

## Analisis Potensi Bahaya Kebakaran pada Ruang UPS/Baterai dan Panel Kontrol Menggunakan *Fire Risk Assessment* Semikuantitatif Berbasis Konsekuensi

Mauza Nandika<sup>1</sup>, Moch. Luqman Ashari<sup>1\*</sup> dan Mochamad Yusuf Santoso<sup>1</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

\*E-mail: [moch.luqmanashari@ppns.ac.id](mailto:moch.luqmanashari@ppns.ac.id)

### Abstrak

Ruang *UPS/Battery Room* dan *Control Panel Room* merupakan area penting pada fasilitas terminal energi karena berperan dalam menjaga kontinuitas sistem kelistrikan dan operasional. Keberadaan baterai, UPS, panel listrik, kabel, serta komponen kontrol menimbulkan potensi bahaya kebakaran yang perlu diidentifikasi sejak tahap perencanaan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik potensi bahaya kebakaran pada ruang *UPS/Battery Room* dan *Control Panel Room* berdasarkan desain dan perencanaan ruangan. Metode yang digunakan adalah *Fire Risk Assessment* (FRA) semikuantitatif berbasis *consequence* yang mengacu pada prinsip NFPA 551. Aspek *consequence* difokuskan pada *property loss consequence*, sehingga penilaian diarahkan pada potensi kerusakan aset fisik dan peralatan. Tahapan penelitian meliputi identifikasi potensi bahaya, penentuan skenario kebakaran, identifikasi *fire hazard*, penilaian *property loss consequence*, penentuan nilai *likelihood* dan *consequence*, serta pengelompokan tingkat risiko menggunakan *risk matrix*. Hasil penilaian menunjukkan bahwa skenario *thermal runaway with propagation* menjadi skenario kritis pada ruang *UPS/Battery Room* dengan nilai risiko 15 dan kategori *Moderate to High*. Pada *Control Panel Room*, skenario *electrical short circuit leading to panel fire* menjadi skenario kritis dengan nilai risiko 12 dan kategori *Moderate to High*. Hasil FRA telah divalidasi melalui *expert judgement* sehingga dapat digunakan sebagai dasar awal dalam perencanaan pengendalian risiko kebakaran pada kedua ruangan.

**Kata Kunci:** *Fire Risk Assessment, UPS/Battery Room, Control Panel Room, Thermal Runaway, Property Loss Consequence, NFPA 551*

### Abstract

The *UPS/Battery Room* and *Control Panel Room* are critical areas in an energy terminal facility because they support the continuity of electrical and operational systems. The presence of batteries, UPS units, electrical panels, cables, and control components creates potential fire hazards that need to be identified during the planning stage. This study aims to analyze the characteristics of fire hazards in the *UPS/Battery Room* and *Control Panel Room* based on room design and planning conditions. The method used in this study is a semi-quantitative consequence-based *Fire Risk Assessment* (FRA) referring to the principles of NFPA 551. The consequence aspect is focused on property loss consequence; therefore, the assessment emphasizes potential damage to physical assets and equipment. The research stages include hazard identification, fire scenario determination, fire hazard identification, property loss consequence assessment, likelihood and consequence scoring, and risk level classification using a risk matrix. The results show that thermal runaway with propagation is the critical fire scenario in the *UPS/Battery Room*, with a risk score of 15 and a *Moderate to High* category. In the *Control Panel Room*, electrical short circuit leading to panel fire is identified as the critical scenario, with a risk score of 12 and a *Moderate to High* category. The FRA results have been validated through expert judgement and can be used as an initial basis for planning fire risk control measures in both rooms.

**Keywords:** *Fire Risk Assessment, UPS/Battery Room, Control Panel Room, Thermal Runaway, Property Loss Consequence, NFPA 551*

## 1. PENDAHULUAN

Kebakaran pada fasilitas industri merupakan salah satu potensi bahaya yang dapat menimbulkan kerugian terhadap keselamatan, aset, dan keberlangsungan operasi. Risiko kebakaran dipengaruhi oleh sumber penyalan, karakteristik bahan, kondisi bangunan, sistem kelistrikan, dan sistem proteksi yang tersedia (Kodur dkk., 2020). Pada fasilitas terminal energi, sistem kelistrikan memiliki peran penting dalam mendukung kontinuitas proses. Ruang UPS/baterai (*UPS/Battery Room*) dan ruang panel kontrol (*Control Panel Room*) perlu diperhatikan sejak tahap perencanaan karena berfungsi dalam penyediaan daya cadangan, distribusi listrik, dan pengendalian sistem. Kebakaran pada salah satu ruang tersebut dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan mengganggu fungsi sistem kelistrikan secara keseluruhan.

Ruang UPS/baterai memiliki karakteristik bahaya yang berkaitan dengan keberadaan baterai dan sistem *Uninterruptible Power Supply* (UPS). Baterai litium-ion dapat mengalami kegagalan akibat *internal short circuit*, *external short circuit*, *overcharging*, *overheating*, atau kerusakan komponen internal. Kondisi tersebut dapat meningkatkan temperatur baterai dan berkembang menjadi *thermal runaway* apabila panas tidak dapat dikendalikan (Kaliaperumal dkk., 2021). Kerusakan separator juga dapat menyebabkan kontak antar elektroda dan memicu korsleting internal pada sel baterai (Tong dan Li, 2024). Proses *thermal runaway* dapat merambat antar sel atau modul serta melepaskan gas beracun dan mudah terbakar. Akumulasi gas pada ruang tertutup dapat meningkatkan potensi kebakaran atau ledakan apabila terdapat sumber penyalan (Bugrynec dkk., 2024). Karakteristik tersebut perlu dipertimbangkan dalam perencanaan instalasi dan perlindungan sistem penyimpanan energi sesuai NFPA 855 (NFPA, 2023).

Penelitian terdahulu telah membahas kebakaran baterai dan kabinet listrik melalui pendekatan simulasi dan analisis parameter. Yao dkk. (2024) melakukan simulasi kebakaran baterai litium-ion dan menunjukkan bahwa kabut air halus dapat menurunkan temperatur, ukuran api, dan *heat release rate*. Selokar dkk. (2025) menganalisis kebakaran kabinet listrik dan menunjukkan bahwa karakteristik kabinet, ventilasi, bahan mudah terbakar, serta posisi sumber penyalan memengaruhi pelepasan panas. Li dkk. (2024) melakukan penilaian risiko dan simulasi skenario kebakaran pada bangunan asrama dengan melibatkan validasi ahli. Penelitian tersebut belum secara khusus menilai potensi kebakaran pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol berdasarkan konsekuensi kerusakan aset pada tahap perencanaan fasilitas.

Objek penelitian masih berada pada tahap perencanaan sehingga data historis kejadian kebakaran belum tersedia secara lengkap. Kondisi tersebut menyebabkan penilaian risiko tidak dapat sepenuhnya didasarkan pada frekuensi kejadian aktual. Metode yang digunakan adalah *Fire Risk Assessment* (FRA) semikuantitatif berbasis konsekuensi dengan mengacu pada NFPA 551. Pedoman tersebut digunakan dalam evaluasi risiko kebakaran melalui identifikasi bahaya, penentuan skenario, penilaian kemungkinan dan konsekuensi, serta pengelompokan tingkat risiko (NFPA, 2022).

Penelitian difokuskan pada konsekuensi kerugian aset (*property loss consequence*), yaitu potensi kerusakan aset fisik dan peralatan akibat skenario kebakaran pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol. Fokus tersebut dipilih karena kedua ruangan berisi peralatan penting yang berhubungan langsung dengan sistem kelistrikan dan operasi fasilitas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik potensi bahaya kebakaran pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol berdasarkan desain dan perencanaan ruangan menggunakan *Fire Risk Assessment* semikuantitatif berbasis konsekuensi.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Fire Risk Assessment* (FRA) semikuantitatif berbasis konsekuensi untuk menganalisis potensi bahaya kebakaran pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol. Proses penilaian mengacu pada prinsip NFPA 551 dalam mengidentifikasi bahaya, menyusun skenario kebakaran, menilai kemungkinan kejadian dan konsekuensi, serta menentukan tingkat risiko. Metode ini dipilih karena objek penelitian masih berada pada tahap perencanaan sehingga data historis kejadian kebakaran belum tersedia secara lengkap.

Objek penelitian terdiri atas ruang UPS/baterai (*UPS/Battery Room*) dan ruang panel kontrol (*Control Panel Room*) pada fasilitas terminal energi. Kedua ruangan dipilih karena memiliki peran penting dalam mendukung kontinuitas sistem kelistrikan dan operasional. Ruang UPS/baterai berisi sistem UPS dan baterai yang berpotensi mengalami kegagalan termal. Ruang panel kontrol berisi panel listrik, kabel, terminal, dan komponen kontrol yang memiliki potensi bahaya akibat gangguan kelistrikan.

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara dengan pihak yang memahami perencanaan fasilitas dan karakteristik peralatan pada kedua ruangan. Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai fungsi ruangan, jenis peralatan, potensi sumber penyalan, mekanisme kegagalan, skenario kebakaran, dan potensi kerusakan aset. Data primer juga diperoleh melalui *expert judgement* untuk memvalidasi kesesuaian skenario kebakaran, nilai *likelihood*, nilai *consequence*, dan kategori risiko.

Data sekunder diperoleh dari dokumen desain ruangan, spesifikasi teknis peralatan, dokumen internal penilaian risiko perusahaan, matriks risiko yang berlaku di perusahaan, NFPA 551, NFPA 855, serta literatur yang berkaitan dengan kebakaran baterai dan instalasi listrik. Data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menyusun skenario kebakaran, menentukan bentuk konsekuensi, dan mendukung pemberian nilai risiko.

Instrumen penelitian terdiri atas pedoman wawancara, lembar identifikasi potensi bahaya kebakaran, lembar penilaian FRA, matriks risiko perusahaan, dan lembar validasi *expert judgement*. Pedoman wawancara digunakan untuk memperoleh informasi dari pihak yang memahami kondisi perencanaan fasilitas. Lembar identifikasi potensi bahaya digunakan untuk mencatat sumber bahaya, mekanisme kegagalan, dan skenario kebakaran. Lembar penilaian FRA digunakan untuk mencatat nilai *likelihood*, *consequence*, nilai risiko, dan kategori risiko. Lembar validasi *expert judgement* digunakan untuk memastikan bahwa hasil penilaian sesuai dengan karakteristik ruangan dan peralatan yang dianalisis.

Tahapan FRA diawali dengan identifikasi potensi bahaya kebakaran pada masing-masing ruangan. Identifikasi pada ruang UPS/baterai difokuskan pada *thermal runaway*, *internal short circuit*, *external short circuit*, *overcharging*, dan *overheating*. Identifikasi pada ruang panel kontrol difokuskan pada *short circuit*, *overload*, *loose connection*, kerusakan isolasi kabel, kegagalan *circuit breaker*, dan penumpukan debu yang berpotensi tersulut.

Potensi bahaya yang telah diidentifikasi kemudian dikembangkan menjadi skenario kebakaran. Setiap skenario dianalisis berdasarkan *fire hazard* dan *property loss consequence*. Aspek *property loss consequence* digunakan sebagai fokus penilaian karena penelitian diarahkan pada potensi kerusakan aset fisik dan peralatan, seperti baterai, UPS, panel listrik, kabel, terminal, dan komponen pendukung. Nilai konsekuensi tidak ditentukan berdasarkan dampak langsung terhadap keselamatan personel, tetapi berdasarkan tingkat kerusakan aset yang mungkin terjadi.

Penilaian risiko dilakukan dengan menentukan nilai *likelihood* (L) dan *consequence* (C) pada setiap skenario kebakaran. NFPA 551 digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan dan evaluasi FRA, sedangkan kriteria pemberian nilai *likelihood*, *consequence*, dan kategori risiko mengacu pada matriks risiko yang berlaku di perusahaan. Nilai *likelihood* ditentukan berdasarkan kondisi desain ruangan, karakteristik peralatan, potensi sumber penyalan, dokumen internal perusahaan, literatur, hasil wawancara, dan *expert judgement*. Nilai *consequence* ditentukan berdasarkan luas kerusakan dan tingkat kehilangan fungsi aset fisik serta peralatan. Nilai risiko kebakaran diperoleh melalui perkalian antara nilai *likelihood* dan *consequence* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1)

$$R = L \times C \quad (1)$$

Nilai risiko kemudian diklasifikasikan menggunakan matriks risiko perusahaan. Kategori risiko terdiri atas *Low* (L), *Low to Moderate* (LM), *Medium* (M), *Moderate to High* (MH), dan *High* (H). Hasil klasifikasi digunakan untuk menentukan skenario kebakaran kritis pada masing-masing ruangan. Skenario dengan nilai risiko tertinggi dipilih sebagai skenario utama yang menunjukkan potensi bahaya kebakaran paling signifikan pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penilaian risiko kebakaran dilakukan pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol yang memiliki karakteristik kebakaran yang berbeda karena jenis peralatan, sumber penyalan, dan mekanisme kegagalan yang terdapat di dalamnya tidak sama. Potensi bahaya pada ruang UPS/baterai berkaitan dengan kegagalan baterai dan sistem UPS. Potensi bahaya pada ruang panel kontrol berkaitan dengan gangguan kelistrikan pada panel, kabel, terminal, dan komponen kontrol.

Penentuan skenario kebakaran pada ruang UPS/baterai didasarkan pada dokumen desain ruangan, spesifikasi teknis baterai dan UPS, dokumen internal penilaian risiko perusahaan, hasil wawancara, serta literatur mengenai kegagalan baterai litium-ion. Skenario yang diperoleh kemudian divalidasi melalui *expert judgement* untuk memastikan kesesuaiannya dengan karakteristik peralatan dan kondisi perencanaan ruangan.

Analisis ruang UPS/baterai dilakukan berdasarkan karakteristik kegagalan baterai yang dapat memicu peningkatan temperatur, pelepasan gas, dan penjararan panas antar sel atau modul. Skenario yang dianalisis meliputi *thermal runaway with propagation*, *off-gas ignition/explosion*, *internal short circuit*, *external short circuit*, dan *overcharging/overheating*. Skenario tersebut mewakili potensi kegagalan yang berasal dari kerusakan internal sel, kondisi pengisian yang tidak normal, dan gangguan pada sistem kelistrikan pendukung. Hasil penilaian risiko kebakaran pada ruang UPS/baterai disajikan

pada Tabel 1.

Tabel 1. *Fire Risk Assessment* pada Ruang UPS/Baterai

| No. | Fire Scenario                           | Fire Hazard                                                                                                    | Property Loss<br>Consequence                                                                                         | Penilaian<br>Risiko<br>Kebakaran |   |    | Kategori<br>Risiko | Keterangan                                                                                 |
|-----|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---|----|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                                         |                                                                                                                |                                                                                                                      | L                                | C | R  |                    |                                                                                            |
| 1.  | <i>Thermal runaway with propagation</i> | Kegagalan termal pada sel baterai yang merambat ke sel lain dalam satu rack.                                   | Kerusakan menyeluruh pada baterai, UPS, kabel, dan komponen pendukung sehingga sistem tidak dapat digunakan.         | 3                                | 5 | 15 | MH                 | Skenario kritis karena propagasi panas dapat menyebabkan kerusakan aset utama secara luas. |
| 2.  | <i>Off-gas ignition/explosion</i>       | Gas mudah terbakar hasil <i>thermal runaway</i> terkumpul di ruang tertutup dan tersulut oleh sumber penyalan. | Kerusakan besar pada baterai, peralatan sekitar, kabel, dan komponen ruang akibat penyalan gas atau tekanan ledakan. | 2                                | 4 | 8  | M                  | Dipengaruhi ventilasi, konsentrasi gas, dan keberadaan sumber penyalan.                    |
| 3.  | <i>Internal short circuit</i>           | Kegagalan internal pada sel baterai, misalnya kerusakan separator yang menyebabkan korsleting dan panas lokal. | Kerusakan sebagian pada sel atau modul baterai dan berpotensi berkembang menjadi <i>thermal runaway</i> .            | 3                                | 3 | 9  | M                  | Skenario ini diposisikan sebagai pemicu awal kegagalan baterai.                            |
| 4.  | <i>External short circuit</i>           | Korsleting pada kabel, terminal, koneksi, atau sistem kelistrikan di luar sel baterai.                         | Kerusakan sebagian pada kabel, koneksi, modul, atau peralatan pendukung baterai.                                     | 3                                | 3 | 9  | M                  | Percikan atau panas dari korsleting dapat menjadi sumber penyalan awal.                    |
| 5.  | <i>Overcharging/overheating</i>         | Proses pengisian tidak normal, kegagalan kontrol                                                               | Kerusakan sebagian pada baterai atau modul                                                                           | 3                                | 3 | 9  | M                  | Dapat berkembang menjadi <i>thermal runaway</i> apabila tidak terkendali.                  |

Berdasarkan Tabel 1, skenario *thermal runaway with propagation* memperoleh nilai risiko tertinggi, yaitu 15 dengan kategori *Moderate to High* (MH). Nilai tersebut diperoleh dari nilai *likelihood* 3 dan *consequence* 5. Nilai *likelihood* menunjukkan bahwa skenario masih mungkin terjadi berdasarkan karakteristik baterai, kondisi desain ruangan, dan potensi kegagalan termal. Nilai *consequence* 5 diberikan karena propagasi panas antar sel atau modul dapat menyebabkan kerusakan menyeluruh pada baterai, UPS, kabel, serta komponen pendukung. Skenario ini ditetapkan sebagai skenario kebakaran kritis pada ruang UPS/baterai.

Hasil tersebut sesuai dengan karakteristik kegagalan baterai litium-ion yang dapat berkembang dari peningkatan temperatur menjadi *thermal runaway* dan merambat antar sel apabila panas tidak dapat dikendalikan (Kaliaperumal dkk., 2021). Kerusakan separator juga dapat memicu *internal short circuit* yang menjadi salah satu penyebab awal kegagalan termal pada baterai (Tong dan Li, 2024). Kondisi tersebut mendukung penetapan *thermal runaway with propagation* sebagai skenario dengan konsekuensi kerusakan aset paling besar.

Skenario *off-gas ignition/explosion* memperoleh nilai risiko 8 dengan kategori *Medium* (M). Nilai *likelihood* lebih rendah dibandingkan skenario lainnya, tetapi konsekuensi yang ditimbulkan tetap signifikan karena gas

hasil *thermal runaway* dapat terakumulasi dan tersulut pada ruang tertutup. Gas yang dilepaskan selama kegagalan termal dapat memiliki sifat mudah terbakar dan beracun sehingga meningkatkan potensi penyalaan atau ledakan apabila konsentrasinya mencukupi (Bugrynec dkk., 2024).

Skenario *internal short circuit*, *external short circuit*, dan *overcharging/overheating* masing-masing memperoleh nilai risiko 9 dengan kategori *Medium* (M). Ketiga skenario tersebut diposisikan sebagai pemicu awal yang dapat berkembang menjadi kegagalan lebih besar apabila tidak terdeteksi dan dikendalikan. *Internal short circuit* berkaitan dengan kegagalan di dalam sel, sedangkan *external short circuit* berasal dari gangguan pada kabel, terminal, koneksi, atau sistem kelistrikan di luar sel. *Overcharging* dan *overheating* dapat meningkatkan temperatur baterai serta mempercepat terjadinya kegagalan termal.

Penentuan skenario kebakaran pada ruang panel kontrol didasarkan pada dokumen desain instalasi listrik, spesifikasi teknis panel dan komponen kontrol, dokumen internal penilaian risiko perusahaan, hasil wawancara, serta literatur mengenai gangguan kelistrikan dan kebakaran panel. Skenario yang diperoleh kemudian divalidasi melalui *expert judgement* untuk memastikan kesesuaiannya dengan karakteristik panel, kabel, terminal, sistem proteksi, dan kondisi perencanaan ruangan.

Analisis ruang panel kontrol dilakukan berdasarkan gangguan kelistrikan yang dapat menghasilkan panas berlebih, percikan, atau busur listrik. Skenario yang dianalisis meliputi *electrical short circuit leading to panel fire*, *overload/overheating*, *loose connection/sparking*, *insulation failure/cable fire*, *circuit breaker failure*, dan *dust accumulation ignition*. Skenario tersebut mewakili potensi kegagalan pada panel listrik, kabel, terminal, sistem proteksi, dan kondisi kebersihan ruangan. Hasil penilaian risiko kebakaran pada ruang panel kontrol disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** *Fire Risk Assessment* pada Ruang Panel Kontrol

| No. | Fire Scenario                                         | Fire Hazard                                                                                                           | Property Loss Consequence                                                                                                             | Penilaian Risiko Kebakaran |   |    | Kategori Risiko | Keterangan                                                                                                        |
|-----|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---|----|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                       | L                          | C | R  |                 |                                                                                                                   |
| 1.  | <i>Electrical short circuit leading to panel fire</i> | Korsleting pada sistem kelistrikan panel yang menimbulkan arus besar, panas berlebih, percikan, dan api.              | Kerusakan besar pada panel, kabel, komponen kontrol, dan peralatan pendukung sehingga fungsi panel dapat terganggu secara signifikan. | 3                          | 4 | 12 | MH              | Skenario kritis karena korsleting dapat berkembang menjadi kebakaran panel dan menyebabkan kerusakan aset utama.. |
| 2.  | <i>Overload/overheating</i>                           | Beban listrik berlebih menyebabkan peningkatan arus dan temperatur pada komponen panel.                               | Kerusakan sebagian pada komponen panel, terminal, kabel, atau peralatan listrik akibat panas berlebih.                                | 3                          | 3 | 9  | M               | Dapat berkembang menjadi kebakaran apabila panas tidak terdeteksi dan pengendalian tidak bekerja optimal.         |
| 3.  | <i>Loose connection/sparking</i>                      | Sambungan kabel atau terminal yang tidak baik menimbulkan resistansi tinggi, panas lokal, percikan, atau <i>arc</i> . | Kerusakan lokal pada terminal, kabel, koneksi, atau komponen panel tertentu.                                                          | 3                          | 3 | 9  | M               | Umumnya berkaitan dengan kualitas pemasangan, pengencangan terminal, getaran, atau perawatan yang tidak memadai.  |
| 4.  | <i>Insulation failure/cable fire</i>                  | Kerusakan isolasi kabel menyebabkan hubungan arus tidak normal, kontak antar konduktor, atau                          | Kerusakan lokal pada kabel dan komponen panel dengan potensi penyebaran api terbatas.                                                 | 3                          | 3 | 9  | M               | Dipengaruhi oleh umur kabel, kualitas instalasi, panas berlebih, kelembapan, dan kondisi                          |

|  |  |               |  |  |  |  |             |
|--|--|---------------|--|--|--|--|-------------|
|  |  | percikan api. |  |  |  |  | lingkungan. |
|--|--|---------------|--|--|--|--|-------------|

**Tabel 2.** Lanjutan *Fire Risk Assessment* pada Ruang Panel Kontrol

| No | Fire Scenario                     | Fire Hazard                                                                                                   | Property Loss Consequence                                                                                                                     | Penilaian Risiko Kebakaran |   |   | Kategori Risiko | Keterangan                                                                                        |
|----|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---|---|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                   |                                                                                                               |                                                                                                                                               | L                          | C | R |                 |                                                                                                   |
| 5. | <i>Circuit breaker failure</i>    | Kegagalan pemutus sirkit dalam memutus arus saat terjadi <i>overload</i> atau <i>short circuit</i> .          | Kerusakan besar dapat terjadi apabila arus gangguan tidak segera terputus sehingga memperluas kerusakan pada panel atau kabel.                | 2                          | 4 | 8 | M               | Berperan sebagai faktor yang memperparah skenario <i>short circuit</i> atau <i>overload</i> .     |
| 6  | <i>Dust accumulation ignition</i> | Penumpukan debu pada panel atau sekitar komponen listrik yang terpapar panas, percikan, atau sumber penyalan. | Kerusakan ringan hingga lokal pada komponen tertentu, tetapi dapat berkembang apabila debu mudah terbakar dan kebersihan ruang tidak terjaga. | 2                          | 2 | 4 | LM              | Bergantung pada kondisi kebersihan ruangan, ventilasi, dan keberadaan sumber panas atau percikan. |

Berdasarkan Tabel 2, skenario *electrical short circuit leading to panel fire* memperoleh nilai risiko tertinggi pada ruang panel kontrol, yaitu 12 dengan kategori *Moderate to High* (MH). Nilai tersebut diperoleh dari nilai *likelihood* 3 dan *consequence* 4. Skenario ini menjadi kritis karena korsleting pada sistem kelistrikan panel dapat menghasilkan arus besar, panas berlebih, percikan, dan api yang merusak panel, kabel, komponen kontrol, serta peralatan pendukung. Kerusakan pada panel juga dapat mengganggu fungsi sistem kelistrikan dan kontrol pada fasilitas.

Gangguan listrik berupa korsleting, beban berlebih, kualitas instalasi yang tidak sesuai, dan sambungan yang tidak baik merupakan penyebab yang dapat memicu kebakaran listrik pada fasilitas industri (Ahsan dkk., 2024). Kontak listrik yang buruk dapat menghasilkan resistansi dan panas lokal yang menyebabkan kerusakan komponen serta berkembang menjadi korsleting antar fase (Zhang dkk., 2025). Hasil tersebut mendukung penetapan *electrical short circuit leading to panel fire* sebagai skenario kritis pada ruang panel kontrol.

Skenario *overload/overheating*, *loose connection/sparking*, dan *insulation failure/cable fire* masing-masing memperoleh nilai risiko 9 dengan kategori *Medium* (M). Ketiga skenario menunjukkan bahwa gangguan kelistrikan lokal tetap dapat menyebabkan kerusakan aset apabila tidak terdeteksi. Degradasi isolasi kabel akibat pengaruh termal, listrik, mekanis, dan lingkungan dapat menurunkan kemampuan isolasi serta meningkatkan kemungkinan terjadinya *partial discharge* dan *arcing* (Anghelescu dkk., 2025).

Deteksi dini diperlukan untuk mencegah gangguan listrik berkembang menjadi kebakaran panel. Sistem deteksi kebakaran listrik yang menggabungkan beberapa parameter dapat meningkatkan kemampuan dalam mengenali *fault arc* dan kondisi tidak normal pada sistem kelistrikan (Ren dkk., 2021). Penerapan sistem tersebut dapat digunakan sebagai pertimbangan pengendalian untuk skenario *short circuit*, *loose connection*, dan kerusakan isolasi kabel.

Skenario *circuit breaker failure* memperoleh nilai risiko 8 dengan kategori *Medium* (M). Kegagalan pemutus sirkit lebih berperan sebagai faktor yang memperparah skenario *short circuit* atau *overload* karena arus gangguan tidak segera diputus. Skenario *dust accumulation ignition* memperoleh nilai risiko 4 dengan kategori *Low to Moderate* (LM). Nilai tersebut menunjukkan bahwa dampaknya cenderung lokal dan dipengaruhi oleh kondisi kebersihan ruangan, ventilasi, serta keberadaan sumber panas atau percikan.

Hasil FRA menunjukkan bahwa ruang UPS/baterai memiliki nilai risiko kritis lebih tinggi dibandingkan ruang panel kontrol. Risiko tertinggi pada ruang UPS/baterai dipengaruhi oleh propagasi panas antar sel atau modul yang dapat menyebabkan kerusakan menyeluruh pada baterai dan UPS. Risiko tertinggi pada ruang panel kontrol dipengaruhi oleh korsleting yang dapat berkembang menjadi kebakaran panel. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa penilaian risiko perlu dilakukan berdasarkan karakteristik bahaya, mekanisme kegagalan, dan konsekuensi pada setiap objek. Penilaian risiko kebakaran perlu mempertimbangkan bahaya, paparan, kerentanan, dan konsekuensi secara terintegrasi agar hasilnya sesuai dengan karakteristik objek yang dianalisis.

(Chuvieco dkk., 2023). Prinsip tersebut mendukung penggunaan skenario yang berbeda pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol.

Hasil penilaian menunjukkan bahwa FRA semikuantitatif berbasis konsekuensi dapat membantu mengidentifikasi skenario kebakaran yang paling signifikan pada tahap perencanaan. Pendekatan *property loss consequence* memberikan dasar penilaian terhadap potensi kerusakan aset fisik dan peralatan yang berhubungan langsung dengan sistem kelistrikan dan operasional fasilitas. Hasil FRA dapat digunakan sebagai dasar awal untuk menentukan prioritas pengendalian dan perencanaan sistem proteksi kebakaran.

Sistem proteksi kebakaran aktif perlu direncanakan berdasarkan jenis bahaya, kondisi ruangan, dan kesesuaian peralatan proteksi dengan kebutuhan fasilitas. Evaluasi sistem proteksi aktif menunjukkan bahwa ketersediaan dan kesesuaian sarana proteksi menjadi bagian penting dalam mendukung kesiapan penanggulangan kebakaran (Nugraha dkk., 2024). Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk menentukan kebutuhan deteksi dini, pemutusan sumber listrik, pengendalian temperatur, ventilasi, dan sistem pemadaman yang sesuai pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil *Fire Risk Assessment* (FRA) semikuantitatif berbasis konsekuensi, ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol memiliki karakteristik potensi bahaya kebakaran yang berbeda. Pada ruang UPS/baterai, skenario kritis adalah *thermal runaway with propagation* dengan nilai risiko 15 dan kategori *Moderate to High* (MH). Skenario ini menjadi paling signifikan karena propagasi panas antar sel atau modul baterai dapat menyebabkan kerusakan menyeluruh pada baterai, UPS, kabel, dan komponen pendukung. Pada ruang panel kontrol, skenario kritis adalah *electrical short circuit leading to panel fire* dengan nilai risiko 12 dan kategori *Moderate to High* (MH). Skenario ini berpotensi menyebabkan kerusakan besar pada panel listrik, kabel, komponen kontrol, dan peralatan pendukung akibat arus besar, panas berlebih, percikan, dan api.

Hasil penilaian menunjukkan bahwa pendekatan *property loss consequence* dapat digunakan untuk mengidentifikasi skenario kebakaran yang paling signifikan berdasarkan potensi kerusakan aset fisik dan peralatan. Dengan demikian, FRA semikuantitatif berbasis konsekuensi dapat menjadi dasar awal dalam menentukan prioritas pengendalian risiko kebakaran pada ruang UPS/baterai dan ruang panel kontrol, khususnya pada fasilitas yang masih berada dalam tahap desain dan perencanaan.

#### 5. DAFTAR NOTASI

R = Nilai risiko kebakaran

L = Likelihood

C = Consequence

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- Ahsan, M.S., Rahman, M.K., Ahmed, M., Tanvir, F.A. and Islam, M.S., 2024. Root cause analysis of electrical faults in industry & other facility. *Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering*, 4 (2).
- Anghelescu, L., Handra, A.D. and Diaconu, B.M., 2025. Degradation pathways of electrical cable insulation: a review of aging mechanisms and fire hazards. *Fire*, 8 (10), 397. <https://doi.org/10.3390/fire8100397>
- Bugryniec, P.J., Resendiz, E.G., Nwophoke, S.M., Khanna, S., James, C. and Brown, S.F., 2024. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure: considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage*, 87, 111288. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288>
- Chuvieco, E., Yebra, M., Martino, S., Thonicke, K., Gómez-Giménez, M., San-Miguel, J., Oom, D., Velea, R., Mouillot, F., Molina, J.R., Miranda, A.I., Lopes, D., Salis, M., Bugaric, M., Sofiev, M., Kadantsev, E., Gitas, I.Z., Stavrakoudis, D., Eftychidis, G. and Viegas, D., 2023. Towards an integrated approach to wildfire risk assessment: when, where, what and how may the landscapes burn. *Fire*, 6 (5), 215.
- Kaliaperumal, M., Dharanendrakumar, M.S., Prasanna, S., Abhishek, K.V., Chidambaram, R.K., Adams, S., Zaghbi, K. and Reddy, M.V., 2021. Cause and mitigation of lithium-ion battery failure: a review. *Materials*, 14 (19), 5676.
- Kodur, V., Kumar, P. and Rafi, M.M., 2020. Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU Research Review*, 4 (1), pp.1-23.
- Li, Q., Zhou, Z., Sun, Y. and He, H., 2024. Fire risk assessment and scenario simulation for employee dormitory buildings. *Journal of Operational and Strategic Analytics*, 2 (3), pp.193-214. <https://doi.org/10.56578/josa020305>
- NFPA, 2022. *NFPA 551: Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.

- NFPA, 2023. *NFPA 855: Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Nugraha, S., Rusba, K. and Ramdan, M., 2024. Analisis sistem proteksi kebakaran aktif di Rumah Sakit Restu Ibu Balikpapan. *Identifikasi*, 10 (1), pp.189-195. <https://doi.org/10.36277/identifikasi.v10i1.339>
- Ren, X., Li, C., Ma, X., Chen, F., Wang, H., Sharma, A., Gaba, G.S. and Masud, M., 2021. Design of multi-information fusion based intelligent electrical fire detection system for green buildings. *Sustainability*, 13 (6), 3405.
- Selokar, U., Lattimer, B.Y., Salvi, U., Sahin, E., Allaf, M.A. and Duarte, J.P., 2025. Quantifying the influence of parameters on heat release rate in electrical cabinet fires. *Fire*, 8 (7), 256. <https://doi.org/10.3390/fire8070256>
- Tong, B. and Li, X., 2024. Towards separator safety of lithium-ion batteries: a review. *Materials Chemistry Frontiers*, 8, pp.309-340.
- Yao, H., Lv, K., Lou, Z., Huang, J., Zhang, Y., Zhang, Z., Wang, M. and Wei, X., 2024. Simulation study on temperature control performance of lithium-ion battery fires by fine water mist in energy storage stations. *ACS Omega*, 9 (25), pp.27104-27112. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00921>
- Zhang, J., Li, C., Su, G. and Mi, W., 2025. Case study on investigation of electrical cabinet fire caused by poor electrical contact. *Fire*, 8 (11), 412.