci, A. Necci, G. Antonioni, F. Argenti, and V. Cozzani, "Risk assessment of mitigated domino scenarios in process facilities," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 160, pp. 37–53, 2017.
- [13] C. Biernacki, G. Celeux, and G. Govaert, "Assessing a mixture model for clustering with the integrated completed likelihood," *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, vol. 22, no. 7, pp. 719–725, 2000.
- [14] A. Cleyne, T. M. Luong, G. Rigail, and G. Nuel, "Fast estimation of the Integrated Completed Likelihood criterion for change-point detection problems with applications to Next-Generation Sequencing data," *Signal Processing*, vol. 98, pp. 233–242, 2014.
- [15] J. B. Choudhury, "Non-parametric confidence interval estimation for competing risks analysis: application to contraceptive data," *Stat Med*, vol. 21, no. 8, pp. 1129–1144, 2002.
- [16] S. Safety, "Discussion on Independent Protection Layer during Layer of Protection Analysis (LOPA)," *Safety, Health & Environment*, 2011, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113157461>
- [17] M. I. Gandhi, "Limited QRA in SIS systems," in *IET & ISA 60th International Instrumentation Symposium 2014*, IET, 2014, pp. 1–5.
- [18] A. Hildebrandt, "Calculating the "Probability of Failure on Demand"(PFD) of complex structures by means of Markov Models," in *2007 4th European Conference on Electrical and Instrumentation Applications in the Petroleum & Chemical Industry*, IEEE, 2006, pp. 1–5.
- [19] X. Ding, Y. Tian, and Y. Yu, "A real-time big data gathering algorithm based on indoor wireless sensor networks for risk analysis of industrial operations," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 12, no. 3, pp. 1232–1242, 2015.
- [20] K. K. Mamidisetty, M. J. Ferrara, and S. Sastry, "Systematic selection of cluster heads for data collection," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1548–1558, 2012.
- [21] G. Imanian, M. A. Pourmina, and A. Salahi, "Information-Based Node Selection for Joint PCA and Compressive Sensing-Based Data Aggregation," *Wirel Pers Commun*, vol. 118, pp. 1635–1654, 2021.
- [22] R. M. Robinson and K. J. Anderson, "SIL rating fire protection equipment," in *Proceedings of the 8th Australian workshop on Safety critical systems and software-Volume 33*, 2003, pp. 89–97.
- [23] K. Sotoodeh, "Safety integrity level in valves," *Journal of failure analysis and prevention*, vol. 19, pp. 832–837, 2019.
- [24] A. A. Bhagwat and D. S. More, "Wellhead Surveillance and Shutdown System Using SIL Controller," in *2021 Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*, IEEE, 2021, pp. 1–5.