

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah salah satu jenis pembangkit listrik sumber energi baru terbarukan yang menggunakan energi air sebagai sumber daya utamanya, dengan mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Namun, seperti halnya infrastruktur lainnya, PLTA tidak luput dari risiko lain yang perlu dipertimbangkan, seperti risiko kebakaran. Kebakaran dalam pembangkit listrik dapat mengakibatkan perubahan signifikan terhadap lingkungan dan dampak finansial.

Kebakaran di PLTA, meskipun tidak sering terjadi, dapat menimbulkan konsekuensi yang serius. Berdasarkan Keputusan Menteri Tenaga Kerja No. KEP.186/MEN/1999, pembangkit listrik tergolong dalam tempat kerja dengan klasifikasi risiko bahaya kebakaran sedang III, karena menyimpan bahan mudah terbakar seperti oli dan pelumas, serta memiliki kompleksitas sistem kelistrikan yang rentan memicu kebakaran besar. Contohnya, insiden kebakaran di PLTA Bengkok Dago Bandung pada 2023 yang melumpuhkan pasokan listrik di sekitar area tersebut (Bayu, 2023) dan kebakaran gardu induk PLTA Detroit di Amerika Serikat (2017), PLTA Srisailam di India (2020) dan PLTA Barat Daya Cina (2020) yang menyebabkan korban jiwa, kerusakan peralatan dan gangguan operasional. Kejadian-kejadian ini menjadi dasar urgensi kesiapsiagaan dan manajemen evakuasi kebakaran yang efektif di fasilitas PLTA. Banyak faktor yang dapat menyebabkan risiko kebakaran, seperti turbin yang mengandung banyak pelumas, generator, trafo, *switchgear*, dan bahan yang mudah terbakar dapat memicu dan mempercepat penyebaran api jika tidak ditangani dengan benar.

Manajemen evakuasi kebakaran yang efektif adalah hal yang krusial untuk meminimalkan risiko cedera personel, kehilangan jiwa, kerusakan aset, dan gangguan operasional PLTA. Sistem evakuasi yang baik dapat memastikan bahwa semua personel dapat keluar dari bangunan dengan cepat dan aman dalam situasi darurat, sehingga mengurangi potensi dampak negatif kebakaran terhadap

keselamatan manusia, dan keberlanjutan pasokan listrik. Aspek kesiapsiagaan personel dan sistem evakuasi menjadi faktor kunci dalam mitigasi dampak yang mungkin timbul. Keberhasilan evakuasi sangat bergantung pada kejelasan prosedur, kesiapan fasilitas evakuasi, sistem peringatan dini, serta tingkat pelatihan dan kesadaran para pekerja terhadap bahaya. Terdapat 3 komponen penting dalam sistem evakuasi kebakaran yaitu bangunan (jalur sirkulasi), sistem pemberitahuan penghuni, dan strategi organisasi (NFPA & ARAC, 2016). Oleh karena itu, sistem manajemen keselamatan kerja harus mencakup strategi mitigasi kebakaran yang komprehensif, termasuk sistem evakuasi yang terencana dan diuji secara berkala.

Metode yang dapat digunakan untuk menganalisis tingkat keandalan dalam sistem evakuasi adalah pendekatan berbasis probabilistik, seperti *First Order Second Moment* (FOSM) untuk menghitung indeks keandalan berdasarkan nilai rata-rata dan variansi dari variabel acak dalam sistem evakuasi, serta metode *Monte Carlo Simulation* (MCS) melakukan simulasi acak berulang untuk memperkirakan distribusi probabilitas dari keberhasilan evakuasi secara lebih realistis. Kedua metode ini memungkinkan evaluasi terhadap faktor-faktor ketidakpastian dan sensitivitas dalam proses evakuasi. FOSM digunakan untuk menganalisis momen statistik dari variabel acak yang terlibat, yaitu dengan menghitung nilai rata-rata dan variansi dari rasio *Available Safe Egress Time* (ASET) terhadap *Required Safe Egress Time* (RSET) untuk memperoleh indeks keandalan (β) secara analitik dalam skenario evakuasi bangunan, sedangkan MCS digunakan untuk mensimulasikan skenario evakuasi berdasarkan distribusi probabilistik dari input variabel, seperti waktu respon, kecepatan evakuasi, dan kapasitas jalur keluar. Penelitian oleh Mao dkk., (2025) & Chen & Mao, (2018) menunjukkan efektivitas metode FOSM dan MCS dalam menganalisis keandalan evakuasi di bangunan yang relevan dengan kompleksitas struktur dan potensi bahaya di PLTA.

Unit Layanan Pembangkit Listrik Tenaga Air (ULPLTA) Koto Panjang, yang merupakan salah satu PLTA penting di Indonesia. Sebagai fasilitas pembangkit energi strategis, penting bagi ULPLTA Koto Panjang untuk memiliki sistem evakuasi yang efektif dan siap digunakan dalam kondisi darurat kebakaran, demi melindungi keselamatan pekerja dan menjamin kontinuitas operasional. ULPLTA Koto Panjang berperan vital dalam sistem interkoneksi Sumatera milik PT PLN

(Persero), dengan kapasitas pembangkitan yang signifikan untuk menopang kebutuhan listrik di wilayah Sumatera Barat dan Riau. Mengingat perannya yang strategis, gangguan operasional akibat kebakaran tidak hanya berdampak pada keselamatan jiwa, tetapi juga secara langsung memengaruhi stabilitas pasokan listrik dan perekonomian regional.

Urgensi penelitian ini adalah karena kebakaran di PLTA tidak hanya mengancam keselamatan personel, tetapi juga dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur yang vital dan mengganggu pasokan listrik ke masyarakat luas. Oleh karena itu, analisis yang komprehensif dan sistematis terhadap kesiapsiagaan evakuasi kebakaran sangat diperlukan untuk mengidentifikasi potensi kelemahan dan memberikan rekomendasi perbaikan. Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis keandalan berbasis probabilistik untuk mengevaluasi kemampuan evakuasi di ULPLTA Koto Panjang dengan memodelkan kondisi aktual fasilitas, termasuk karakteristik fisik bangunan, sistem deteksi dan peringatan kebakaran yang ada, serta karakteristik penghuni (jumlah personel, kecepatan berjalan, waktu reaksi). Analisis ini bersifat independen dan objektif, tidak terikat pada prosedur atau sistem evakuasi tertentu yang mungkin telah diterapkan, melainkan menggunakan variabel teknis dan data lapangan untuk menghitung probabilitas keberhasilan evakuasi dalam berbagai skenario kebakaran. Meskipun terdapat berbagai regulasi dan standar keselamatan kebakaran, penerapan metode *First Order Second Moment* (FOSM) dan *Monte Carlo Simulation* (MCS) secara spesifik untuk menganalisis keandalan evakuasi di PLTA Koto Panjang masih terbatas. Penelitian sebelumnya yang relevan berfokus pada bangunan secara umum, namun belum ada kajian mendalam yang mengaplikasikan pendekatan probabilistik ini untuk kondisi unik dan kompleksitas ULPLTA Koto Panjang, termasuk faktor-faktor risiko spesifik seperti keberadaan turbin, generator, dan bahan mudah terbakar dalam jumlah besar. Kesenjangan ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk evaluasi kuantitatif yang lebih detail guna meningkatkan kesiapsiagaan di fasilitas strategis ini.

1.2 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisis keandalan sistem evakuasi kebakaran di ULPLTA Koto Panjang sebagai bagian dari upaya meningkatkan kesiapsiagaan terhadap potensi keadaan darurat kebakaran.

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi faktor-faktor signifikan yang memengaruhi keberhasilan evakuasi kebakaran di ULPLTA Koto Panjang, melalui observasi langsung terhadap infrastruktur evakuasi, wawancara dengan personel kunci, serta penyebaran kuesioner kepada pekerja guna memperoleh gambaran tingkat kesiapsiagaan personel dan efektivitas sarana evakuasi yang tersedia;
2. Menilai keandalan evakuasi kebakaran ULPLTA Koto Panjang dengan metode *First Order Second Moment* (FOSM) dan *Monte Carlo Simulation* (MCS) di ULPLTA Koto Panjang;
3. Menganalisis sensitivitas variabel dalam model keandalan evakuasi untuk menentukan variabel yang paling berpengaruh terhadap probabilitas keberhasilan evakuasi.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan beberapa manfaat, di antaranya:

1. Memberikan evaluasi yang terukur dan kuantitatif mengenai tingkat kesiapsiagaan ULPLTA Koto Panjang dalam menghadapi potensi kebakaran. Evaluasi ini mencakup identifikasi kekuatan dan kelemahan dalam sistem evakuasi yang ada, yang didasarkan pada analisis data dan pemodelan probabilistik.
2. Memberikan rekomendasi kepada ULPLTA Koto Panjang untuk meningkatkan sistem manajemen evakuasi kebakaran mereka.
3. Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan teknik lingkungan di bidang manajemen keselamatan kebakaran, khususnya dalam konteks fasilitas PLTA.
4. Dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dan bagi praktisi di industri energi dalam upaya meningkatkan keselamatan dan kesiapsiagaan.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian dilakukan di area operasional dan fasilitas utama Unit Layanan Pembangkit Listrik Tenaga Air (ULPLTA) Koto Panjang. Area yang menjadi fokus mencakup ruang kontrol, area turbin, generator, dan area penyimpanan bahan mudah terbakar.
2. Penelitian mencakup dua skenario evakuasi:
 - a. Evakuasi dari Ruang Kontrol Utama, dengan fokus pada waktu deteksi, reaksi operator, dan dampak asap terhadap visibilitas.
 - b. Evakuasi dari Lantai 3 *Office*, mempertimbangkan kompleksitas tata letak, distribusi personel, dan potensi hambatan jalur evakuasi.
3. Penelitian dilaksanakan dalam jangka waktu enam bulan, mulai dari Juni hingga November 2025.
4. Penilaian keandalan evakuasi menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *First Order Second Moment (FOSM)* dan *Monte Carlo Simulation (MCS)*.
5. Analisis difokuskan pada perhitungan waktu evakuasi yang dibutuhkan (*Required Safe Egress Time/RSET*) dan waktu evakuasi yang tersedia (*Available Safe Egress Time/ASET*), serta probabilitas keberhasilan evakuasi berdasarkan variabel-variabel input seperti kepadatan hunian, kecepatan pergerakan, dan kapasitas jalur evakuasi. Variabel input yang digunakan dalam analisis FOSM dan MCS meliputi:
 - a. Waktu deteksi kebakaran (t_d)
 - b. Waktu pra-gerak/reaksi penghuni (t_p)
 - c. Waktu bergerak menuju titik aman (t_m)
 - d. Kepadatan hunian (N)
 - e. Kecepatan pergerakan personel
 - f. Kapasitas jalur evakuasi (lebar pintu keluar, kapasitas tangga)
 - g. Laju pertumbuhan kebakaran (α)

Distribusi probabilitas untuk variabel-variabel ini diasumsikan berdasarkan studi literatur dan data historis terkait evakuasi kebakaran, serta estimasi berdasarkan kondisi lapangan ULPLTA Koto Panjang.

6. Penelitian ini mempertimbangkan faktor-faktor yang secara langsung memengaruhi waktu evakuasi yaitu tata letak bangunan, lebar dan jumlah pintu keluar, kapasitas tangga, dan sistem peringatan kebakaran.
7. Data ASET (*Available Safe Egress Time*) diperoleh dari studi literatur dan standar yang relevan terkait waktu kritis akibat paparan asap dan suhu berbahaya dalam skenario kebakaran di fasilitas industri sejenis (NFPA 101, ISO 13571, atau pedoman keselamatan kebakaran yang berlaku). Variabel ASET mencakup toleransi terhadap konsentrasi asap dan suhu ambien yang membahayakan jiwa.
8. Penelitian menggunakan kuesioner dan wawancara untuk mengumpulkan data tentang pemahaman personel terhadap rute evakuasi, titik kumpul, dan tindakan yang harus diambil dalam keadaan darurat.
9. Analisis data mencakup:
 - a. Analisis statistik deskriptif untuk menggambarkan karakteristik data yang dikumpulkan melalui kuesioner.
 - b. Analisis probabilistik (FOSM dan MCS) untuk menghitung keandalan evakuasi berdasarkan variabel input dan skenario evakuasi yang berbeda.
 - c. Analisis sensitivitas variabel-variabel yang paling sensitif dalam model evakuasi.
10. Asumsi-asumsi kunci yang diterapkan dalam pemodelan FOSM dan MCS meliputi:
 - a. Jenis kebakaran yang disimulasikan adalah kebakaran pada area operasional utama (ruang turbin/generator) dengan asumsi pertumbuhan api yang realistis berdasarkan bahan bakar yang ada.
 - b. Kondisi bangunan dianggap memenuhi standar minimum keselamatan kebakaran yang berlaku, dengan integritas struktural yang memadai selama waktu evakuasi kritis.
 - c. Karakteristik penghuni diasumsikan bervariasi dalam hal kecepatan berjalan dan waktu reaksi, mencerminkan keragaman individu di lingkungan kerja.
 - d. Sistem peringatan dini (alarm) berfungsi efektif dan memberikan respons yang cepat.

- e. Jalur evakuasi diasumsikan tidak terhalang atau mengalami kerusakan signifikan yang menghambat pergerakan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir terdiri atas lima bab dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab 1 ini berisikan latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan, manfaat dan ruang lingkup penelitian serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Landasan teori yang dibahas dalam bab ini adalah membahas teori-teori yang mendukung penelitian, manajemen evakuasi, teori keandalan sistem serta metode FOSM dan MCS.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan tentang konsep penelitian, tahapan penelitian, waktu dan lokasi penelitian, analisis data dan pengolahan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan hasil penelitian serta interpretasi terhadap tingkat kesiapsiagaan PLTA Koto Panjang.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisikan kesimpulan dan saran yang dapat diberikan berdasarkan pembahasan yang telah diuraikan.

