

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Gedung dan Parameter Input

4.1.1 Umum

Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas terdiri dari 2 gedung, yaitu Gedung A dan Gedung B yang digunakan untuk mendukung kegiatan akademik, penelitian, dan administrasi. Kedua gedung tersebut memiliki tiga lantai dengan berbagai fungsi ruang, seperti ruang perkuliahan, laboratorium, ruang dosen, dan ruang administrasi. Secara umum, luas total bangunan mencapai 3.378,12 m² dengan tinggi masing-masing lantai 4 m. Bangunan tersebut juga dilengkapi tangga dengan lebar 3 m serta pintu keluar utama dengan lebar 1,5 m yang berfungsi sebagai jalur evakuasi penghuni menuju area aman saat terjadi kondisi darurat. Kapasitas setiap ruangan bervariasi, terutama pada ruang kuliah yang mampu menampung sekitar 40 mahasiswa dalam satu kelas. Kondisi ini menyebabkan tingkat okupansi gedung relatif tinggi selama kegiatan perkuliahan berlangsung. Secara keseluruhan, jumlah pengguna gedung yang terdiri atas mahasiswa, dosen, tenaga kependidikan, analis laboratorium, serta petugas kebersihan diperkirakan mencapai ratusan orang setiap harinya. Tingginya jumlah penghuni tersebut berpotensi meningkatkan kompleksitas proses evakuasi apabila terjadi keadaan darurat kebakaran.

Gedung A merupakan bangunan lama dengan tata ruang yang rentan karena hanya memiliki satu tangga utama sebagai jalur evakuasi. Keterbatasan jalur evakuasi tersebut berpotensi menimbulkan kepadatan (*bottleneck*), terutama ketika seluruh penghuni dari berbagai lantai melakukan evakuasi secara bersamaan. Selain itu, Gedung A belum dilengkapi dengan sistem sprinkler otomatis, sehingga kemampuan dalam mengendalikan perkembangan api pada tahap awal relatif terbatas dan berpotensi mempercepat tercapainya kondisi tidak aman (*untenable conditions*) bagi penghuni gedung.

Gedung B merupakan bangunan yang lebih baru dan memiliki pengaturan jalur evakuasi yang lebih baik. Gedung ini dilengkapi dengan dua tangga yang berada di bagian tengah dan ujung bangunan sehingga distribusi arus evakuasi dapat

berlangsung lebih merata. Ketersediaan lebih dari satu jalur keluar memungkinkan pengurangan kepadatan pada proses evakuasi dan membantu mempercepat pergerakan penghuni menuju tempat aman. Selain karakteristik bangunan, sarana keselamatan kebakaran juga menjadi faktor penting dalam mendukung keberhasilan evakuasi penghuni. Sarana proteksi yang tersedia meliputi alat pemadam api ringan (APAR) pada setiap lantai, sistem alarm kebakaran, jalur evakuasi dan tangga darurat, serta rambu evakuasi (*exit sign*) yang membantu mengarahkan penghuni menuju pintu keluar. Keberadaan fasilitas tersebut dapat mendukung proses deteksi dini serta meningkatkan respons penghuni terhadap kondisi darurat kebakaran. Namun demikian, hingga saat ini belum tersedia titik kumpul (*assembly point*) yang ditetapkan secara khusus di lingkungan Departemen Teknik Lingkungan, sehingga berpotensi menimbulkan ketidakteraturan penghuni setelah proses evakuasi dilakukan.

4.1.2 Nilai dan Parameter Input Model Evakuasi untuk FOSM dan MCS

Nilai variabel input digunakan dalam perhitungan probabilitas keandalan evakuasi dengan metode *First Order Second Moment* (FOSM) dan *Monte Carlo Simulation* (MCS). Berikut merupakan tabel yang menyajikan parameter dan nilai-nilai ketidakpastian yang diperoleh dari studi literatur, khususnya penelitian Mao dkk. yang dapat dilihat pada **Tabel 4.1.** (2025). Variabel ini digunakan untuk menentukan bentuk distribusi dan rentang nilai variabel acak dalam model probabilistik keandalan evakuasi kebakaran.

Tabel 4. 1 Nilai-Nilai Ketidakpastian Berdasarkan Literatur

Variabel	Bentuk Distribusi	Rentang Nilai	Nilai
Laju pertumbuhan api, α , (kW/detik ²)	Lognorm (-5.5, 1.82)	(0.01127 - 0.1878)	(0.01127 - 0.02)
Kapasitas aliran, F, (orang/detik/m)	Normal (1.3, 0.32)	(0.7- 2.2)	1,3
Kecepatan berjalan, V, (m/detik)	(0.5, 1.5)	(0.5, 1.5)	(0.7 - 1.5)

Sumber: Mao dkk (2025)

Nilai-nilai lainnya didapatkan dari hasil observasi lapangan dan perhitungan pada lokasi studi. Nilai-nilai ketidakpastian ini digunakan sebagai dasar input dalam analisis keandalan evakuasi kebakaran menggunakan metode FOSM dan MCS. Berikut merupakan nilai-nilai ketidakpastian berdasarkan hasil observasi pada **Tabel 4.2.**

Tabel 4. 2 Nilai-Nilai Ketidakpastian Berdasarkan Observasi Lapangan

Variabel	Nilai
Lebar pintu W, (m)	1,5
Tinggi langit-langit, H, (m)	4
Luas bangunan, (m ²)	3.378,12
Kepadatan penghuni, N	598
Jarak evakuasi skenario 1, Ks, (m)	25,64
Jarak evakuasi skenario 2, Ks, (m)	64,91
Jarak evakuasi skenario 3, Ks, (m)	115,18

4.2 Hasil Kuesioner Departemen Teknik Lingkungan

Dalam proses pengumpulan data, sebanyak 240 kuesioner telah diisi oleh responden yang terdiri atas mahasiswa, dosen, tenaga kependidikan, *cleaning service*, dan analis di DTL FT-Unand. Seluruh data kuesioner yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan program SPSS untuk melakukan uji validitas dan reliabilitas instrumen penelitian. Tahapan ini dilakukan guna memastikan bahwa instrumen yang digunakan mampu menghasilkan data yang valid dan konsisten sehingga layak digunakan dalam proses analisis penelitian.

4.2.1 Uji Validitas dan Reliabilitas

Uji validitas dan reliabilitas digunakan sebagai langkah untuk menjamin akurasi dan konsistensi alat ukur penelitian. Peneliti melaksanakan pengujian validitas dan reliabilitas terhadap 240 responden. Proses validasi diterapkan pada 22 butir pertanyaan yang tersebar dalam 5 kategori yang berbeda.

Hasil data terhadap pertanyaan kuesioner menunjukkan bahwa analisis signifikansi untuk semua item pertanyaan yang ada menunjukkan bahwa nilai sig. $< 0,05$ dan r hitung $> 0,113$, sehingga dapat disimpulkan bahwa masing-masing item pertanyaan valid yang dapat dilihat pada **Lampiran C**. Reliabilitas kuesioner mengacu pada konsistensi jawaban responden terhadap pertanyaan yang sama dari waktu ke waktu atau dalam kondisi yang serupa. Kuesioner dikatakan reliabel jika menghasilkan hasil pengukuran yang stabil dan konsisten. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kuesioner yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas yang baik, sehingga layak digunakan sebagai alat ukur dalam pengumpulan data. Hasil ini juga menunjukkan bahwa setiap butir pertanyaan mampu mengukur aspek yang diteliti secara tepat serta memberikan hasil yang dapat dipercaya untuk mendukung analisis penelitian. Hasil data terhadap pertanyaan yang sudah diuji validitasnya menunjukkan bahwa nilai *alpha*

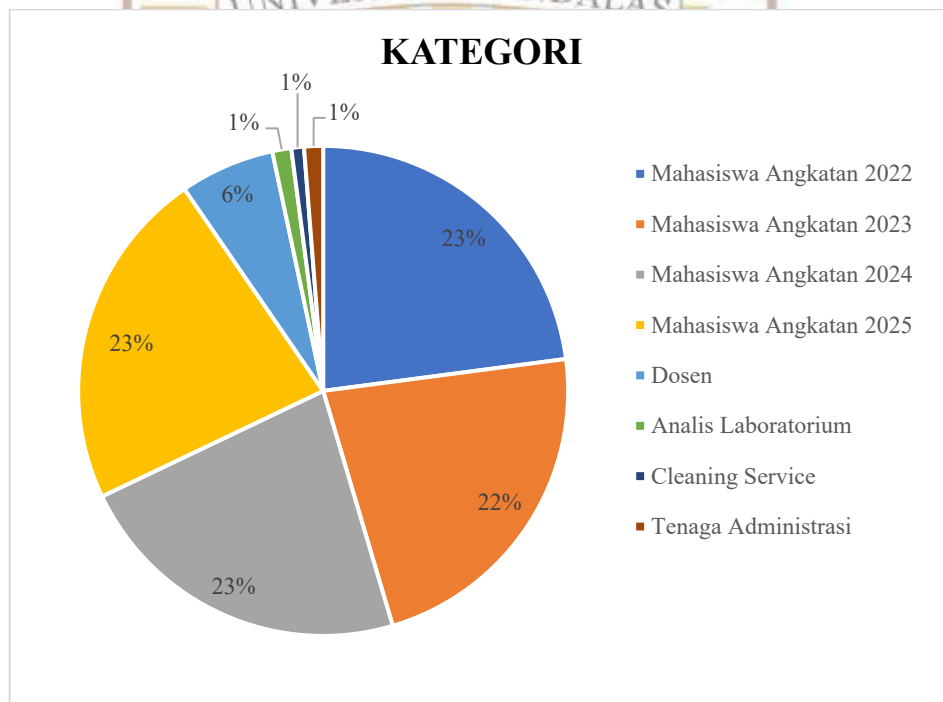
Cronbach ($>0,60$), sehingga dapat disimpulkan bahwa kuesioner yang digunakan reliabel dan layak digunakan.

4.2.2 Profil Demografi Responden dan Hasil Kuesioner Perilaku Evakuasi

Berikut merupakan hasil kuesioner tentang pengetahuan prosedur evakuasi yang disebarakan di DTL-FT Unand.

a. Kategori

Hasil kuesioner berdasarkan jabatan dapat dilihat pada **Gambar 4.1**

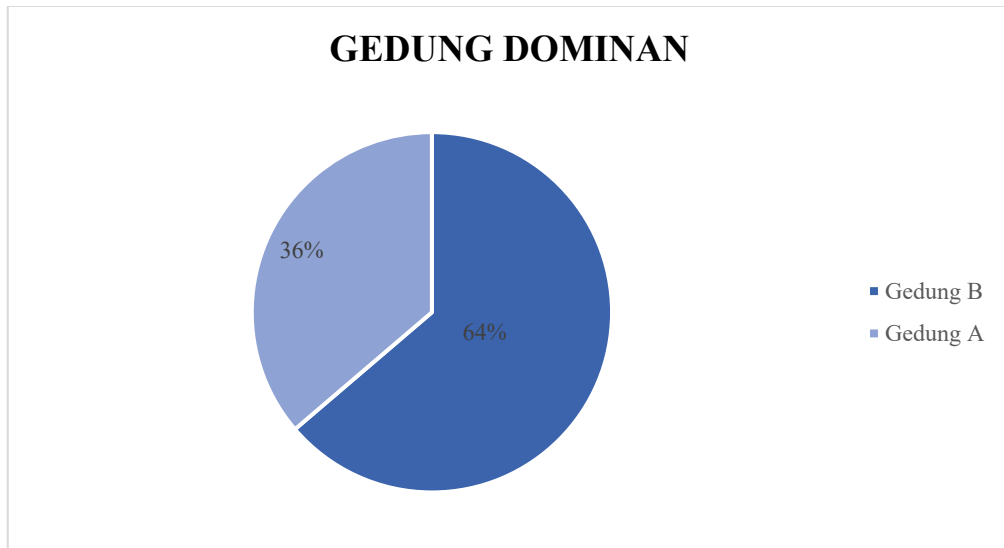


Gambar 4. 1 Hasil Kuesioner Berdasarkan Jabatan

Berdasarkan **Gambar 4.1**, responden didominasi oleh mahasiswa (angkatan 2022–2025) dengan total proporsi 91%, dosen sebesar 6%, serta analis laboratorium, *cleaning service*, dan tenaga administrasi dengan proporsi total sekitar 3%. Distribusi ini mencerminkan populasi gedung yang didominasi oleh mahasiswa yang berusia muda. Kondisi tersebut sejalan dengan fungsi utama gedung sebagai sarana pendidikan yang setiap harinya digunakan oleh mahasiswa dalam jumlah besar.

b. Gedung dan Lantai Dominan

Hasil kuesioner berdasarkan Gedung dan Lantai Dominan yang ditempati oleh penghuni DTL-FT Unand dapat dilihat pada **Gambar 4.2 dan 4.3**



Gambar 4. 2 Hasil Kuesioner Berdasarkan Gedung Aktivitas Dominan



Gambar 4. 3 Hasil Kuesioner Berdasarkan Lantai Aktivitas Dominan

Berdasarkan **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.3**, sebanyak 64% responden beraktivitas di Gedung B dan 72% terpusat di Lantai 2. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar penghuni berada pada lantai menengah, sehingga berpotensi memengaruhi kelancaran pergerakan penghuni saat proses evakuasi berlangsung. Berdasarkan observasi lapangan, tingginya aktivitas pada Gedung B dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti ketersediaan ruang perkuliahan yang lebih banyak, serta adanya kegiatan administrasi dan praktikum yang terpusat pada gedung tersebut. Kondisi ini menyebabkan konsentrasi penghuni lebih terpusat pada Gedung B, sehingga berpotensi meningkatkan kepadatan pada jalur evakuasi saat kondisi darurat. Di sisi lain, meskipun Gedung A memiliki proporsi aktivitas yang lebih rendah, potensi

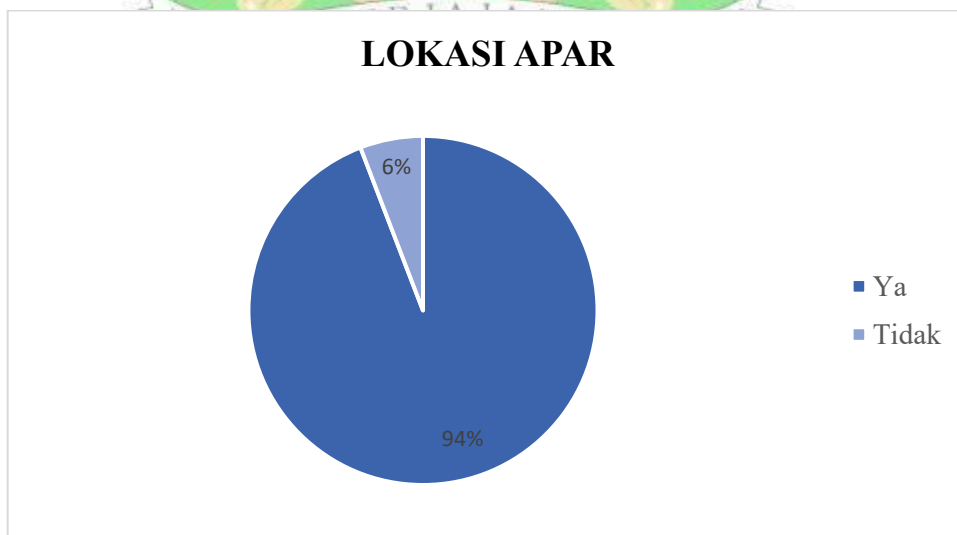
risiko evakuasi tetap signifikan, terutama akibat keterbatasan sarana evakuasi, seperti jumlah tangga yang terbatas dan tidak adanya sprinkler pada Gedung A.

c. Pengetahuan Lokasi Tangga dan APAR

Pengetahuan penghuni mengenai lokasi tangga evakuasi dan Alat Pemadam Api Ringan merupakan salah satu aspek penting dalam kesiapsiagaan menghadapi keadaan darurat kebakaran. Hasil kuesioner mengenai pengetahuan responden terhadap lokasi tangga evakuasi dan APAR di DTL FT-Unand disajikan pada **Gambar 4.4** dan **Gambar 4.5**.



Gambar 4. 4 Hasil Kuesioner Berdasarkan Pengetahuan Lokasi Tangga



Gambar 4. 5 Hasil Kuesioner Berdasarkan Pengetahuan Lokasi APAR

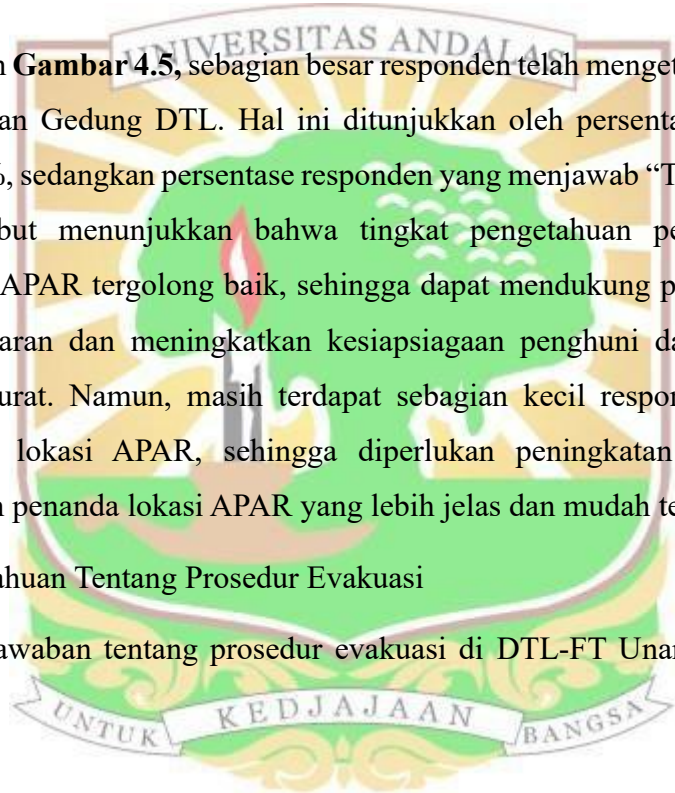
Berdasarkan **Gambar 4.4**, sebagian besar responden menyatakan mengetahui lokasi tangga dengan persentase sebesar 89%, sedangkan 11% responden

menyatakan tidak mengetahui. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat pengetahuan penghuni terhadap lokasi tangga tergolong tinggi. Tingkat pengetahuan yang tinggi ini dapat mendukung proses evakuasi, karena penghuni cenderung lebih cepat dalam menentukan arah pergerakan menuju jalur keluar saat kondisi darurat. Pengetahuan yang baik terhadap lokasi tangga berkontribusi dalam mengurangi waktu respons (*pre-movement time*), sehingga dapat mempercepat keseluruhan proses evakuasi

Berdasarkan **Gambar 4.5**, sebagian besar responden telah mengetahui lokasi APAR di lingkungan Gedung DTL. Hal ini ditunjukkan oleh persentase jawaban “Ya” sebesar 94%, sedangkan persentase responden yang menjawab “Tidak” sebesar 6%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tingkat pengetahuan penghuni terhadap keberadaan APAR tergolong baik, sehingga dapat mendukung proses penanganan awal kebakaran dan meningkatkan kesiapsiagaan penghuni dalam menghadapi kondisi darurat. Namun, masih terdapat sebagian kecil responden yang belum mengetahui lokasi APAR, sehingga diperlukan peningkatan sosialisasi serta pemasangan penanda lokasi APAR yang lebih jelas dan mudah terlihat.

d. Pengetahuan Tentang Prosedur Evakuasi

Distribusi jawaban tentang prosedur evakuasi di DTL-FT Unand disajikan pada **Tabel 4.3**



Tabel 4.3 Distribusi Pengetahuan Tentang Prosedur Evakuasi

No	Pertanyaan	Sangat Tidak Setuju		Tidak Setuju		Netral		Setuju		Sangat Setuju	
		f	%	f	%	f	%	f	%	f	%
1	Saya mengetahui langkah-langkah yang harus dilakukan saat alarm kebakaran berbunyi.	2	1	14	6	89	37	93	39	42	18
2	Saya memahami pentingnya tetap tenang dan tidak panik saat proses evakuasi.	4	2	6	3	34	14	87	36	109	45
3	Saya tahu pihak yang harus dihubungi/dilaporkan jika melihat tanda kebakaran di DTL.	4	2	30	13	86	36	78	33	42	18
4	Saya mengetahui prosedur evakuasi khusus untuk area aktivitas saya (Lab/Ruang kelas).	2	1	27	11	90	38	84	35	37	15
5	Saya mengerti cara membantu rekan yang membutuhkan bantuan khusus saat evakuasi.	5	2	25	10	91	38	74	31	45	19

Berdasarkan **Tabel 4.3**, hasil distribusi pengetahuan mengenai prosedur evakuasi menunjukkan bahwa secara umum responden telah memiliki pemahaman yang cukup baik terkait tindakan yang perlu dilakukan pada saat terjadi keadaan darurat kebakaran. Hal tersebut dapat dilihat dari kecenderungan jawaban responden yang lebih banyak berada pada kategori setuju dan sangat setuju pada sebagian besar pernyataan yang diajukan. Pada pernyataan pertama mengenai pengetahuan responden terhadap langkah-langkah yang perlu dilakukan ketika alarm kebakaran berbunyi, sebagian besar responden memberikan jawaban setuju sebanyak 93 orang (39%) dan sangat setuju sebanyak 42 orang (18%), sedangkan 89 orang (37%) memberikan jawaban netral. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar responden telah memahami tindakan awal yang perlu dilakukan setelah menerima peringatan adanya kebakaran.

Pada pernyataan kedua terkait pemahaman mengenai pentingnya menjaga ketenangan dan menghindari kepanikan selama proses evakuasi, persentase terbesar terdapat pada kategori sangat setuju sebanyak 109 orang (45%), kemudian diikuti kategori setuju sebanyak 87 orang (36%). Kondisi ini mengindikasikan bahwa sebagian besar responden menyadari pentingnya menjaga ketenangan selama

proses evakuasi agar proses perpindahan menuju area aman dapat berlangsung lebih teratur dan risiko terjadinya kepadatan pada jalur evakuasi dapat diminimalkan. Selanjutnya, pada pernyataan ketiga mengenai pengetahuan responden tentang pihak yang harus dihubungi atau dilaporkan ketika ditemukan indikasi kebakaran di DTL, jawaban responden lebih banyak berada pada kategori netral sebanyak 86 orang (36%) dan setuju sebanyak 78 orang (33%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa masih terdapat sebagian responden yang belum memahami secara menyeluruh prosedur pelaporan kejadian darurat di lingkungan kampus.

Pada pernyataan keempat mengenai pengetahuan terkait prosedur evakuasi berdasarkan area aktivitas, seperti laboratorium maupun ruang kelas, sebagian besar responden memberikan jawaban netral sebanyak 90 orang (38%) dan setuju sebanyak 84 orang (35%). Tingginya proporsi jawaban netral menunjukkan bahwa pemahaman responden terhadap prosedur evakuasi yang bersifat spesifik pada area tertentu masih perlu ditingkatkan. Sementara itu, pada pernyataan kelima mengenai pemahaman dalam membantu rekan yang membutuhkan bantuan khusus selama proses evakuasi, kategori netral sebanyak 91 orang (38%) menjadi jawaban yang paling dominan, kemudian diikuti kategori setuju sebanyak 74 orang (31%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun sebagian responden telah memahami pentingnya membantu individu yang memerlukan bantuan khusus, pengetahuan terkait prosedur evakuasi yang bersifat inklusif masih perlu diperkuat.

Secara keseluruhan, hasil distribusi pengetahuan menunjukkan bahwa responden telah memiliki pengetahuan dasar yang cukup baik mengenai prosedur evakuasi kebakaran. Namun, masih terdapat beberapa aspek yang memerlukan peningkatan, terutama terkait prosedur pelaporan keadaan darurat, prosedur evakuasi khusus berdasarkan area aktivitas, serta penanganan penghuni yang membutuhkan bantuan khusus. Tingkat pengetahuan penghuni terhadap prosedur evakuasi dapat memengaruhi waktu pra-pergerakan pada perhitungan RSET, karena penghuni yang memiliki pemahaman yang lebih baik cenderung mampu mengambil keputusan secara lebih cepat dan memulai proses evakuasi lebih awal, sehingga dapat meningkatkan tingkat keandalan proses evakuasi secara keseluruhan (Mao et al., 2025)

e. Pemahaman Rute Evakuasi dan Titik Kumpul

Pengetahuan mengenai rute evakuasi dan titik kumpul diperlukan agar penghuni dapat melakukan evakuasi secara cepat dan terarah saat terjadi kebakaran. Hasil kuesioner mengenai pemahaman responden terhadap kedua aspek tersebut disajikan pada **Tabel 4.4**

Tabel 4. 4 Distribusi Pengetahuan Rute Evakuasi dan Titik Kumpul

No	Pertanyaan	Sangat Tidak Setuju		Tidak Setuju		Netral		Setuju		Sangat Setuju	
		f	%	f	%	f	%	f	%	f	%
1	Saya mengetahui lokasi semua rute evakuasi (tangga/pintu keluar) di gedung DTL.	4	2	19	8	69	29	85	35	63	26
2	Saya mengetahui lokasi titik kumpul (<i>Assembly Point</i>) yang telah ditentukan di Unand.	7	3	17	7	78	33	83	35	55	23
3	Saya paham bahwa tidak boleh kembali ke gedung sebelum dinyatakan aman oleh petugas.	6	3	9	4	32	13	69	29	124	52
4	Saya mengetahui lebih dari satu rute evakuasi dari posisi di mana saya sering berada.	3	1	17	7	64	27	96	40	60	25

Berdasarkan **Tabel 4.4** mengenai pemahaman responden terhadap rute evakuasi dan titik kumpul, secara umum responden menunjukkan tingkat pemahaman yang cukup baik terhadap jalur evakuasi dan prosedur keselamatan yang harus diikuti selama keadaan darurat. Hal tersebut ditunjukkan oleh dominasi jawaban responden pada kategori setuju dan sangat setuju pada sebagian besar pernyataan yang diberikan.

Pada pernyataan pertama mengenai pengetahuan responden terhadap lokasi seluruh rute evakuasi, seperti tangga, pintu keluar, dan jalur evakuasi yang tersedia di Gedung DTL FT-Unand, sebagian besar responden memberikan jawaban setuju sebanyak 85 orang (35%), diikuti sangat setuju sebanyak 63 orang (26%), sedangkan 69 orang (29%) memberikan jawaban netral. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar penghuni telah mengetahui lokasi jalur evakuasi yang tersedia di dalam gedung. Namun, masih terdapat sejumlah responden yang belum memiliki pemahaman yang sepenuhnya baik mengenai

seluruh jalur evakuasi yang tersedia. Pada pernyataan kedua mengenai pengetahuan terhadap lokasi titik kumpul (*assembly point*) yang telah ditetapkan di lingkungan DTL FT-Unand, sebagian besar responden memberikan jawaban setuju sebanyak 83 orang (35%) dan sangat setuju sebanyak 55 orang (23%), sementara 78 orang (33%) memberikan jawaban netral. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar responden telah mengetahui lokasi titik kumpul, namun masih terdapat responden yang belum sepenuhnya memahami lokasi tersebut.

Pada pernyataan ketiga mengenai pemahaman bahwa penghuni tidak diperbolehkan kembali memasuki gedung sebelum dinyatakan aman oleh petugas, persentase tertinggi berada pada kategori sangat setuju sebanyak 124 orang (52%), diikuti oleh kategori setuju sebanyak 69 orang (29%). Hal ini menunjukkan bahwa mayoritas karyawan telah menyadari risiko lanjutan yang dapat terjadi setelah kebakaran, seperti potensi api susulan atau paparan asap berbahaya. Namun demikian, pernyataan mengenai pengetahuan responden terhadap lebih dari satu jalur evakuasi dari lokasi yang sering digunakan, jawaban responden didominasi kategori setuju sebanyak 96 orang (40%), diikuti kategori sangat setuju sebanyak 60 orang (25%), sedangkan 64 orang (27%) berada pada kategori netral. Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun pemahaman responden sudah cukup baik, masih diperlukan peningkatan sosialisasi dan pelatihan terkait rute evakuasi alternatif agar penghuni memiliki pilihan jalur evakuasi yang aman apabila rute utama tidak dapat digunakan.

Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa responden memiliki pemahaman yang cukup baik mengenai rute evakuasi dan titik kumpul. Namun, pemahaman terhadap lokasi titik kumpul dan penguasaan seluruh jalur evakuasi masih perlu ditingkatkan. Pemahaman yang baik terhadap jalur evakuasi dapat membantu mempercepat proses pengambilan keputusan dan pergerakan penghuni selama evakuasi, sehingga mendukung efektivitas proses evakuasi secara keseluruhan.

f. Keterampilan Penggunaan Alat Pemadam Api Ringan (APAR)

Berdasarkan hasil kuesioner, tingkat keterampilan responden dalam penggunaan APAR menunjukkan hasil yang cukup bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa tidak

seluruh penghuni gedung memiliki kemampuan yang sama dalam mengoperasikan APAR saat terjadi kebakaran. Distribusi tingkat keterampilan responden dalam penggunaan APAR disajikan pada **Tabel 4.5**

Tabel 4. 5 Distribusi Keterampilan Penggunaan Alat Pemadam Api Ringan

No	Pertanyaan	Sangat Tidak Setuju		Tidak Setuju		Netral		Setuju		Sangat Setuju	
		f	%	f	%	f	%	f	%	f	%
1	Saya mengetahui lokasi APAR terdekat dari ruang kelas atau laboratorium.	3	1	15	6	59	25	87	36	76	32
2	Saya mengetahui perbedaan jenis APAR dan fungsinya untuk kelas api yang berbeda.	13	5	54	23	86	36	54	23	33	14
3	Saya paham cara menggunakan APAR dengan teknik PASS (<i>Pull, Aim, Squeeze, Sweep</i>).	18	8	67	28	78	33	48	20	29	12
4	Saya mampu menilai kapan api bisa dipadamkan atau kapan harus segera dievakuasi.	6	3	36	15	97	40	58	24	43	18
5	Saya pernah mencoba menggunakan APAR secara langsung dalam simulasi/pelatihan.	77	32	42	18	43	18	43	18	35	15

Berdasarkan **Tabel 4.5** pada pernyataan mengenai pengetahuan lokasi APAR terdekat dari ruang kelas atau laboratorium, sebagian besar responden memberikan jawaban setuju sebanyak 87 orang (36%) dan sangat setuju sebanyak 76 orang (32%). Hal ini menunjukkan bahwa mayoritas responden telah mengetahui keberadaan APAR di sekitar area aktivitasnya.

Namun, pada beberapa aspek keterampilan penggunaan APAR, tingkat pemahaman responden masih belum menunjukkan hasil yang optimal. Hal tersebut terlihat pada pernyataan mengenai pengetahuan tentang perbedaan jenis APAR berdasarkan klasifikasi kebakaran, pemahaman penggunaan APAR dengan teknik PASS (*Pull, Aim, Squeeze, Sweep*), serta kemampuan menentukan kondisi kapan api masih dapat dipadamkan atau kapan harus segera melakukan evakuasi. Pada ketiga pernyataan tersebut, jawaban responden didominasi oleh kategori netral masing-masing sebanyak 86 orang (36%), 78 orang (33%), dan 97 orang (40%). Tingginya persentase jawaban netral mengindikasikan bahwa sebagian responden masih belum memiliki keyakinan atau pemahaman yang memadai terkait penggunaan

APAR secara teknis. Kondisi ini dapat disebabkan oleh kurangnya paparan informasi, sosialisasi, maupun pengalaman praktik secara langsung mengenai penggunaan APAR. Oleh karena itu, diperlukan upaya peningkatan pengetahuan dan keterampilan melalui kegiatan sosialisasi keselamatan kebakaran, pemasangan media edukasi mengenai klasifikasi APAR dan prosedur penggunaannya, serta pelaksanaan pelatihan dan simulasi penggunaan APAR secara berkala agar penghuni memiliki kesiapan yang lebih baik dalam menghadapi keadaan darurat kebakaran.

Selain itu, pada pernyataan mengenai pengalaman menggunakan APAR secara langsung melalui simulasi atau pelatihan, sebagian besar responden memberikan jawaban sangat tidak setuju sebanyak 77 orang (32%). Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar responden belum memiliki pengalaman praktik penggunaan APAR secara langsung. Secara keseluruhan, responden telah memiliki pemahaman dasar mengenai keberadaan APAR, namun keterampilan teknis penggunaannya masih perlu ditingkatkan melalui pelatihan dan simulasi guna mendukung penanganan awal kebakaran secara lebih efektif.

g. Tingkat Kepercayaan Diri

Hasil kuesioner berdasarkan tingkat kepercayaan diri dapat dilihat pada **Tabel 4.6**

Tabel 4. 6 Distribusi Tingkat Kepercayaan Diri

No	Pertanyaan	Sangat Tidak Setuju		Tidak Setuju		Netral		Setuju		Sangat Setuju	
		f	%	f	%	f	%	f	%	f	%
1	Saya percaya diri mampu mengevakuasi diri sendiri dengan aman saat terjadi kebakaran.	7	3	17	7	79	33	84	35	53	22
2	Saya merasa mampu mengambil keputusan yang tepat dalam situasi darurat kebakaran.	3	1	20	8	82	34	80	33	55	23
3	Saya yakin tidak akan panik berlebihan jika mendengar alarm kebakaran berbunyi.	5	2	18	8	79	33	81	34	57	24
4	Saya yakin akan selamat jika mengikuti prosedur evakuasi yang ada di DTL Unand.	2	1	10	4	54	23	107	45	67	28

Berdasarkan **Tabel 4.6**, tingkat kepercayaan diri responden dalam menghadapi kondisi darurat kebakaran menunjukkan kecenderungan yang cukup baik. Hal ini

ditunjukkan oleh dominasi jawaban setuju dan sangat setuju pada sebagian besar pernyataan. Pada pernyataan mengenai kepercayaan diri dalam mengevakuasi diri sendiri saat terjadi kebakaran, sebagian besar responden memberikan jawaban setuju sebanyak 84 orang (35%) dan sangat setuju sebanyak 53 orang (22%). Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar responden memiliki keyakinan terhadap kemampuan diri dalam melakukan evakuasi secara mandiri.

Namun, pada beberapa aspek masih terdapat persentase jawaban netral yang cukup tinggi, seperti pada kemampuan mengambil keputusan dalam situasi darurat 82 orang (34%), keyakinan untuk tidak panik ketika alarm kebakaran berbunyi 79 orang (33%), serta keyakinan dalam melakukan evakuasi secara mandiri 79 orang (33%). Tingginya jawaban netral menunjukkan bahwa sebagian responden masih belum sepenuhnya yakin terhadap kemampuan dirinya saat menghadapi kondisi darurat. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh kurangnya pengalaman menghadapi situasi kebakaran, minimnya pelatihan kesiapsiagaan, maupun keterbatasan pemahaman mengenai prosedur evakuasi yang benar.

Pada pernyataan mengenai keyakinan akan keselamatan apabila mengikuti prosedur evakuasi yang berlaku di DTL Unand, sebagian besar responden memberikan jawaban setuju sebanyak 107 orang (45%) dan sangat setuju sebanyak 67 orang (28%). Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa responden memiliki tingkat kepercayaan diri yang cukup baik dalam menghadapi keadaan darurat. Meskipun demikian, peningkatan kepercayaan diri tetap perlu dilakukan melalui pelatihan, simulasi evakuasi secara berkala, dan sosialisasi prosedur keselamatan agar penghuni lebih siap dalam mengambil keputusan dan bertindak saat kondisi darurat terjadi.

h. Efektivitas Sosialisasi dan Pelatihan

Hasil kuesioner mengenai efektivitas sosialisasi dan pelatihan kebakaran yang pernah diterima responden disajikan pada **Tabel 4.7**

Tabel 4. 7 Distribusi Efektivitas Sosialisasi dan Pelatihan

No	Pertanyaan	Sangat Tidak Setuju		Tidak Setuju		Netral		Setuju		Sangat Setuju	
		f	%	f	%	f	%	f	%	f	%
1	Saya pernah mendapatkan informasi atau mengikuti	61	25	49	20	72	30	43	18	15	6

No	Pertanyaan	Sangat Tidak Setuju		Tidak Setuju		Netral		Setuju		Sangat Setuju	
		f	%	f	%	f	%	f	%	f	%
	simulasi kebakaran di lingkungan FT Unand.										
2	Informasi/pelatihan yang saya terima membantu saya memahami rute evakuasi DTL.	34	14	40	17	93	39	49	20	24	10
3	Informasi/pelatihan tersebut meningkatkan keterampilan saya dalam menggunakan APAR.	35	15	42	18	87	36	50	21	26	11
4	Sosialisasi mengenai keselamatan kebakaran di DTL Unand dilakukan secara berkala.	32	13	49	20	87	36	39	16	33	14

Berdasarkan **Tabel 4.7**, efektivitas sosialisasi dan pelatihan keselamatan kebakaran di lingkungan DTL FT-Unand masih menunjukkan hasil yang belum optimal. Hal ini terlihat dari tingginya persentase jawaban netral, tidak setuju, dan sangat tidak setuju pada sebagian besar pernyataan yang diberikan. Pada pernyataan mengenai pengalaman memperoleh informasi atau mengikuti simulasi kebakaran, sebagian besar responden memberikan jawaban netral sebanyak 72 orang (30%), sedangkan jawaban sangat tidak setuju mencapai 61 orang (25%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa masih banyak responden yang belum pernah mengikuti sosialisasi atau simulasi kebakaran secara langsung.

Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa pelaksanaan sosialisasi dan pelatihan keselamatan kebakaran di DTL FT-Unand masih perlu ditingkatkan. Kurangnya pelatihan dan simulasi secara berkala dapat memengaruhi kesiapsiagaan penghuni dalam menghadapi kondisi darurat kebakaran, terutama pada aspek pemahaman rute evakuasi, penggunaan APAR, dan kecepatan pengambilan keputusan saat evakuasi berlangsung, sehingga diperlukan program sosialisasi dan simulasi evakuasi yang dilakukan secara rutin agar tingkat kesiapsiagaan dan kepercayaan diri penghuni dalam menghadapi keadaan darurat dapat meningkat.

4.3 Hasil Perhitungan ASET dan RSET

4.3.1 Perhitungan ASET

Nilai yang diperoleh pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2** digunakan sebagai dasar untuk menghitung serta membandingkan ASET dan RSET. Perbandingan antara kedua

parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan proses evakuasi pada skenario yang dianalisis. Sebagai contoh, perhitungan ASET pada Gedung DTL FT-Unand dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$t_a = 1,67 \alpha^{-0,26} H^{0,44} A^{0,54}$$

$$t_a = 1,67 \times 0,02^{-0,26} \times 4^{0,44} \times 3.378,12^{0,54}$$

$$t_a = 735 \text{ detik}$$

Dengan:

Laju pertumbuhan api sebesar $\alpha = 0,02$ (kW/detik²)

Tinggi langit-langit $H = 4$ m

Luas bangunan $A = 3.378,12$ m²

Dari perhitungan diperoleh nilai t_a sebesar 735 detik atau sama dengan 12,25 menit. Nilai tersebut menunjukkan waktu maksimum yang tersedia sebelum kondisi bangunan mencapai batas yang dapat membahayakan keselamatan penghuni akibat kebakaran. Selanjutnya, evaluasi kesiapsiagaan evakuasi dilakukan menggunakan fungsi batas keadaan (*limit state function*), yaitu dengan membandingkan nilai ASET dan RSET. Apabila nilai ASET lebih besar dibandingkan dengan nilai RSET, maka proses evakuasi dapat dinyatakan aman dan memiliki tingkat keandalan yang baik. Sebaliknya, apabila nilai ASET lebih kecil daripada RSET, maka proses evakuasi berpotensi mengalami kegagalan karena waktu yang tersedia tidak mencukupi untuk menyelesaikan proses evakuasi penghuni. Nilai rata-rata dan standar deviasi disajikan dalam Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Nilai Rata-Rata dan Standar Deviasi ASET

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
μ ASET	735	detik	Rata-rata waktu tersedia
σ ASET	36	detik	Standar deviasi waktu tersedia

4.3.2 Distribusi Komponen Waktu RSET Per Skenario

Analisis keandalan menggunakan metode FOSM dan MCS memerlukan sejumlah variabel acak yang memengaruhi durasi proses evakuasi. Variabel tersebut digunakan sebagai parameter input dalam analisis probabilistik untuk merepresentasikan ketidakpastian yang dapat terjadi selama proses evakuasi. Masing-masing parameter, seperti waktu deteksi (t_d), waktu pra-gerak (t_p), dan waktu gerak (t_m) dianalisis untuk memperoleh nilai rata-rata dan standar deviasi.

Nilai rata-rata dan standar deviasi dari setiap parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan menggunakan metode FOSM, karena metode ini memanfaatkan karakteristik statistik variabel input untuk menentukan tingkat keandalan sistem evakuasi pada setiap skenario yang dianalisis. Nilai keandalan evakuasi pada masing-masing skenario terdapat pada **Tabel 4.9**, **Tabel 4.10**, dan **Tabel 4.11**

Tabel 4. 9 Nilai Keandalan Evakuasi Skenario 1 Laboratorium Air

Parameter (detik)	μ (rata-rata)	σ (standar deviasi)
Waktu deteksi t_d	68	14
Waktu pra pergerakan t_p	70	20
Waktu bergerak t_m	332	6
Total Waktu RSET	470	40

Tabel 4. 10 Nilai Keandalan Evakuasi Skenario 2 Laboratorium Mikrobiologi

Parameter (detik)	μ (rata-rata)	σ (standar deviasi)
Waktu deteksi t_d	68	14
Waktu sebelum pergerakan t_p	70	20
Waktu bergerak t_m	370	14
Total Waktu Respon RSET	508	48

Tabel 4. 11 Nilai Keandalan Evakuasi Skenario 3 Laboratorium Komputer

Parameter (detik)	μ (rata-rata)	σ (standar deviasi)
Waktu deteksi t_d	68	14
Waktu sebelum pergerakan t_p	70	20
Waktu bergerak t_m	419	26
Total Waktu Respon RSET	557	60

Tabel 4.9, **4.10** dan **4.11** merupakan nilai rata-rata (μ) dan simpangan baku (σ) dari setiap komponen waktu yang membentuk RSET pada tiga skenario evakuasi, yaitu skenario 1, skenario 2, dan skenario 3. Total waktu respons atau RSET pada skenario 1 sebesar 470 detik, sedangkan waktu RSET untuk skenario 2 adalah 508 detik, dan skenario 3 sebesar 557 detik. Hal ini menunjukkan bahwa kompleksitas jalur dan ketinggian lantai berpengaruh terhadap durasi evakuasi total, yang kemudian dibandingkan dengan nilai ASET untuk menilai tingkat keandalan evakuasi pada masing-masing skenario.

4.4 Analisis Probabilitas Keandalan (FOSM vs MCS)

4.4.1 Hasil Pendekatan Analisis Metode FOSM

Hasil perhitungan menggunakan metode FOSM pada ketiga skenario evakuasi ditampilkan pada **Tabel 4.12**

Tabel 4. 12 Hasil Perhitungan FOSM Analisis Keandalan Tiga Skenario

Skenario	μG (detik)	σG (detik)	Indeks Keandalan (β)	Probabilitas Kegagalan (Pf)	Probabilitas Keberhasilan (Pr)
1	266	54	4,932	0	100%
2	228	61	3,756	0	100%
3	179	70	2,559	0,5%	99,5%

Berdasarkan **Tabel 4.12**, hasil analisis FOSM menunjukkan bahwa skenario 1 memiliki nilai $\mu G = 266$ detik, $\sigma G = 54$ detik, dengan menghasilkan indeks keandalan $\beta = 4,932$ dan probabilitas keberhasilan 100% ($P_f = 0\%$). Selanjutnya, skenario 2 menunjukkan nilai $\mu G = 228$ detik, $\sigma G = 61$ detik, $\beta = 3,756$ dan probabilitas keberhasilan 100% ($P_f = 0\%$). Selanjutnya, skenario 3 memiliki nilai yang menurun, yaitu dengan nilai $\mu G = 179$ detik, $\sigma G = 70$ detik, indeks keandalan $\beta = 2,559$, dan probabilitas keberhasilan 99,5% ($P_f = 0,5\%$). Ketiga skenario berada dalam Reliability Zone karena $\beta > 1,0$. Namun, skenario 1 dan 2 lebih optimal karena memiliki margin waktu evakuasi yang lebih besar dengan variabilitas yang lebih kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai β (lebih dari 2.0), semakin rendah probabilitas kegagalan dan semakin aman sistem evakuasi, sesuai dengan yang digambarkan pada kurva distribusi (**Gambar 2.3**) di mana area di zona keandalan meningkat seiring dengan pergeseran nilai γ ke kanan. Ketiga skenario menunjukkan bahwa sistem evakuasi yang dirancang memiliki tingkat keandalan yang dapat diterima, dengan probabilitas keberhasilan di atas 95%.

4.4.2 Hasil Pendekatan MCS

Metode ini dilakukan melalui pengulangan simulasi sebanyak 1.000.000 percobaan untuk masing-masing skenario, sehingga mampu merepresentasikan variasi kondisi nyata yang mungkin terjadi selama proses evakuasi. Hasil simulasi Monte Carlo untuk skenario 1, skenario 2, dan skenario 3 disajikan pada **Tabel 4.13**

Tabel 4. 13 Hasil Simulasi Monte Carlo

Skenario	Jumlah Simulasi	Berhasil	Gagal	Probabilitas Kegagalan	Probabilitas Keberhasilan
1	1.000.000	1.000.000	0	0%	100%
2	1.000.000	1.000.000	0	0%	100%
3	1.000.000	999949	51	0,0051%	99,9949%

Berdasarkan **Tabel 4.13**, hasil MCS menunjukkan adanya perbedaan tingkat keandalan pada masing-masing skenario evakuasi yang dianalisis. Tingkat keandalan sistem evakuasi dapat diinterpretasikan menggunakan indeks keandalan (γ), yang diperoleh dari perbandingan antara waktu aman yang tersedia (ASET)

dengan waktu yang dibutuhkan penghuni untuk menyelesaikan evakuasi (RSET). Nilai indeks keandalan digunakan untuk menilai tingkat keamanan sistem evakuasi, di mana $\gamma > 1$ menunjukkan kondisi aman, karena waktu yang tersedia masih lebih besar dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi. Sementara itu, $\gamma = 1$ menunjukkan kondisi kritis dan $\gamma < 1$ menunjukkan adanya potensi kegagalan evakuasi.

Pada skenario 1, dari total 1.000.000 simulasi yang dilakukan, seluruh simulasi menunjukkan kondisi berhasil tanpa ditemukannya kejadian kegagalan. Hasil tersebut menghasilkan probabilitas keberhasilan sebesar 100% dan probabilitas kegagalan sebesar 0%. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem evakuasi pada skenario 1 memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi serta mampu mempertahankan kondisi aman pada seluruh variasi simulasi yang dilakukan. Dengan probabilitas kegagalan yang tidak ditemukan, kondisi tersebut mengindikasikan bahwa nilai γ berada di atas batas aman ($\gamma > 1$), sehingga sistem evakuasi memiliki margin keselamatan yang baik.

Pada skenario 2 didapatkan hasil yang sama dengan skenario 1. Dari 1.000.000 simulasi, seluruh simulasi berhasil memenuhi kondisi evakuasi aman tanpa adanya kegagalan. Dengan demikian, probabilitas keberhasilan pada skenario ini mencapai 100%, sedangkan probabilitas kegagalannya sebesar 0%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa skenario 2 juga memiliki performa sistem evakuasi yang sangat baik dan mampu mempertahankan tingkat keselamatan yang tinggi pada berbagai kondisi simulasi. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai γ pada skenario 2 juga berada pada kondisi aman ($\gamma > 1$). Berbeda dengan skenario 1 dan 2, skenario 3 menunjukkan adanya sejumlah kecil kejadian kegagalan selama proses simulasi. Dari total 1.000.000 simulasi, sebanyak 999.949 simulasi dinyatakan berhasil, sedangkan 51 simulasi mengalami kegagalan. Hasil tersebut menghasilkan probabilitas keberhasilan sebesar 99,99% dan probabilitas kegagalan sebesar 0,0051%. Meskipun nilai probabilitas kegagalan yang diperoleh masih tergolong sangat kecil, hasil ini menunjukkan bahwa pada skenario 3 masih terdapat kemungkinan terjadinya kondisi evakuasi yang tidak memenuhi batas keselamatan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sistem pada skenario 3 lebih sensitif

terhadap perubahan parameter input dibandingkan skenario lainnya, meskipun secara umum nilai γ masih menunjukkan kondisi aman ($\gamma > 1$).

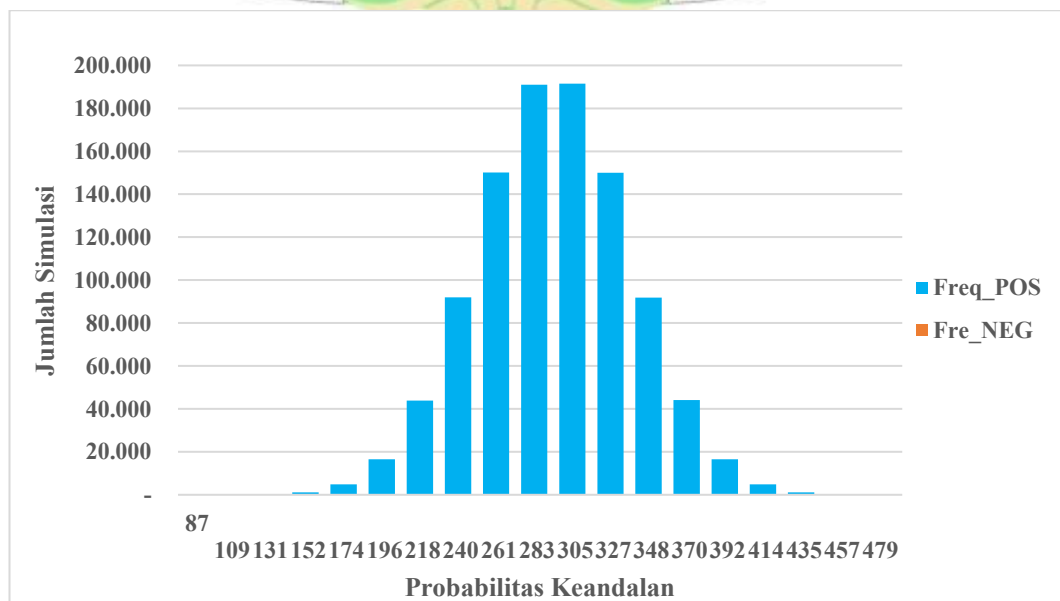
Perbedaan hasil pada ketiga skenario menunjukkan bahwa skenario 1 dan skenario 2 memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan skenario 3. Hal tersebut dilihat dari tidak ditemukannya kasus kegagalan selama proses simulasi pada kedua skenario tersebut. Secara keseluruhan, hasil simulasi *Monte Carlo* menunjukkan bahwa seluruh skenario yang dianalisis memiliki tingkat keandalan yang tinggi dengan probabilitas keberhasilan mendekati 100%.

4.4.3 Analisis Distribusi Hasil Simulasi Metode *Monte Carlo Simulation*

Simulasi Monte Carlo dengan 1.000.000 iterasi telah dilakukan untuk menganalisis distribusi probabilitas keberhasilan evakuasi di DTL FT-Unand. Hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk histogram yang menampilkan sebaran nilai margin keselamatan ($G = ASET - RSET$) untuk memahami pola distribusi dan probabilitas keberhasilan evakuasi secara lebih komprehensif.

4.4.3.1 Karakteristik Distribusi Skenario 1

Analisis karakteristik distribusi pada Skenario 1 dilakukan untuk mengetahui pola penyebaran hasil simulasi Monte Carlo serta kecenderungan nilai probabilitas keandalan yang diperoleh. Sebaran frekuensi hasil simulasi tersebut ditampilkan dalam bentuk histogram pada **Gambar 4.6**:

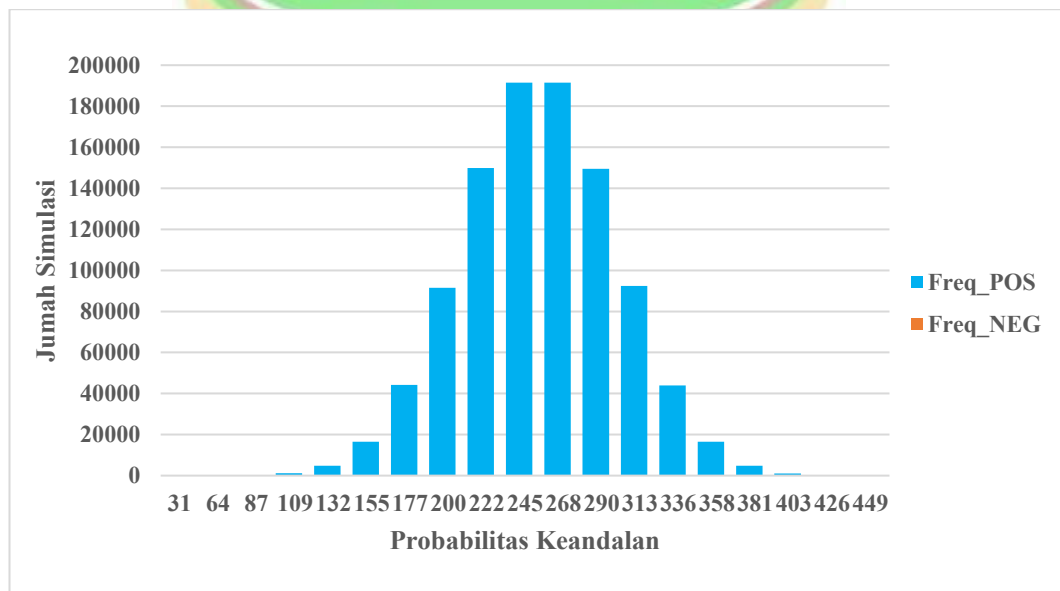


Gambar 4. 6 Histogram Distribusi Hasil Simulasi Monte Carlo Skenario 1

Histogram pada **Gambar 4.6** menunjukkan karakteristik distribusi margin keselamatan evakuasi ($G = ASET - RSET$) pada skenario 1 berdasarkan hasil simulasi Monte Carlo. Distribusi seluruh hasil simulasi berada pada nilai margin keselamatan positif, yang menunjukkan bahwa seluruh proses evakuasi pada skenario ini berhasil dilakukan sebelum kondisi lingkungan mencapai batas tidak aman. Dengan kata lain, nilai ASET pada seluruh simulasi tetap lebih besar dibandingkan nilai RSET, sehingga tidak ditemukan kondisi kegagalan evakuasi. Pada hasil perhitungan, tidak ditemukannya margin keselamatan negatif pada histogram, yang menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan (P_f) pada skenario 1 bernilai 0%, sedangkan probabilitas keberhasilan evakuasi mencapai 100%. Kondisi ini menandakan bahwa sistem evakuasi pada skenario 1 memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi dan mampu memberikan waktu evakuasi yang memadai bagi seluruh penghuni gedung dalam seluruh iterasi simulasi Monte Carlo yang dilakukan.

4.4.3.2 Karakteristik Distribusi Skenario 2

Hasil distribusi probabilitas keandalan pada skenario 2 dapat dilihat pada **Gambar 4.7**



Gambar 4. 7 Histogram Distribusi Hasil Simulasi Monte Carlo Skenario 2

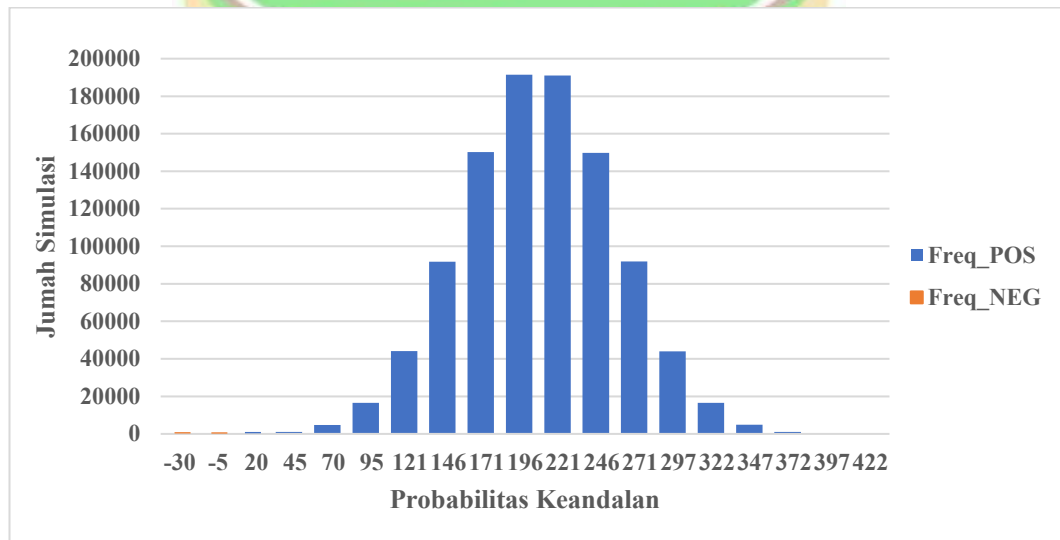
Histogram pada **Gambar 4.7** menunjukkan bahwa hasil simulasi memperlihatkan bahwa seluruh nilai margin keselamatan berada pada kondisi positif, yang menunjukkan nilai $ASET > RSET$. Dengan demikian, seluruh proses evakuasi pada

skenario 2 dapat berlangsung dengan aman pada setiap iterasi simulasi. Hasil simulasi cenderung stabil dan tidak menunjukkan variasi yang terlalu ekstrem antarsimulasi. Pola distribusi yang menyerupai kurva lonceng menunjukkan bahwa variasi parameter evakuasi, seperti waktu pra-pergerakan dan waktu pergerakan penghuni, masih berada dalam kondisi yang terkendali sehingga tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap keberhasilan evakuasi.

Selain itu, tidak ditemukan adanya margin keselamatan negatif. Hal ini menunjukkan bahwa pada skenario 2 tidak terjadi kegagalan evakuasi, sehingga probabilitas kegagalan (P_f) diperoleh sebesar 0%, sedangkan probabilitas keberhasilan evakuasi mencapai 100%. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem evakuasi pada skenario 2 memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi dan mampu memberikan waktu evakuasi yang memadai bagi seluruh penghuni gedung dalam kondisi kebakaran.

4.4.3.3 Karakteristik Distribusi Skenario 3

Hasil distribusi probabilitas keandalan pada skenario 3 dapat disajikan pada **Gambar 4.8**



Gambar 4. 8 Histogram Distribusi Hasil Simulasi Monte Carlo Skenario 3

Histogram pada **Gambar 4.8** menunjukkan karakteristik distribusi margin keselamatan evakuasi ($G = ASET - RSET$) untuk skenario 3 berdasarkan hasil simulasi Monte Carlo. Distribusi didominasi oleh nilai margin keselamatan positif, yang menandakan bahwa sebagian besar hasil simulasi berada pada kondisi

evakuasi berhasil. Konsentrasi frekuensi tertinggi berada di sekitar nilai tengah distribusi, yang mengindikasikan bahwa waktu evakuasi pada skenario 3 relatif konsisten dan tidak menunjukkan penyimpangan ekstrem. Pada histogram masih terlihat keberadaan frekuensi margin keselamatan negatif dalam jumlah terbatas, yang merepresentasikan kondisi kegagalan evakuasi. Keberadaan nilai negatif ini selaras dengan hasil probabilitas kegagalan skenario 3 sebesar 0,0051%, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.13**. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sistem evakuasi pada skenario 3 memiliki tingkat keberhasilan yang tinggi, masih terdapat kemungkinan terjadinya keterlambatan evakuasi akibat variabilitas waktu respons dan proses perpindahan penghuni. Oleh karena itu, hasil distribusi ini menegaskan bahwa skenario 3 tergolong andal, namun masih memiliki ruang untuk peningkatan guna menekan peluang kegagalan evakuasi lebih optimal.

Secara keseluruhan, berdasarkan analisis histogram dan karakteristik distribusi hasil simulasi Monte Carlo, skenario 1 dan 2 menunjukkan tingkat keandalan evakuasi yang lebih tinggi dan stabil dibandingkan dengan skenario 3. Perbedaan performa ini bukan disebabkan oleh perbedaan sistem evakuasi, melainkan oleh perbedaan karakteristik lokasi evakuasi yang memengaruhi waktu tempuh, kondisi jalur, dan dinamika pergerakan saat evakuasi. Dengan margin keselamatan yang cenderung lebih besar dan variabilitas yang lebih rendah, kondisi evakuasi pada lokasi skenario 1 memberikan peluang keberhasilan evakuasi yang sangat baik. Oleh karena itu, hasil ini menegaskan bahwa karakteristik lokasi memiliki peran penting dalam menentukan keandalan proses evakuasi kebakaran di DTL-FT Unand.

4.4.3.4 Perbandingan Ketiga Skenario

Perbandingan ketiga skenario dilakukan untuk mengetahui perbedaan tingkat keandalan evakuasi pada masing-masing kondisi kebakaran yang telah disimulasikan. Hasil perbandingan nilai indeks keandalan (β) probabilitas keberhasilan (Pr) pada setiap skenario dapat dilihat pada **Tabel 4.14**

Tabel 4. 14 Perbandingan Ketiga Skenario

Parameter	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
β (FOSM)	4,932	3,756	2,559
Pr (FOSM)	100%	100%	99,5%
Pr (MCS)	100%	100%	99,99%

Berdasarkan **Tabel 4.14**, ketiga skenario evakuasi menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi dengan nilai indeks keandalan (β) berada di atas 1,9 dan probabilitas keberhasilan (P_r) melebihi 95%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem evakuasi pada seluruh skenario masih berada pada kondisi aman dan memiliki performa yang baik terhadap potensi kegagalan evakuasi. Skenario 1 memiliki nilai β tertinggi sebesar 4,932 dengan probabilitas keberhasilan mencapai 100%, sehingga menunjukkan tingkat keandalan yang paling baik dibandingkan skenario lainnya. Sementara itu, skenario 2 juga menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi dengan nilai β sebesar 3,756 dan probabilitas keberhasilan sebesar 100%. Adapun pada skenario 3 diperoleh nilai β sebesar 2,559 dengan probabilitas keberhasilan sebesar 99,5% berdasarkan metode FOSM dan 99,99% berdasarkan simulasi Monte Carlo. Meskipun nilai tersebut masih menunjukkan kondisi aman, skenario 3 memiliki margin keselamatan yang lebih rendah dibandingkan dengan dua skenario lainnya.

Perbedaan tingkat keandalan pada ketiga skenario dipengaruhi oleh variasi parameter evakuasi, seperti jarak tempuh evakuasi, waktu pragerak penghuni, serta ketidakpastian waktu pergerakan selama proses evakuasi berlangsung. Semakin besar variasi parameter yang terjadi, semakin kecil margin keselamatan yang diperoleh. Oleh karena itu, meskipun seluruh skenario telah memenuhi kriteria aman, skenario dengan nilai indeks keandalan yang lebih rendah tetap memerlukan perhatian lebih terhadap pengelolaan jalur evakuasi, peningkatan kesiapsiagaan penghuni, serta pelaksanaan simulasi evakuasi secara berkala guna meningkatkan keandalan sistem evakuasi kebakaran di Gedung DTL FT-Unand.

4.5 Analisis Sensitivitas

4.5.1 Analisis Sensitivitas Komponen Waktu Pada Metode FOSM

Untuk mengidentifikasi komponen waktu yang paling berpengaruh terhadap kesiapsiagaan evakuasi, dilakukan analisis berdasarkan kontribusi varians yang disajikan dalam **Tabel 4.15**, **Tabel 4.16**, dan **Tabel 4.17**

Tabel 4. 15 Analisis Sensitivitas Komponen Waktu Metode FOSM Skenario 1

Komponen	σ (Standar deviasi)	Kontribusi Varians (%)	Prioritas perbaikan
Waktu Sebelum Pergerakan t_p	20	50	1

Komponen	σ (Standar deviasi)	Kontribusi Varians (%)	Prioritas perbaikan
Waktu Deteksi t_d	14	35	2
Waktu Bergerak t_m	6	15	3

Tabel 4. 16 Analisis Sensitivitas Komponen Waktu Metode FOSM Skenario 2

Komponen	σ (Standar deviasi)	Kontribusi Varians (%)	Prioritas perbaikan
Waktu Sebelum Pergerakan t_p	20	42	1
Waktu Bergerak t_m	14	29	2
Waktu Deteksi t_d	14	29	3

Tabel 4. 17 Analisis Sensitivitas Komponen Waktu Metode FOSM Skenario 3

Komponen	σ (Standar deviasi)	Kontribusi Varians (%)	Prioritas perbaikan
Waktu Bergerak t_m	26	43	1
Waktu Sebelum Pergerakan t_p	20	33	2
Waktu Deteksi t_d	14	24	3

Berdasarkan **Tabel 4.15, 4.16, dan 4.17**, hasil analisis menunjukkan bahwa setiap komponen memiliki tingkat pengaruh yang berbeda terhadap perubahan total waktu evakuasi. Pada Skenario 1 dan Skenario 2, komponen waktu sebelum pergerakan (t_p) merupakan faktor yang paling dominan dengan kontribusi varians masing-masing sebesar 50% dan 42%. Hal ini menunjukkan bahwa fase awal respons penghuni sebelum mulai bergerak memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap total waktu evakuasi. Keterlambatan dalam mengenali situasi darurat dan mengambil keputusan untuk melakukan evakuasi akan meningkatkan waktu total evakuasi secara keseluruhan.

Skenario 3 menunjukkan bahwa waktu bergerak (t_m) merupakan komponen yang paling dominan dengan standar deviasi sebesar 26 dan kontribusi varians sebesar 43%, sehingga menjadi prioritas perbaikan pertama. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses perpindahan penghuni menuju tempat aman sangat memengaruhi keberhasilan evakuasi. Faktor-faktor seperti panjang jalur evakuasi, kapasitas tangga, kepadatan penghuni, serta adanya hambatan pada koridor atau pintu keluar berpotensi meningkatkan waktu tempuh evakuasi.

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa waktu bergerak (t_m) dan waktu pra-gerak (t_p) merupakan komponen yang paling berpengaruh terhadap total waktu evakuasi. Oleh karena itu, strategi peningkatan sistem evakuasi perlu difokuskan pada pengurangan waktu respons awal penghuni serta optimalisasi jalur evakuasi,

sehingga dapat meningkatkan keandalan evakuasi penghuni dalam kondisi darurat kebakaran.

4.5.2 Analisis Sensitivitas Waktu Evakuasi Terhadap Probabilitas Keberhasilan Pada Metode MCS

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh relatif dari setiap variabel input terhadap hasil keluaran simulasi Monte Carlo, yaitu nilai G (selisih antara waktu yang tersedia dengan waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi). Variabel input yang diuji terdiri dari waktu deteksi (t_d), waktu pra-pergerakan (t_p), dan waktu bergerak (t_m). Nilai sensitivitas diperoleh dari hasil simulasi sebanyak 1.000.000 iterasi, sedangkan analisis korelasi digunakan untuk memperkuat hubungan linier antara masing-masing variabel dengan nilai dari hasil simulasi. Hasil koefisien korelasi antara variabel input dan nilai G disajikan pada **Tabel 4.18**, **Tabel 4.19**, dan **Tabel 4.20**.

Tabel 4. 18 Koefisien Korelasi Variabel Input terhadap G Skenario 1

Variabel	R	Keterangan
t_d	-0,3214	Korelasi Lemah
t_p	-0,4379	Korelasi Sedang
t_m	-0,1387	Korelasi Sangat Lemah

Tabel 4. 19 Koefisien Korelasi Variabel Input terhadap G Skenario 2

Variabel	r	Keterangan
t_d	-0,3088	Korelasi Lemah
t_p	-0,4195	Korelasi Sedang
t_m	-0,3091	Korelasi Lemah

Tabel 4. 20 Koefisien Korelasi Variabel Input terhadap G Skenario 3

Variabel	r	Keterangan
t_d	-0,2760	Korelasi Lemah
t_p	-0,3781	Korelasi Lemah
t_m	-0,5169	Korelasi Sedang

Interpretasi tingkat hubungan koefisien korelasi pada penelitian ini mengacu pada klasifikasi yang dikemukakan oleh Sugiyono (2019), yaitu nilai koefisien korelasi 0,00–0,199 dikategorikan sangat rendah, 0,20–0,399 rendah, 0,40–0,599 sedang, 0,60–0,799 kuat, dan 0,80–1,000 sangat kuat. Klasifikasi tersebut digunakan untuk menggambarkan tingkat pengaruh masing-masing variabel input terhadap nilai fungsi kinerja (G) pada analisis sensitivitas. Berdasarkan hasil pada **Tabel 4.18**,

Tabel 4.19, dan **Tabel 4.20**, seluruh variabel input menunjukkan hubungan negatif terhadap margin keselamatan (G). Pada skenario 1, waktu deteksi (t_d) memiliki korelasi sedang dengan nilai sebesar -0,438, sedangkan waktu sebelum pergerakan (t_p) menunjukkan korelasi lemah sebesar -0,321 dan waktu bergerak (t_m) memiliki korelasi sangat lemah sebesar -0,139. Pada skenario 2, waktu deteksi (t_d) kembali menunjukkan pengaruh terbesar dengan korelasi sedang sebesar -0,419, sementara waktu sebelum pergerakan (t_p) dan waktu bergerak (t_m) memiliki korelasi lemah dengan nilai masing-masing sebesar -0,308 dan -0,309.

Sementara itu, pada skenario 3, waktu bergerak (t_m) menunjukkan korelasi sedang dengan nilai sebesar -0,517, sedangkan waktu deteksi (t_d) dan waktu sebelum pergerakan (t_p) memiliki korelasi lemah dengan nilai masing-masing sebesar -0,378 dan -0,276. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan setiap komponen waktu akan menyebabkan nilai margin keselamatan (G) semakin menurun. Variabel waktu bergerak (t_m) pada skenario 3 menjadi faktor yang paling berpengaruh terhadap perubahan nilai G, sehingga faktor pergerakan penghuni menjadi aspek yang paling penting untuk diperhatikan dalam peningkatan keandalan sistem evakuasi gedung.

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh relatif setiap variabel input terhadap hasil keluaran simulasi Monte Carlo, yaitu nilai G (selisih antara waktu yang tersedia dengan waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi). Variabel yang dianalisis meliputi waktu deteksi, waktu pra-pergerakan dan waktu bergerak. Tanda negatif pada nilai korelasi menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara waktu evakuasi dan probabilitas keberhasilan. Artinya, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mendeteksi, memulai, dan terutama bergerak menuju area aman, semakin kecil peluang keberhasilan evakuasi. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa waktu bergerak merupakan faktor paling berpengaruh terhadap keberhasilan evakuasi, sehingga upaya peningkatan efisiensi pergerakan penghuni melalui perbaikan jalur evakuasi dan pelatihan rutin menjadi aspek yang sangat penting untuk meningkatkan kesiapsiagaan sistem evakuasi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa waktu bergerak (*movement time*) merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap keberhasilan proses evakuasi

DTL-FT Unand. Komponen ini merepresentasikan durasi aktual perpindahan individu menuju titik aman setelah terjadinya kebakaran. Nilai t_m tidak hanya dipengaruhi oleh kemampuan individu dalam bergerak, tetapi juga oleh faktor-faktor fisik bangunan seperti lebar pintu keluar, panjang jalur evakuasi, konfigurasi rute, dan tingkat kepadatan penghuni. Dengan demikian, variabel geometrik tersebut tidak dihitung sebagai komponen waktu yang terpisah, melainkan sebagai bagian integral dari t_m karena secara langsung menentukan kecepatan dan kelancaran perpindahan penghuni. Semakin sempit pintu keluar dan semakin panjang jalur evakuasi, nilai t_m akan meningkat, yang berimplikasi pada menurunnya peluang keberhasilan evakuasi.

4.6 Pembahasan

Hasil analisis keandalan evakuasi menunjukkan bahwa Gedung Departemen Teknik Lingkungan Universitas Andalas secara umum berada dalam *Reliability Zone* ($\beta > 1,0$) dengan probabilitas keberhasilan evakuasi di atas 99%. Namun, analisis terhadap tiap parameter menunjukkan adanya titik rawan keselamatan yang dipengaruhi oleh kondisi arsitektural dan psikologis penghuni gedung.

Skenario 3 yang disimulasikan di Laboratorium Komputer Lantai 3 Gedung A menunjukkan penurunan indeks keandalan menjadi $\beta = 2,559$ pada FOSM dan memunculkan 51 iterasi kasus kegagalan evakuasi pada MCS ($P_f = 0,0051\%$). Temuan ini mengindikasikan bahwa lokasi kebakaran pada lantai teratas, keterbatasan akses evakuasi berupa satu tangga, serta bertambahnya jarak tempuh vertikal menyebabkan peningkatan risiko kegagalan evakuasi dibandingkan dengan skenario lainnya. Karakteristik Gedung A yang hanya memiliki satu akses tangga tanpa jalur evakuasi alternatif menyebabkan waktu bergerak (t_m) menjadi variabel yang paling berpengaruh terhadap nilai fungsi kinerja (G), dengan nilai koefisien korelasi sebesar $r = -0,517$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa peningkatan waktu bergerak akan menurunkan margin keselamatan evakuasi. Ketika asap bergerak naik ke lantai atas, waktu aman yang tersedia (ASET) menurun dengan cepat di lantai tertinggi. Pada saat yang sama, penghuni di Lantai 3 harus menempuh jarak evakuasi terjauh (115,18 m) melewati arus perpindahan massa dari Lantai 2 yang memadati tangga tunggal tersebut. Temuan ini sesuai dengan apa yang disampaikan dalam beberapa penelitian yang menyatakan bahwa penggabungan arus (*merging*

flows) pada satu titik tangga tanpa jalur alternatif akan menurunkan kecepatan berjalan penghuni dan meningkatkan kepadatan (*congestion*) pada jalur evakuasi (Sano et al., 2017, 2018). Ketiadaan sprinkler otomatis di Gedung A dapat memperparah kondisi ini karena tidak ada penahanan laju pelepasan panas pada fase awal pertumbuhan api.

Pada Skenario 1 dan Skenario 2, komponen yang paling memengaruhi ketidakpastian margin keselamatan bukanlah waktu berjalan, melainkan waktu pra-pergerakan (t_p) dengan nilai korelasi sedang ($r = -0,438$ dan $r = -0,420$). Pola ini dapat dikaitkan dengan hasil kuesioner (**Tabel 4.3**). Tingginya persentase jawaban "Netral" pada aspek prosedur pelaporan darurat (36%) dan prosedur evakuasi spesifik area laboratorium (38%) mengindikasikan adanya keraguan penghuni dalam merespons keadaan darurat. Ketika alarm kebakaran berbunyi, penghuni dapat menunda pergerakan untuk mengenali kondisi yang terjadi, serta melakukan investigasi untuk memvalidasi apakah alarm tersebut nyata atau sekadar kegagalan sistem. Hal ini sejalan dengan temuan (Haghani et al., 2024) serta (C. Zhang & Liu, 2026) Mengenai perilaku manusia di gedung publik, di mana penghuni sering kali memerlukan waktu untuk memastikan kondisi bahaya sebelum memulai evakuasi. Proses tersebut dapat berupa pengamatan terhadap lingkungan sekitar, pencarian informasi tambahan, atau menunggu respons dari orang lain sebelum mengambil keputusan untuk bergerak. Selain itu, profil analisis laboratorium yang merasa memiliki tanggung jawab terhadap instrumen bernilai tinggi (seperti oven atau kompor gas kuesioner bagian khusus) memicu perpanjangan waktu pra-pergerakan karena adanya beban tindakan preventif pra-evakuasi.

Meskipun nilai rata-rata margin keselamatan pada Skenario 3 masih menunjukkan kondisi yang aman, simulasi Monte Carlo berhasil mengidentifikasi 51 kejadian kegagalan evakuasi dari 1.000.000 iterasi yang dilakukan. Kondisi ini terjadi ketika beberapa faktor seperti perkembangan api yang lebih cepat dan keterlambatan penghuni dalam memulai evakuasi membuat nilai fungsi kinerja $G < 0$. Penemuan risiko tersembunyi ini sejalan dengan artikel (Oguz Erkal et al., 2023) dan kajian (Almaskati et al., 2024) terhadap metode evaluasi keselamatan tradisional, yang menyatakan bahwa penggunaan nilai tunggal (*safety factor*) sering kali gagal

melindungi populasi rentan dalam struktur bangunan bertingkat dengan keterbatasan sarana jalan keluar (*means of egress*).

Ketiadaan titik kumpul yang ditetapkan secara resmi di lingkungan DTL Unand menjadi salah satu aspek yang perlu mendapat perhatian dalam upaya peningkatan keselamatan kebakaran. Hal ini dapat dilihat dari tingginya jawaban netral pada kuesioner pemahaman rute (**Tabel 4.3**). Ketidaktersediaan titik kumpul yang ditetapkan secara resmi berpotensi menyebabkan penghuni berkumpul di sekitar area pintu keluar setelah proses evakuasi selesai yang berisiko mengganggu akses kendaraan darurat menuju lokasi kejadian (Ferreira, 2022; Stevens & Rush, 2025; Weng et al., 2023).

