

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan urbanisasi global yang pesat telah mendorong pertumbuhan signifikan pada pembangunan gedung hunian bertingkat tinggi, khususnya apartemen, sebagai respons atas keterbatasan lahan di kawasan perkotaan yang terus berkembang. Menurut laporan Grand View Research, segmen hunian residensial mendominasi pasar lift global dengan kontribusi sebesar 69,1% dari total pendapatan pada tahun 2024, yang didorong oleh meningkatnya urbanisasi dan standar kehidupan di negara-negara berkembang [1]. Dalam konteks ini, sistem transportasi vertikal khususnya lift menjadi komponen infrastruktur kritis yang menentukan kualitas layanan dan kenyamanan penghuni gedung. Lebih dari 7 miliar perjalanan lift dilakukan setiap harinya di seluruh dunia, menjadikannya sebagai komponen yang tidak tergantikan dalam bangunan bertingkat rendah maupun tinggi [2]. Seiring meningkatnya kepadatan penghuni, sistem pengendalian lift tunggal tidak lagi memadai, sehingga sistem multi lift hadir sebagai solusi. Namun, efektivitas sistem tersebut tidak hanya bergantung pada kemampuan algoritma penjadwalan dalam mengatur pergerakan elevator, tetapi juga pada mekanisme pengambilan keputusan untuk menentukan elevator yang paling tepat dalam melayani setiap permintaan penumpang. Konsep penjadwalan pada sistem multi lift memiliki kemiripan dengan disk scheduling algorithm dalam ilmu komputasi, yaitu sama-sama berupaya menentukan urutan pelayanan permintaan secara efisien untuk meminimalkan waktu tunggu. Kesamaan karakteristik tersebut menjadikan algoritma SCAN dan LOOK banyak diadaptasi sebagai dasar pengendalian pergerakan elevator pada sistem multi lift [3]. Lebih lanjut, penelitian Li dan Chu menunjukkan bahwa sistem cerdas berbasis algoritma penjadwalan modern mampu mereduksi *waiting time* hingga 30% dibandingkan dengan pendekatan konvensional seperti *First Come First Served* (FCFS) [4], yang secara langsung menegaskan pentingnya pengembangan mekanisme pengambilan keputusan yang lebih adaptif dalam sistem multi lift modern agar setiap permintaan penumpang dapat dilayani secara lebih efisien sesuai dengan kondisi operasional yang terus berubah.

Fenomena *rush hour* merepresentasikan salah satu tantangan operasional paling kritis dalam pengelolaan sistem multi lift apartemen. Selama jam-jam puncak, seperti *morning rush hour*, jam makan siang, dan jam pulang kerja, sejumlah besar penghuni membutuhkan mobilitas vertikal yang cepat dan efisien secara bersamaan [5]. Kondisi ini menciptakan antrian permintaan yang padat dan tidak merata, mengakibatkan waktu tunggu yang panjang, pemborosan kapasitas kabin, serta ketidakpuasan penghuni secara signifikan. Sistem lift pada bangunan bertingkat menghadapi tantangan besar akibat aliran penumpang yang tidak dapat diprediksi, sehingga penjadwalan lift menjadi sangat kompleks untuk dioptimalkan [6]. Lebih lanjut, sebagian besar mekanisme dispatching konvensional masih mengandalkan aturan keputusan yang bersifat statis sehingga kurang mampu beradaptasi terhadap perubahan pola permintaan penumpang yang terjadi secara dinamis selama kondisi *rush hour* [7]. Keterbatasan tersebut menyebabkan keputusan dispatching sering kali tidak mencerminkan kondisi aktual seluruh elevator, sehingga distribusi beban menjadi kurang seimbang dan waktu tunggu penumpang berpotensi meningkat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan mekanisme optimasi pada sistem multi lift mampu menurunkan waiting time secara signifikan pada kondisi beban penumpang yang tinggi. Salah satunya, penelitian Khonjun dkk. melaporkan penurunan waiting time hingga 42,44% melalui pendekatan optimasi pada sistem lift bertingkat [8]. Hasil tersebut menegaskan bahwa pendekatan konvensional yang bersifat reaktif cenderung gagal dalam menyeimbangkan efisiensi layanan dan kualitas pengalaman penumpang secara simultan dalam lingkungan yang dinamis [9]. Oleh karena itu, diperlukan suatu mekanisme dispatching yang mampu mengambil keputusan secara lebih adaptif dengan mempertimbangkan kondisi operasional setiap elevator secara menyeluruh agar waktu tunggu penumpang dapat diminimalkan pada kondisi *rush hour*.

Berbagai pendekatan teoretis dan algoritmik telah dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas mekanisme dispatching pada sistem multi lift. Masing-masing pendekatan menawarkan keunggulan yang berbeda, namun masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi perubahan pola permintaan penumpang yang bersifat dinamis. Pertama, LOOK Disk Scheduling Algorithm merupakan pengembangan dari algoritma SCAN yang mengoptimalkan pergerakan elevator dengan hanya bergerak hingga permintaan terakhir pada arah aktif sebelum berbalik arah. Pendekatan ini mampu mengurangi perjalanan yang tidak diperlukan sehingga meningkatkan efisiensi

pelayanan dibandingkan algoritma konvensional [3]. Kedua, Elevator Group Control System (EGCS) merupakan kerangka kendali yang mengoordinasikan beberapa unit lift secara terpusat untuk meningkatkan efisiensi pelayanan. Namun, penelitian Tsai dkk. menunjukkan bahwa sebagian besar implementasi EGCS masih berfokus pada pengambilan keputusan secara real-time tanpa mempertimbangkan perubahan pola permintaan penumpang secara dinamis, sehingga peluang optimasi sistem belum dimanfaatkan secara maksimal [5]. Ketiga, teori antrian (*queuing theory*) memberikan fondasi matematis dalam memodelkan laju kedatangan penumpang dan waktu layanan lift. Formulasi masalah *dispatching* lift sebagai *Semi-Markov Decision Process* (SMDP) dengan representasi ruang aksi dan fungsi *reward* yang terancang secara cermat terbukti mampu menghasilkan kebijakan *dispatching* yang lebih adaptif terhadap berbagai pola lalu lintas [10]. Keempat, pendekatan optimasi berbasis kecerdasan buatan seperti *deep reinforcement learning* (Deep RL) telah menunjukkan hasil yang signifikan; strategi *standby* proaktif yang diusulkan Tsai dkk. terbukti mampu mereduksi rata-rata waktu tunggu lebih dari 24% pada skenario gedung bertingkat menengah maupun tinggi [5], sementara Wu dan Yang membuktikan bahwa optimasi arah berbasis matriks relasi mampu mengakomodasi pola lalu lintas multi-puncak yang kompleks secara lebih efisien dibandingkan algoritma berbasis pengenalan pola eksplisit [6]. Kelima, pendekatan *game-theoretic* yang diusulkan Maleki dkk. membuktikan bahwa pembentukan koalisi permintaan antar penumpang dalam satu unit lift mampu meminimalkan gerakan redundan kabin sekaligus meningkatkan kualitas layanan secara energi-efisien [11]. Integrasi prinsip LOOK Scheduling dengan mekanisme *adaptive dispatching* serta teknik optimasi modern tersebut membuka peluang yang sangat signifikan untuk menciptakan sistem multi lift yang lebih responsif, efisien, dan mampu beradaptasi terhadap kondisi *rush hour* [6, 9, 11].

Berdasarkan kajian terhadap kesenjangan riset yang ada, dirumuskan hipotesis bahwa penerapan mekanisme *adaptive dispatching* pada sistem multi lift apartemen dapat mengurangi *waiting time*, meningkatkan *throughput* kabin, dan meningkatkan kenyamanan pengguna dibandingkan mekanisme *dispatching* konvensional pada kondisi *morning rush hour*. Fokus penelitian pada *morning rush hour* didasarkan pada karakteristik *down-peak traffic* yang dominan satu arah, yaitu pergerakan penghuni dari lantai hunian menuju lobby untuk memulai aktivitas kerja, sehingga pola permintaannya lebih terprediksi dan representatif untuk mengevaluasi algoritma

SCAN dan LOOK yang bekerja berdasarkan arah pergerakan kabin. Pemilihan periode ini turut dikuatkan oleh informasi awal dari pihak building management gedung objek penelitian pada saat proses perizinan observasi, yang menyampaikan bahwa kepadatan penggunaan lift secara konsisten paling tinggi terjadi pada jam keberangkatan kerja penghuni di pagi hari. Hipotesis ini dilandaskan pada kemampuan mekanisme *adaptive dispatching* dalam mengalokasikan permintaan secara lebih dinamis berdasarkan kondisi operasional elevator. Dengan mempertimbangkan faktor seperti tingkat kepadatan permintaan, kondisi elevator yang sedang aktif, serta ketersediaan elevator lain yang berada dalam kondisi *idle*, sistem diharapkan mampu mengurangi *waiting time* dan meningkatkan efisiensi pelayanan dibandingkan mekanisme *dispatching* konvensional. *Adaptive dispatching* dievaluasi pada algoritma scheduling SCAN dan LOOK yang dipilih karena keduanya merepresentasikan mekanisme pergerakan elevator pada sistem bangunan bertingkat. Kedua algoritma tersebut melayani permintaan berdasarkan arah pergerakan elevator sehingga lebih sesuai untuk memodelkan operasi elevator dibandingkan algoritma penjadwalan yang tidak mempertimbangkan pola pergerakan vertikal [3]. Wu dan Yang menegaskan bahwa modifikasi dinamis terhadap mekanisme pengambilan keputusan merupakan arah pengembangan yang menjanjikan untuk menangani pola lalu lintas vertikal yang kompleks [6]. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan memformalisasikan model *adaptive dispatching* berbasis algoritma LOOK pada sistem multi lift apartemen, mengembangkan mekanisme adaptif yang mampu merespons fluktuasi permintaan pada kondisi *morning rush hour*, serta mengevaluasi performa model melalui simulasi komputasional menggunakan metrik *average waiting time*, *average travel time*, dan *throughput* kabin [10, 11]. Kontribusi ilmiah penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur di bidang *software engineering* dan sistem terdistribusi, sekaligus memberikan rekomendasi praktis bagi perancang sistem kendali lift pada bangunan hunian modern yang semakin kompleks [9].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang model *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm*

pada sistem multi lift apartemen untuk meningkatkan efisiensi pelayanan transportasi vertikal?

2. Bagaimana mekanisme *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* dapat merespons pola permintaan penumpang yang dinamis pada kondisi *morning rush hour*, sebagai periode dengan pola down-peak traffic yang paling kritis pada objek penelitian?
3. Seberapa besar pengaruh penerapan *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* terhadap *average waiting time* dan *average travel time* dibandingkan sistem *dispatching* konvensional pada sistem multi lift?
4. Bagaimana tingkat efektivitas *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* dalam meningkatkan *throughput* kabin dan pemerataan distribusi beban antar elevator pada sistem multi lift apartemen?

1.3 Batasan Permasalahan

Agar penelitian ini memiliki ruang lingkup yang jelas dan terarah, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek simulasi dibatasi pada sistem antrian multi lift gedung apartemen bertingkat.
2. Algoritma *scheduling* yang digunakan dalam simulasi meliputi SCAN dan LOOK sebagai algoritma pembandingan untuk mengevaluasi efektivitas *adaptive dispatching*.
3. Pengujian difokuskan pada data observasi *morning rush hour* yang dikumpulkan pada rentang waktu pukul 06.00–12.00, mencakup periode puncak keberangkatan kerja penghuni beserta periode transisi menjelang siang, berdasarkan karakteristik down-peak traffic dan informasi awal dari pihak building management gedung objek penelitian.
4. Evaluasi performa sistem dibatasi pada metrik *average waiting time*, *average travel time*, *response time*, *total elevator movement*, *throughput* kabin, *load distribution*, *elevator utilization*, serta persentil *waiting time* (P50, P90, P95).

5. Penelitian dilaksanakan dalam bentuk simulasi komputasional dan tidak mencakup implementasi langsung pada sistem lift fisik.
6. Aspek mekanikal, perangkat keras lift, maupun rincian konsumsi energi komponen fisik tidak dibahas dalam penelitian ini.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang model *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* pada sistem multi lift apartemen untuk meningkatkan efisiensi pelayanan transportasi vertikal.
2. Mengembangkan mekanisme *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* yang mampu merespons pola permintaan penumpang secara dinamis pada kondisi *morning rush hour*, sebagai periode operasional paling kritis pada objek penelitian.
3. Menganalisis pengaruh penerapan *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* terhadap *average waiting time* dan *average travel time* dibandingkan sistem *dispatching* konvensional pada sistem multi lift.
4. Mengevaluasi efektivitas *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* dalam meningkatkan throughput kabin dan pemerataan distribusi beban antar elevator pada sistem multi-lift apartemen.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis dan praktis sebagai berikut:

1.5.1 Manfaat Teoritis

- a. Memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang *software engineering*, sistem terdistribusi, serta optimasi sistem *adaptive dispatching* dan penjadwalan lift berbasis *scheduling algorithm* pada sistem multi lift.
- b. Menambah referensi akademik mengenai penerapan *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* pada sistem multi lift dalam kondisi *rush hour*.
- c. Menjadi dasar pengembangan penelitian lanjutan yang berkaitan dengan optimasi sistem transportasi vertikal pada gedung bertingkat.

1.5.2 Manfaat Praktis

- d. Membantu meningkatkan efisiensi sistem multi lift melalui pengurangan *waiting time* dan optimalisasi pergerakan kabin pada kondisi *rush hour*.
- e. Memberikan rekomendasi implementasi mekanisme *adaptive dispatching* berbasis *scheduling algorithm* pada sistem multi lift apartemen guna meningkatkan kenyamanan pengguna.
- f. Menjadi bahan pertimbangan bagi pengelola gedung atau pengembang sistem lift dalam mengembangkan sistem penjadwalan yang lebih adaptif pada kondisi *rush hour*.
- g. Memberikan gambaran simulasi performa lift yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pengembangan sistem lift modern berbasis optimasi algoritma.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini disusun dalam lima bab yang saling berkaitan untuk memberikan gambaran yang sistematis mengenai penelitian yang dilakukan.

1. Bab 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian, dan sistematika penulisan.

2. Bab 2 LANDASAN TEORI

Bab ini membahas teori yang mendukung penelitian, meliputi sistem elevator multi-lift, teori antrian, algoritma SCAN dan LOOK, *adaptive dispatching*, serta penelitian terdahulu yang relevan.

3. Bab 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian, pengumpulan dan pengolahan data, perancangan simulator, implementasi algoritma, serta skenario pengujian dan parameter evaluasi.

4. Bab 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil simulasi dan analisis performa sistem berdasarkan metrik evaluasi yang digunakan pada setiap skenario pengujian.

5. Bab 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

