

FORMULA KOREKSI UNTUK MODE PERMINTAAN RENDAH DAN TINGGI PADA FUNGSI INSTRUMEN UNTUK KEAMANAN DENGAN APLIKASI SUSUNAN 1001

THE CORRECTION FORMULA FOR LOW AND HIGH REQUEST MODE ON INSTRUMENT FUNCTION FOR SAFETY 1001 APPLICATION CONSTRUCTION

Totok Ruki Biyanto¹, Franky Kusuma¹, Yaumar¹, Hari H. Santoso²

¹ Jurusan Teknik Fisika ITS – FTI – ITS Surabaya 60111

² Pusat Penelitian Metrologi LIPI, Kompleks Puspiptek Serpong Gedung 420, Tangerang, Banten
trb@ep.its.ac.id

ABSTRAK

Pencegahan terjadinya keadaan bahaya dalam industri proses dapat dilakukan dengan menerapkan Fungsi Instrumen untuk Keamanan (FIK) pada sebuah sistem. FIK hanya bekerja bila diperlukan. Hingga saat ini, FIK yang diterapkan pada industri proses merupakan FIK yang bekerja pada kondisi frekuensi permintaan rendah. Penilaian keamanan pada FIK yang bekerja pada frekuensi permintaan rendah dapat dilakukan dengan metode kuantitatif. Metode kuantitatif tersebut berupa persamaan eksponensial untuk menghitung laju kegagalan ketika memperoleh permintaan per jam (λ), yang disederhanakan menggunakan deret MacLaurin. Persamaan ini selanjutnya disebut sebagai persamaan yang disederhanakan dalam penelitian ini. Penggunaan persamaan yang disederhanakan pada kondisi frekuensi permintaan tinggi dapat menghasilkan nilai Tingkat Keamanan secara Keseluruhan (TKK) yang lebih tinggi. Hal ini dapat merugikan karena biaya investasi yang dikeluarkan melebihi keperluan. Hasil dari penelitian ini adalah sebuah persamaan faktor koreksi orde 1 yang dapat memperbaiki kesalahan nilai λ yang ditimbulkan oleh pemakaian persamaan yang disederhanakan. Persamaan tersebut berlaku untuk FIK dengan susunan 1001. Hasil persamaan baru dari penelitian ini, yaitu $\lambda_{kor} = 0,9428 \lambda_{MC} + 0,0001 H$. Dengan λ_{MC} merupakan nilai λ dari pemakaian persamaan yang disederhanakan, H merupakan frekuensi terjadinya bahaya yang mungkin terjadi pada sistem. Persamaan faktor koreksi yang diperoleh diterapkan pada studi kasus tangki pelepas gas ke cerobong api dan diperoleh nilai TKK yang sama pada kondisi frekuensi permintaan rendah maupun tinggi. Kesalahan rata-rata yang dihasilkan jauh lebih kecil dibandingkan tanpa menggunakan faktor koreksi, yaitu 5%.

Kata Kunci: Fungsi Instrumen untuk Keamanan (FIK), frekuensi permintaan tinggi, frekuensi permintaan rendah, MacLaurin.

ABSTRACT

The SIF (Safety Instrumented Function) is applied in the process sector to prevent the frequency of hazard. The function of SIF will be required only if needed. Until now, the applied SIF in process sector is operated in low demand mode. The evaluation for the SIF operated in low demand mode could be evaluated using quantitative method. The exponential equation is used as modeling quantitative method. To simplify this equation, the MacLaurin series is utilized in practice. The term used in this research for that equation is simplified-equation. Simplified-equation could produce higher level SIL if it is used in high demand mode of SIF, its mean could increase safety cost more than required. Therefore, this research proposes a new simpler formula to minimize the error. The value of λ generated from simplified-equation should be corrected with the new equation for low demand or high demand mode. The proposed equation in this research is $\lambda_{kor} = 0.9428 \lambda_{MC} + 0.0001 H$. λ_{MC} refers to the value of λ generated with MacLaurin equation, H refers to the hazardous event frequency that may happen in the system. The proposed equation is used to determine SIL of the SIF installed on flare knock out drum. The result is satisfying because there is no more differentiation of value of SIL, whether in low or high demand mode. Correction factor applied to calculate SIL of the SIF has smaller error compared to the one without using correction factor (λ_{MC}). The average error using correction factor is 5% when applied in study case.

Keywords: Safety Instrumented Function (SIF), high demand, low demand, MacLaurin.

1. PENDAHULUAN

Fungsi Instrumen untuk Keamanan (FIK) banyak diterapkan dalam industri proses seperti minyak dan gas, petrokimia, pembangkit listrik, nuklir, dan lain-lain. FIK berfungsi untuk mencegah bahaya yang dapat menyebabkan kerugian material, lingkungan, dan keselamatan manusia. Bahaya tersebut dapat timbul akibat penyimpangan nilai variabel fisis, seperti tekanan, temperatur, dan laju aliran.^[1] Penerapan FIK pada sistem memiliki nilai tingkatan keamanan yang berbeda-beda. Tingkat keamanan pada suatu FIK disebut Tingkat Keamanan secara Keseluruhan (TKK). Semakin tinggi nilai TKK, semakin tinggi pula biaya yang digunakan.^[2] Standar yang digunakan sebagai acuan nilai TKK untuk sebuah FIK terdapat pada standar IEC 61508^[3] dan dijelaskan pada bagian 2.2.

Nilai TKK pada standar IEC 61508 diklasifikasikan berdasarkan frekuensi permintaan dari sebuah FIK, yaitu frekuensi permintaan rendah dan tinggi. Sampai saat ini, dalam industri proses penentuan nilai TKK pada FIK lebih ditekankan pada kondisi frekuensi permintaan rendah.^[4-9] Namun, belakangan ini terdapat FIK yang bekerja pada kondisi frekuensi permintaan tinggi sehingga mewajibkan penjual untuk membuat FIK yang bekerja pada kondisi frekuensi permintaan tinggi.^[2, 10]

Untuk menganalisis tingkat keamanan dari sebuah FIK, ada beberapa metode, di antaranya metode *Fault Tree Analysis* (FTA)^[4], Markov analisis^[7, 11], dan metode yang paling banyak dipergunakan karena mudah dihitung dan memerlukan data yang paling sedikit adalah metode kuantitatif. Pada metode kuantitatif, perhitungan laju kegagalan (λ) ketika memperoleh permintaan per jam disederhanakan dengan deret MacLaurin.^[2, 12] Penentuan TKK dengan metode kuantitatif memiliki beberapa variabel, di antaranya frekuensi terjadinya bahaya (H), laju permintaan (D), waktu tes FIK (T), dan laju kegagalan (λ). Penentuan nilai TKK pada FIK diperoleh dari variabel λ . Penentuan TKK dengan metode kuantitatif memanfaatkan pola deret MacLaurin untuk menyederhanakan fungsi eksponensial. Penyederhanaan tersebut hanya sampai suku kedua dari deret Maclaurin sehingga hanya diperoleh persamaan orde

1. Persamaan hasil penyederhanaan dari deret MacLaurin dapat diaplikasikan untuk menentukan TKK dari sebuah FIK pada kondisi frekuensi permintaan rendah maupun tinggi. Namun, seiring dengan meningkatnya nilai frekuensi permintaan dari sebuah FIK, nilai λ yang diperoleh semakin berbeda dengan nilai λ pada persamaan sebelum disederhanakan. Publikasi sebelumnya yang dilakukan oleh Alan G. King^[2] berhasil memperlihatkan bahwa terjadi perbedaan nilai TKK pada frekuensi permintaan (D) 22/tahun. Hal ini disebabkan oleh penggunaan persamaan MacLaurin yang digunakan pada frekuensi permintaan tinggi. Oleh karena itu, pada penelitian ini diajukan persamaan baru yang dapat mencakup kondisi frekuensi permintaan rendah dan tinggi sehingga diperoleh nilai TKK yang sama dengan persamaan sebelum disederhanakan.

2. KONSEP DASAR

2.1 Pengertian Sistem Instrumen untuk Keamanan (SIK)

Sistem Instrumen untuk Keamanan (SIK) merupakan kumpulan dari seluruh kerja tiap-tiap Fungsi Instrumen untuk Keamanan (FIK). SIK dapat diibaratkan sebagai lapisan pelindung yang digunakan untuk mereduksi atau mencegah kejadian bahaya yang mungkin terjadi. FIK terdiri dari sensor, logika penyelesaian, dan aktuator. FIK bekerja ketika terjadi penyimpangan variabel fisis. Kejadian semacam itu disebut permintaan kerja pada FIK. Berdasarkan frekuensi permintaannya, FIK dibagi menjadi tiga, yaitu yang bekerja pada frekuensi permintaan rendah, frekuensi permintaan tinggi, dan frekuensi permintaan terus-menerus. Standar IEC 61508 mempunyai definisi mengenai permintaan pada sebuah FIK.^[3, 13]

- Frekuensi permintaan rendah: FIK hanya bekerja ketika dibutuhkan. FIK bekerja untuk menjaga sistem tetap dalam kondisi aman. Frekuensi permintaan tidak lebih besar dari 1 kali per tahun.
- Frekuensi permintaan tinggi: FIK hanya bekerja ketika dibutuhkan, di mana frekuensi permintaan lebih besar dari 1 kali per tahun.

- Frekuensi permintaan terus-menerus: FIK bekerja secara terus-menerus dalam kondisi operasi normal untuk menjaga sistem tetap dalam kondisi aman.

Standar tersebut menekankan bahwa jika permintaan kerja pada sebuah FIK kurang dari 1 kali per tahun, FIK dikatakan frekuensi permintaan rendah, dan jika permintaan kerja pada FIK di atas satu kali per tahun, FIK dikatakan frekuensi permintaan tinggi. FIK yang diterapkan dalam sistem harus memenuhi kriteria nilai TKK. Hal ini tergantung dari kejadian bahaya yang akan timbul. Nilai TKK dari sebuah FIK dapat ditetapkan dengan menggunakan metode kuantitatif dengan penyederhanaan persamaan eksponensial menggunakan deret MacLaurin.

2.2 Nilai TKK Berdasarkan Standar IEC 61508

Standar IEC 61508 memiliki kriteria terhadap nilai TKK dengan acuan nilai laju kegagalan (λ) tertentu untuk kondisi frekuensi permintaan tinggi dan frekuensi permintaan rendah. Kriteria tersebut ditunjukkan seperti Tabel 1. Pada kondisi frekuensi permintaan rendah dinyatakan dalam PFD, sedangkan pada kondisi frekuensi permintaan tinggi dinyatakan dalam frekuensi kegagalan per jam atau dapat disebut laju kegagalan (λ).

Penggunaan acuan PFD untuk menentukan TKK pada FIK kurang tepat karena mengabaikan

Tabel 1. Kriteria Nilai TKK pada Kondisi Frekuensi Permintaan Tinggi dan Permintaan Rendah

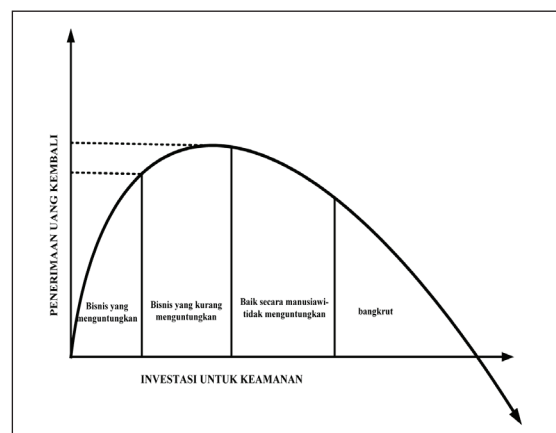
Tingkat Keamanan secara Keseluruhan (TKK)	Frekuensi Permintaan Rendah	Frekuensi Permintaan Tinggi
	Kemungkinan rata-rata terjadinya bahaya saat instrumen diperlukan (PFDavg)	Laju rata-rata terjadinya bahaya per jam (λ)
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$

nilai dari variabel tes interval.^[2] Oleh karena itu, peneliti bebas dalam menentukan acuan yang digunakan untuk menentukan TKK pada FIK.^[13] Digunakan nilai λ sebagai acuan dalam penentuan TKK (kolom kedua), baik pada kondisi frekuensi permintaan rendah maupun frekuensi permintaan tinggi dalam penelitian ini.

2.3 Biaya Keamanan

Gambar 1 adalah gambar tanpa skala yang menunjukkan hubungan antara investasi untuk keamanan dan keuntungan yang diperoleh. Sumbu horizontal menunjukkan besar pengeluaran yang dilakukan oleh sebuah *plant* untuk membuat investasi keamanan pada sebuah sistem, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan keuntungan yang diperoleh. Pada area bisnis yang menguntungkan, pengeluaran untuk investasi keamanan, seperti pencegahan kecelakaan kerja, kebakaran *plant* lebih kecil daripada keuntungan yang diperoleh. Pada area berikutnya, yaitu bisnis yang kurang menguntungkan, keuntungan yang diperoleh tidak sebanding dengan pengeluaran investasi keamanan. Jika investasi keamanan lebih besar lagi dan keuntungan yang diperoleh semakin kecil, bisnis perusahaan akan berada pada area baik secara manusiawi, tetapi tidak menguntungkan dan akhirnya berada pada area bangkrut. Hal tersebut dapat terjadi manakala investasi yang dibuat perusahaan tidak memperoleh keuntungan yang sebanding.

Pertimbangan untuk pengeluaran biaya investasi keamanan harus diperhatikan. Hal ini



Gambar 1. Efek dari Investasi Keamanan yang Berlebihan

dapat dilakukan dengan melakukan analisis keadaan bahaya (*Hazard analysis*).^[12] Tidak semua bahaya yang mungkin timbul memerlukan biaya yang berlebih sehingga analisis keadaan bahaya perlu dilakukan secara kuantitatif. Analisis keadaan bahaya secara kuantitatif dapat dilakukan dengan menentukan nilai TKK pada FIK yang diterapkan dalam suatu sistem. Penilaian tingkat keamanan yang dilakukan pada FIK memiliki istilah Tingkat Keamanan secara Keseluruhan (TKK). Metode kuantitatif untuk menentukan level TKK dari sebuah FIK dapat menggunakan persamaan eksponensial, yang dalam praktiknya persamaan ini disederhanakan dengan menggunakan deret MacLaurin.

2.4 Definisi dari Kejadian Bahaya

Kejadian bahaya merupakan sebuah kecelakaan sistem yang diakibatkan oleh penyimpangan kerja sistem dari kondisi normal. Apabila penyimpangan ini tidak terkontrol, akan menimbulkan bahaya.^[14] Untuk melakukan penilaian TKK pada FIK digunakan variabel frekuensi kejadian bahaya (H). Frekuensi kejadian bahaya merupakan frekuensi terjadinya bahaya. Menurut pengertian Youshiamura dan Sato terdapat tiga macam kejadian bahaya, yaitu kejadian bahaya yang dapat berulang, kejadian bahaya yang dapat diperbarui, dan kejadian bahaya yang sangat fatal.^[15] Kejadian bahaya yang dapat berulang merupakan kejadian bahaya yang belum tentu mengakibatkan konsekuensi. Sebagai contoh, jika jalanan licin, mobil yang melaju dengan kondisi rem yang tidak baik masih tetap dapat selamat jika kemudi dilakukan dengan baik. Kejadian bahaya yang dapat diperbarui merupakan kejadian bahaya yang timbul, tetapi masih bisa diatasi, seperti kebocoran gas pada sistem EUC yang dapat diatasi dengan memperbaiki lokasi kebocoran sehingga operasi tetap dapat berjalan dengan normal. Kejadian bahaya yang sangat fatal merupakan kejadian bahaya yang sudah tidak dapat teratasi dan menimbulkan kerugian yang besar.

2.5 Strategi Tes pada FIK

Kegagalan kerja pada FIK terdiri dari dua macam tipe, yaitu kegagalan yang aman dan kegagalan yang bahaya. Kegagalan yang aman

merupakan kondisi terjadinya permintaan kerja pada FIK, tetapi tidak menimbulkan bahaya. Kejadian semacam ini dinamakan permintaan kerja yang tidak sesuai. Kondisi kegagalan yang aman pada FIK tidak menyebabkan peralatan yang dikontrol berada pada kondisi bahaya. Tipe kedua, yaitu kegagalan yang bahaya. Tipe ini dibedakan lagi menjadi dua, yaitu bahaya yang terdeteksi dan bahaya yang tidak terdeteksi. Bahaya yang terdeteksi adalah kondisi di mana FIK tidak bekerja dengan baik ketika suatu saat akan terjadi permintaan kerja pada FIK, ketika kondisi ini diketahui sebelum terjadinya permintaan kerja dengan adanya tes kinerja pada FIK. Tes kinerja pada FIK biasanya dilakukan pada interval waktu tertentu. Variabel tes interval (T) ini juga memengaruhi nilai TKK dari suatu FIK.^[7]

Bahaya yang tidak terdeteksi merupakan kondisi di mana FIK sebenarnya dalam kondisi tidak bekerja, tetapi belum diketahui karena belum melewati masa tes interval. Untuk FIK yang bekerja pada kondisi permintaan kerja rendah sangat diperlukan tes kinerja dengan interval waktu yang tepat. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya kejadian bahaya yang belum terdeteksi. Tes kinerja yang dilakukan pada komponen-komponen elektronik yang bisa diprogram berupa diagnosis, yang dapat mendeteksi beberapa macam kegagalan, di antaranya kesalahan saat dijalankan dan transmisi sinyal yang bermasalah.

2.6 Persamaan Penentuan TKK pada Susunan 1001

Susunan 1001 adalah FIK tanpa adanya susunan paralel pada sensor dan aktuator. Persamaan matematika yang digunakan untuk menentukan TKK pada FIK adalah sebagai berikut,^[2, 12]

$$H = \lambda \left(1 - e^{\left(\frac{-DT}{2} \right)} \right) \dots \dots \dots (1)$$

di mana,

H = Frekuensi terjadinya bahaya (per tahun)

λ = Laju kegagalan pada FIK (per jam)

D = Frekuensi permintaan adalah frekuensi FIK ketika diminta untuk bekerja (per tahun)

T = Tes interval adalah selang waktu yang digunakan untuk menguji kinerja FIK (tahun)

Persamaan tersebut digunakan untuk menentukan λ dari sebuah FIK, yang sesuai guna mengatasi kejadian bahaya. Ketika persamaan tersebut digunakan untuk mencari λ , Persamaan (1) berubah menjadi Persamaan (2).

$$\lambda = \frac{H}{\left(1 - \exp\left(\frac{-DT}{2}\right)\right)} \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan (2) dalam pengaplikasiannya disederhanakan sehingga lebih mudah untuk menentukan nilai TKK pada FIK. Ini dilakukan dengan menguraikan fungsi eksponensial dengan menggunakan deret MacLaurin sebagai berikut.

$$f(D) = e^{\frac{-DT}{2}} \rightarrow f(0) = 1$$

$$f'(D) = -\frac{T}{2} \times e^{\frac{-DT}{2}} \rightarrow f'(0) = -\frac{T}{2}$$

$$f''(D) = \left(-\frac{T}{2}\right)^2 \times e^{\frac{-DT}{2}} \rightarrow f''(0) = \left(-\frac{T}{2}\right)^2 \dots(3)$$

$$f'''(D) = \left(-\frac{T}{2}\right)^3 \times e^{\frac{-DT}{2}} \rightarrow f'''(0) = \left(-\frac{T}{2}\right)^3$$

$$f^n(D) = \left(-\frac{T}{2}\right)^n \times e^{\frac{-DT}{2}} \rightarrow f^n(0) = \left(-\frac{T}{2}\right)^n$$

sehingga Persamaan (2) menjadi Persamaan (4) setelah deret MacLaurin diterapkan.

$$\lambda = \frac{H}{\left(1 - \left(1 - \frac{DT}{2} + \frac{D^2T^2}{8} - \frac{D^3T^3}{48} + \dots\right)\right)} \dots\dots\dots(4)$$

Untuk tujuan kemudahan dalam aplikasi, pengaplikasian Persamaan (4) untuk menentukan TKK pada FIK hanya digunakan dua suku dari deret MacLaurin sehingga Persamaan (4) hanya menjadi persamaan orde 1 seperti Persamaan (5).

$$\lambda = \frac{2H}{DT} \dots\dots\dots(5)$$

Besaran λ pada Persamaan (5) akan disebut sebagai λ_{MC} dalam penelitian ini dan λ pada Persamaan (2) selanjutnya akan disebut sebagai λ_{exp} .

3. METODE PENELITIAN

Diagram alir metode penelitian yang digunakan tersaji dalam Gambar 2. Penjelasan tiap-tiap langkah dijelaskan pada subbab berikut.

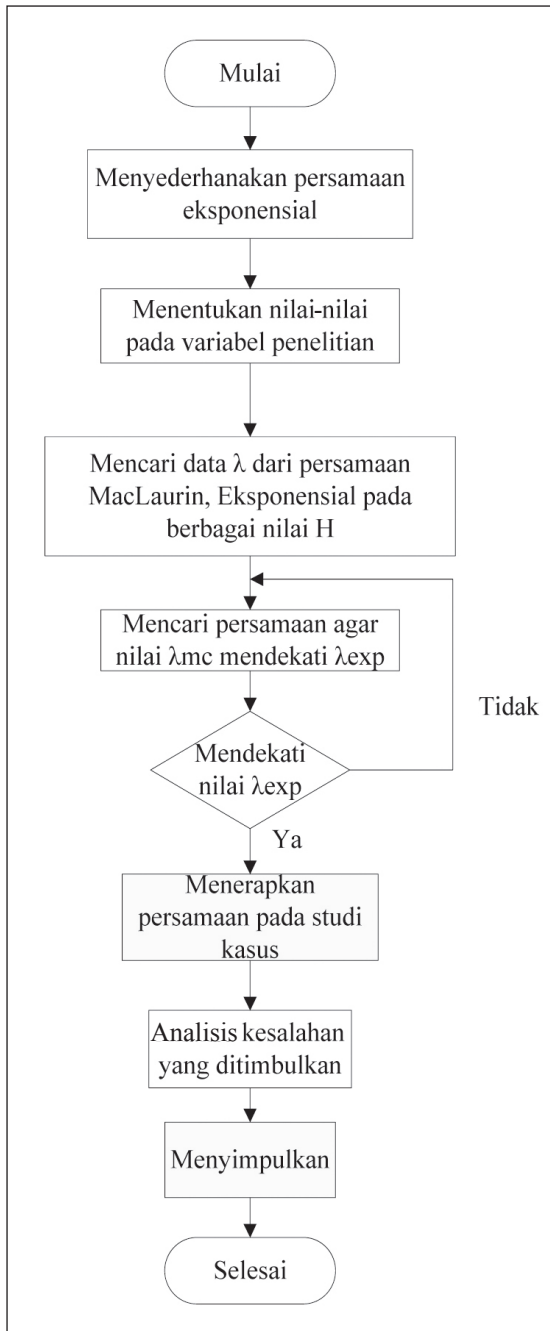
3.1 Menyederhanakan Persamaan Eksponensial

Persamaan yang digunakan untuk menentukan faktor koreksi agar tidak timbul kesalahan TKK adalah Persamaan (2) dan (5). λ pada Persamaan (2) dan Persamaan (5) masing-masing diberi istilah λ_{exp} dan λ_{MC} pada Persamaan (5). Persamaan (2) akan digunakan sebagai acuan nilai TKK yang benar, sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.^[2] Persamaan (2) sebenarnya sudah cukup untuk menyelesaikan masalah penentuan TKK pada kondisi frekuensi permintaan rendah maupun tinggi. Dalam rangka mempermudah pemakaian dalam praktik, Persamaan (2) disederhanakan menggunakan deret MacLaurin sehingga menimbulkan perbedaan nilai TKK pada frekuensi permintaan tertentu.

3.2 Menentukan Nilai Variabel yang Digunakan

Pada Persamaan (2) dan (5) terdapat beberapa variabel yang digunakan, yaitu H, D, T, dan λ . Pada penelitian ini λ merupakan variabel *output*, sedangkan variabel H, D, dan T merupakan variabel *input*. Nilai T yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada nilai 1 tahun. Nilai H yang digunakan divariasikan dari 10^{-5} hingga 10^{-1} per tahun. Nilai D yang digunakan divariasikan antara 0,1 hingga 100 kali per tahun. Nilai H yang diambil pada rentang tersebut sudah cukup karena pada saat $H = 10^{-5}$, nilai λ_{exp} maupun λ_{MC} telah mencapai TKK 4. Sementara itu, berdasarkan pada industri proses terutama minyak dan gas, nilai TKK pada sebuah FIK sangat jarang yang mencapai nilai TKK 3.^[16] Jadi, persamaan yang dihasilkan pada penelitian ini cukup valid jika digunakan pada industri proses minyak dan gas.

Nilai D yang digunakan hingga mencapai 100 kali per tahun karena FIK yang bekerja pada kondisi frekuensi permintaan tinggi masih merupakan isu baru-baru ini dan penjual masih



Gambar 2. Diagram Alir Metode Penelitian

berusaha untuk mengembangkan FIK dengan kinerja permintaan yang tinggi. Kontribusi yang dihasilkan pada penelitian ini adalah memberikan ide baru bagi penjual menggunakan faktor koreksi dalam penelitian ini untuk penilaian TKK pada FIK yang akan dibuat sehingga tidak menimbulkan kesalahan penilaian TKK dan kebingungan bagi para analis.

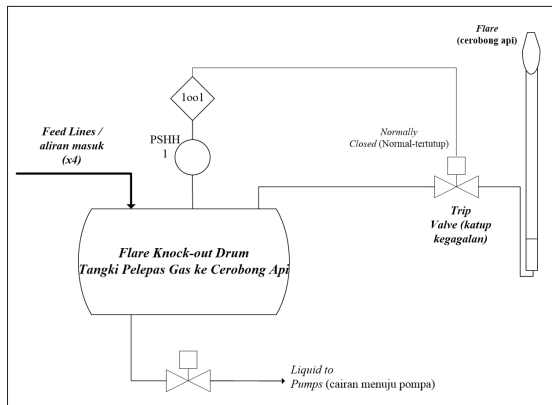
3.3 Mencari Persamaan Antara λ_{MC} dan λ_{exp}

Nilai-nilai λ_{exp} dan λ_{MC} pada Persamaan (2) dan Persamaan (5) diplot dengan sumbu x sebagai λ_{MC} dan sumbu y sebagai λ_{exp} . Plot dilakukan untuk tiap-tiap H, yaitu mulai dari $H = 10^{-5} - 10^{-1}$. Tiap-tiap orde memiliki 9 nilai H, yaitu dari 0,1 hingga 0,9 dengan beda 0,1. Dengan demikian, total hubungan antara nilai λ_{exp} dan λ_{MC} yang diperoleh terdapat 45 persamaan.

Hasil data yang telah diplot kemudian dicari persamaan faktor koreksinya sehingga nilai λ_{MC} mendekati dengan λ_{exp} . Persamaan yang digunakan untuk mendekati nilai λ_{MC} terhadap nilai λ_{exp} adalah persamaan linear $Y=AX+B$ dengan Y adalah λ (hasil persamaan faktor koreksi) dan X adalah λ_{MC} . Dengan demikian, terdapat 45 persamaan linear. Semua persamaan linear tersebut diuji dengan mengganti X dengan λ_{MC} . Hasil yang diperoleh dari persamaan ini dicari selisihnya dengan nilai λ_{exp} sebab dalam penelitian ini, nilai perhitungan TKK yang sesuai adalah persamaan eksponensial.^[2] Dari semua persamaan yang diperoleh (45 persamaan), diperoleh nilai B yang berbeda untuk tiap-tiap H sehingga dicari lagi hubungan antara H dan konstanta B. Setelah diperoleh hubungan tersebut, diperoleh persamaan faktor koreksi hubungan antara λ_{exp} dan λ_{MC} . Pola persamaan umum yang terbentuk setelah hubungan antara H dan B diperoleh adalah $\lambda = A \cdot \lambda_{MC} + (C \cdot H + D)$, dengan C merupakan koefisien baru yang diperoleh dari hubungan antara H dan B, D merupakan konstanta barunya. Setelah pola persamaan faktor koreksi untuk susunan *1ool* diperoleh, hasilnya dibandingkan dengan λ_{exp} dan dihitung kesalahan rata-rata yang timbul pada penerapan studi kasus. Apabila hasil yang diperoleh pada beberapa nilai H terjadi kesalahan yang besar, diperlukan koreksi kembali terhadap persamaan hubungan antara H dan B.

3.4 Menerapkan Persamaan Faktor Koreksi pada Studi Kasus

Setelah persamaan faktor koreksi untuk susunan *1ool* diperoleh, persamaan tersebut diterapkan pada studi kasus pada tangki pelepas gas ke cerobong api. Gambar 3 merupakan studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. Penerapan FIK pada Tangki Pelepas Gas ke Cerobong Api

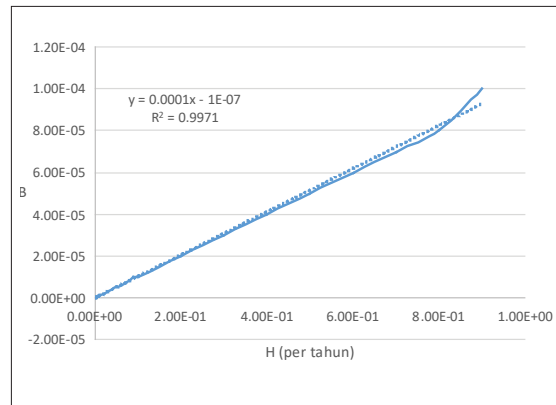
Aliran fluida masuk ke tangki pelepas gas ke cerobong api melalui jalur pipa. Bahaya yang mungkin terjadi dalam studi kasus ini berupa kebocoran gas hidrokarbon yang dapat memicu kebakaran. Kejadian bahaya ini timbul akibat aliran fluida yang masuk menuju tangki pelepas gas ke cerobong api melebihi kapasitas sehingga tekanan pada tangki pelepas gas ke cerobong api bertambah dan melepaskan gas hidrokarbon. Untuk itu, dipasanglah tekanan FIK berupa sensor dengan susunan *1oo1*, logika penyelesaian berupa set poin ambang batas tekanan yang diperbolehkan, dan aktuator berupa katup kegagalan. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis sistem FIK sebagai susunan *1oo1*. Data yang terdapat pada studi kasus ini adalah frekuensi kejadian bahaya (H) sebesar 10^{-2} per tahun dan frekuensi permintaan (D) pada FIK sebesar 22 per tahun.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan menggunakan Persamaan (2) dan Persamaan (5), diperoleh persamaan hubungan antara λ_{exp} dan λ_{MC} seperti pada Persamaan (8),

$$\dots\dots\dots(8)$$

$\lambda_{kor} = 0,9428 \lambda_{MC} + B$
 dengan B merupakan konstanta yang selalu berubah terhadap nilai H dan λ_{kor} merupakan nilai laju kegagalan setelah memperoleh faktor koreksi. Oleh karena nilai B selalu berubah terhadap H, dicari persamaan hubungan antara H dan B, hasil plot hubungan untuk H dan B seperti Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan Antara H dan B

Dari Gambar 4 diperoleh persamaan hubungan antara H dan B, yaitu:

$$B = 0,00001H - 10^{-7} \dots\dots\dots(9)$$

dengan menggantikan Persamaan (9) ke Persamaan (8) maka diperoleh persamaan faktor koreksi untuk menghitung nilai λ pada FIK susunan *1oo1*, seperti berikut ini.

$$\lambda_{kor} = 0,9428 \lambda_{MC} + (0,00001H - 10^{-7}) \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan (10) divalidasi dengan mengalihkan nilai λ_{MC} ke dalam persamaan (10). Diperoleh bahwa nilai kesalahan jika digunakan Persamaan (10) akan semakin besar seiring dengan berkurangnya nilai H, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Kesalahan yang ditimbulkan oleh Persamaan (10) disebabkan oleh adanya konstanta sebesar -10^{-7} . Hal ini disebabkan oleh suku pertama dan kedua dari Persamaan (9) akan saling meniadakan, bahkan menimbulkan nilai minus ketika H bernilai kurang dari 10^{-3} . Hal inilah yang menimbulkan kesalahan yang besar ketika H lebih kecil dari 10^{-3} .

Oleh karena itu, koreksi dilakukan kembali pada hubungan antara H dan B. Ternyata terdapat nilai hubungan H dan B yang menyebabkan kurva menjadi diskontinu, yaitu ketika H bernilai 0,9; 0,09; 0,009; 0,0009; dan 0,00009 sehingga dengan memberikan pendekatan terhadap nilai B pada H tersebut diperoleh hubungan antara nilai H dan B yang kontinu, seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.

Tabel 2. Kesalahan yang Ditimbulkan oleh Penggunaan Persamaan (10)

H	Kesalahan antara λ_{MC} terhadap λ_{exp} (%)	Kesalahan antara λ_{kor} (faktor koreksi) terhadap λ_{exp} (%)
1.00E-05	91%	8.595%
3.00E-05	91%	2.869%
5.00E-05	91%	1.724%
1.00E-04	91%	865%
3.00E-04	91%	292%
5.00E-04	91%	177%
1.00E-03	91%	92%
3.00E-03	91%	34%
5.00E-03	91%	23%
1.00E-02	91%	15%
3.00E-02	91%	10%
5.00E-02	91%	10%
1.00E-01	91%	9%
3.00E-01	91%	8%
5.00E-01	91%	8%

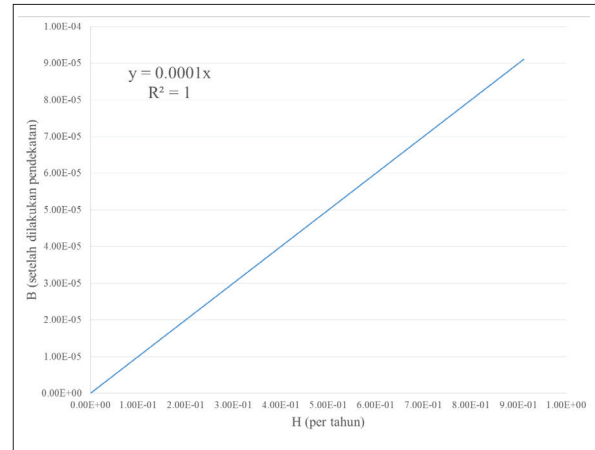
Dari Gambar 5 diperoleh hubungan antara H dan B yang baru, yaitu:

$$B = 0,0001 H \quad \dots\dots\dots(11)$$

Dengan menggunakan persamaan hubungan antara H dan B yang telah dikoreksi (Persamaan (11)), diperoleh persamaan faktor koreksi yang baru seperti Persamaan (12). Persamaan (12) diperoleh dengan menggantikan Persamaan (11) ke Persamaan (8).

$$\lambda_{kor} = 0,9428 \lambda_{MC} + 0,0001H \quad \dots\dots\dots(12)$$

Persamaan faktor koreksi (12) yang telah diperoleh, divalidasi pada beberapa nilai H sehingga diperoleh hasil seperti pada Tabel 3. Diperoleh bahwa kesalahan yang ditimbulkan dengan menggunakan persamaan faktor koreksi (12) lebih kecil daripada menggunakan Persamaan (10), terutama pada nilai H yang kecil (kurang dari 10^{-3}). Kesalahan rata-rata pada saat digunakan Persamaan (12) sebesar 8%, jauh lebih baik dibanding dengan menggunakan Persamaan (10).



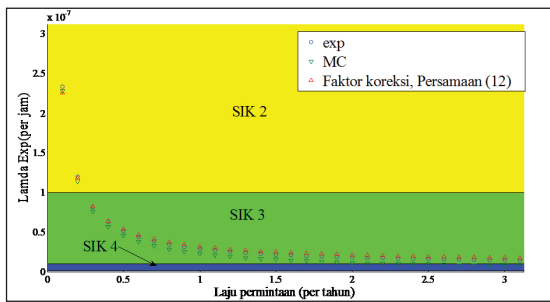
Gambar 5. Persamaan Hubungan Antara H dan B Setelah Dikoreksi

Tabel 3. Perbandingan Kesalahan Nilai λ dengan Menggunakan Persamaan (10) dan (12)

H	Kesalahan antara λ_{MC} terhadap λ_{exp} (%)	Kesalahan antara λ_{kor} (10) terhadap λ_{exp} (%)	Kesalahan antara λ_{kor} (12) terhadap λ_{exp} (%)
1.00E-05	91%	8.595%	8%
3.00E-05	91%	2.869%	8%
5.00E-05	91%	1.724%	8%
1.00E-04	91%	865%	8%
3.00E-04	91%	292%	8%
5.00E-04	91%	177%	8%
1.00E-03	91%	92%	8%
3.00E-03	91%	34%	8%
5.00E-03	91%	23%	8%
1.00E-02	91%	15%	8%
3.00E-02	91%	10%	8%
5.00E-02	91%	10%	8%
1.00E-01	91%	9%	8%
3.00E-01	91%	8%	8%
5.00E-01	91%	8%	8%
Kesalahan rata rata terhadap λ_{exp}	91%	606,533%	8,0%

Jika Persamaan (12) diplot pada salah satu nilai $H = 0,0001$, akan diperoleh hasil yang memuaskan terutama pada saat kondisi permintaan kerja tinggi. Gambar 6 merupakan perbandingan hasil plot dengan Persamaan (12), persamaan yang disederhanakan (λ_{MC}), dan persamaan eksponensial (λ_{exp}) pada saat nilai $H = 0,0001$ per tahun. Dari Gambar 6 terlihat bahwa nilai λ dengan menggunakan faktor koreksi Persamaan (12) mendekati nilai λ_{exp} , (tanda Δ hampir mengimpit tanda o), terutama ketika *demand rate* semakin tinggi. Berbeda dengan hasil nilai λ dengan menggunakan persamaan yang disederhanakan (tanda ∇ semakin menjauhi tanda o) yang menghasilkan nilai kesalahan semakin besar ketika nilai permintaan kerja dari FIK bertambah.

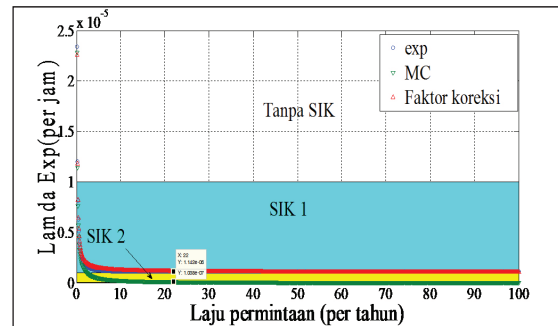
Penerapan Persamaan (12) pada studi kasus tangki pelepas gas ke cerobong api yang telah



Gambar 6. Plot Persamaan (12) pada $H = 0,0001$

dijelaskan pada Bagian 3, akan menghasilkan plot antara λ_{exp} , λ_{MC} , dan λ hasil persamaan faktor koreksi (12) seperti Gambar 7. Dari Gambar 7 diperoleh bahwa nilai λ dengan faktor koreksi (12) mendekati nilai λ_{exp} dan menghasilkan nilai TKK yang sama, yaitu TKK 1. Jika analisis tetap menggunakan persamaan yang disederhanakan dengan deret MacLaurin, akan diperoleh nilai TKK 2 pada nilai frekuensi permintaan 22 per tahun. Hal ini akan merugikan jika diterapkan TKK 2 pada sistem FIK karena biaya investasi yang digunakan berlebihan untuk mencegah bahaya kebocoran gas pada tangki pelepas gas ke cerobong api.

Tabel 4 memperlihatkan kesalahan yang diakibatkan oleh penggunaan Persamaan (12) pada studi kasus dan diperoleh kesalahan sebesar 5% jika Persamaan (12) digunakan



Gambar 7. Penerapan Persamaan (12) pada Studi Kasus

Tabel 4. Kesalahan yang Ditimbulkan oleh Pemakaian Persamaan (12) pada Studi Kasus

D	λ_{MC}	λ_{Exp}	λ_{kor} (faktor koreksi (12))	Kesalahan antara λ_{MC} dan λ_{exp} (%)	Kesalahan antara λ_{kor} (faktor koreksi (12)) dan λ_{exp} (%)
0,1	2.28E-05	2.34E-05	2.26E-05	2%	3%
11,2	2.04E-07	1.15E-06	1.25E-06	82%	9%
22,3	1.02E-07	1.14E-06	1.16E-06	91%	2%
33,4	6.84E-08	1.14E-06	1.13E-06	94%	1%
44,5	5.13E-08	1.14E-06	1.11E-06	96%	3%
55,6	4.11E-08	1.14E-06	1.10E-06	96%	4%
66,7	3.42E-08	1.14E-06	1.09E-06	97%	4%
77,8	2.93E-08	1.14E-06	1.09E-06	97%	5%
88,9	2.57E-08	1.14E-06	1.09E-06	98%	5%
100	2.28E-08	1.14E-06	1.08E-06	98%	5%
Kesalahan rata-rata				91%	5%

pada studi kasus tangki pelepas gas ke cerobong api. Kesalahan yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan faktor koreksi (12) jauh lebih kecil dibandingkan tanpa menggunakan faktor koreksi (λ_{MC}), terutama kasus frekuensi permintaan tinggi pada FIK.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah persamaan umum untuk penentuan TKK pada FIK, pada susunan *IooI*, yang dapat diformulasikan sebagai $\lambda_{kor} = 0,9428 \lambda_{MC} + 0,0001H$, dan persamaan ini yang diterapkan pada studi kasus tangki pelepas gas ke cerobong api menghasilkan kesalahan sebesar 5% sehingga tidak diperoleh lagi kesalahan nilai TKK, terutama pada frekuensi permintaan tinggi.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Teknik Fisika Universitas Nasional Jakarta, dan Puslit Metrologi-LIPI Serpong atas bantuannya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mannan, S. 2004. "Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment, and Control." Butterworth-Heinemann.
- [2] King, A. G. 2014. "SIL Determination: Recognising and Handling High Demand Mode Scenarios." *Process Safety and Environmental Protection* 92: 324–328.
- [3] I. 61508. 1998. Part 1: General Requirements: Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related System. vol. Part 1.
- [4] Dutuit, Y., F. Innal, A. Rauzy, dan J.P. Signoret. 2008. "Probabilistic Assessments in Relationship with Safety Integrity Levels by Using Fault Trees." *Reliability Engineering & System Safety* 93: 1867–1876.
- [5] Hokstad, P. dan K. Corneliussen. 2004. "Loss of Safety Assessment and the IEC 61508 Standard." *Reliability Engineering & System Safety* 83: 111–120.
- [6] Innal, F., Y. Dutuit, A. Rauzy, dan J. Signoret. 2010. "New Insight into the Average Probability of Failure on Demand and the Probability of Dangerous Failure per Hour of Safety Instrumented Systems." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 224: 75–86.
- [7] Jin, H., M. A. Lundteigen, dan M. Rausand. 2011. "Reliability Performance of Safety Instrumented Systems: A Common Approach for Both Low-and High-demand Mode of Operation." *Reliability Engineering & System Safety* 96: 365–373.
- [8] Jin, H., M. A. Lundteigen, dan M. Rausand. 2012. "Uncertainty Assessment of Reliability Estimates for Safety-Instrumented Systems." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of risk and reliability* 226: 646–655.
- [9] Langeron, Y., A. Barros, A. Grall, dan C. Bérenguer. 2008. "Combination of Safety Integrity Levels (SILs): A Study of IEC61508 Merging Rules." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 21: 437–449.
- [10] Wang, Y. dan M. Rausand. 2014. "Reliability Analysis of Safety-Instrumented Systems Operated in High-Demand Mode." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 32: 254–264.
- [11] Zhang, T., W. Long, dan Y. Sato. 2003. "Availability of Systems with Self-diagnostic Components—Applying Markov Model to IEC 61508-6." *Reliability Engineering & System Safety* 80: 133–141.
- [12] K. TA. 1993. "Hazop and Hazan: Identifying and Assessing Process Industry Hazards." *Rugby*, 1–223. UK: Institution of Chemical Engineers
- [13] Hokstad, P. 2014. "Demand Rate and Risk Reduction for Safety Instrumented Systems." *Reliability Engineering & System Safety* 127: 12–20.
- [14] Rausand, M. dan A. Hoyland. 2004. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications* 396. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [15] Yoshimura, I. dan Y. Sato. 2009. "Estimation of Calendar-Time-and Process-Operative-Time-Hazardous-Event Rates for the Assessment of Fatal Risk." *International Journal of Performability Engineering* 5: 377.
- [16] King, A. G. 2003. "SIL Determination: Hints and Tips for Practitioners". England: ABB Eutech. <https://library.e.abb.com/public/b846e1ff0225128f48257767005480a1/ABB%20-%20SIL%20Hints%20and%20Tips.pdf>.