

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Sistem *Traffic Signal Control* (TSC) memiliki peran penting dalam pengelolaan lalu lintas perkotaan, terutama dalam menghadapi kepadatan kendaraan yang terus meningkat (H. Zhang dkk., 2020). Pengelolaan TSC yang efektif sangat diperlukan untuk menanggulangi kemacetan, polusi udara, konsumsi bahan bakar, dan masalah keselamatan jalan (Dimri dkk., 2024). Salah satu bentuk peningkatan efektivitas pengelolaan adalah dengan menerapkan pengendalian TSC adaptif, yang dapat menyesuaikan durasi sinyal terhadap kepadatan lalu lintas yang fluktuatif (Ren, 2024).

Saat ini praktik lapangan masih didominasi oleh *Fixed-Time Traffic Signal* (FTTS) dan *Actuated Traffic Signal* (ATS) (Y. Zhang dkk., 2024). FTTS menetapkan durasi hijau statis untuk setiap kaki simpang berdasarkan pola lalu-lintas historis (Koonce dkk., 2008). Sebaliknya, ATS menggunakan sensor keberadaan kendaraan di kaki simpang fase hijau sehingga durasi hijau dapat diperpanjang sampai tercapai jeda kendaraan atau batas maksimum, konsekuensinya kaki simpang lain kerap mengalami penundaan lebih lama (Koonce dkk., 2008). Kedua metode ini belum adaptif dalam merespon fluktuasi kepadatan lalu lintas (Michailidis dkk., 2025).

Untuk menjawab kebutuhan adaptivitas tersebut, banyak penelitian terkini mengeksplorasi pendekatan *Reinforcement Learning* (RL). RL memformulasikan pengaturan TSC sebagai *Markov Decision Process* (MDP) sehingga agen dapat belajar dari data lalu lintas aktual, memperbarui kebijakan secara berkelanjutan, dan beradaptasi terhadap perubahan kepadatan secara langsung (Michailidis dkk., 2025). Tinjauan terbaru menegaskan bahwa RL merupakan pendekatan *data-driven* yang menjanjikan untuk pengendalian TSC jaringan perkotaan yang semakin dinamis dan kompleks (Zhao dkk., 2024).

Beberapa penelitian berbasis *Deep Q-Network* (DQN) telah membuktikan kemampuan RL dalam meningkatkan efektivitas pengendalian TSC. PN-D3QN yang diuji

pada SUMO mampu menurunkan *average waiting time* hingga 60,9 % dan *average queue length* 39,5 % dibanding kontrol *fixed-time* (Cai & Wei, 2024). Pri-DDQN yang menggunakan mekanisme *priority-based replay* berhasil memangkas *queue length* 13,41 % dan *waiting time* 32,33 % terhadap *baseline actuated* (Zheng dkk., 2025), dan algoritma DQN dengan *experience replay & target network* mampu menurunkan *vehicle delay* sampai 47 % dibanding metode *longest-queue first* dan 86 % terhadap *fixed-time control* (Gao dkk., 2017).

Berdasarkan data keberhasilan pendekatan RL tersebut, mayoritas model RL berfokus pada penurunan *queue length* dan *waiting time* secara global dengan pemilihan fase hijau yang didasarkan pada tekanan antrean. Akibatnya model RL mengabaikan *fairness* distribusi rata-rata waktu tunggu antar-kaki simpang, sehingga kaki simpang minor kerap mengalami keterlambatan berlebih (L. Zhang, Wu, dkk., 2021). Selain itu, pemilihan fase hijau yang didasarkan pada tekanan antrean juga membuat siklus lalu lintas menjadi acak (tidak ada kepastian giliran) dan membingungkan bagi pengemudi, kondisi ini dapat memicu frustrasi dan mengakibatkan perilaku pelanggaran (Ibrokhimov dkk., 2022). Oleh karena itu pendekatan RL pada TSC yang mempertimbangkan aspek *fairness* dan kepastian giliran bagi pengguna jalan perlu untuk diteliti lebih lanjut.

Penelitian ini mengimplementasikan *Deep Q-Network (DQN)* untuk simulasi lampu lalu lintas adaptif dengan variasi pembobotan *rewards*. Pembobotan *reward* ini menjadi pembelajaran bagi agen RL dalam meningkatkan *fairness* distribusi rata-rata waktu tunggu antar kaki simpang. Dalam implementasinya model mempertahankan fase siklus tetap untuk memberikan kepastian giliran bagi pengguna jalan. Dengan penerapan ini pengendalian TSC dapat memberikan kepastian giliran dan mengurangi ketimpangan waktu tunggu antar kaki simpang.

1.2 PERMASALAHAN

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, berikut ini beberapa permasalahan yang diangkat pada penelitian ini:

1. Kebanyakan keberhasilan penelitian RL TSC saat ini berfokus pada penurunan *waiting time* dan *queue length* secara global, tetapi cenderung mengabaikan distribusi rata-rata waktu tunggu antar-kaki simpang (*fairness*).

2. Optimalisasi TSC yang berbasis tekanan antrean membuat siklus lalu lintas menjadi acak dan menimbulkan ketidakpastian giliran fase hijau.
3. Pengembangan model RL TSC yang mempertimbangkan aspek *fairness* dengan mempertahankan fase siklus tetap dan memverifikasinya secara sistematis menjadi penting untuk diteliti.

1.3 TUJUAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi model RL TSC dengan DQN yang dapat meningkatkan pemerataan distribusi rata-rata waktu tunggu antar kaki simpang (*fairness*) dan dapat memberikan kepastian giliran hijau untuk setiap kaki simpang. Secara lebih spesifik, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengembangkan variasi pembobotan *reward* model RL dengan DQN untuk mengoptimalkan pemerataan distribusi rata-rata waktu tunggu antar kaki simpang di persimpangan tunggal empat kaki simpang.
2. Mempertahankan fase siklus tetap dalam implementasi RL TSC untuk memberikan kepastian giliran lampu hijau setiap kaki simpang.
3. Melatih dan mengevaluasi kinerja model melalui simulasi SUMO.

Dengan tujuan tersebut, penelitian ini dapat memberikan solusi sistem pengendalian *traffic signal control* adaptif berbasis RL yang mampu meningkatkan aspek *fairness* dan memberi kepastian giliran bagi pengguna jalan.

1.4 MANFAAT

Penelitian ini dapat memberikan manfaat teoritis dan praktis dalam pengembangan *fairness-aware reinforcement learning* untuk *traffic signal control*.

Manfaat Teoritis

1. Menambah kajian tentang *fairness* dalam RL *traffic signal control*, yang selama ini lebih berfokus pada penurunan waktu tunggu tanpa mempertimbangkan pemerataan rata-rata waktu tunggu antar kaki simpang.

2. Menjadi referensi penerapan fase siklus tetap pada penelitian sistem RL TSC untuk memberikan kepastian giliran atau *predictability* dalam lalu lintas.
3. Membuka peluang penelitian lebih lanjut dalam integrasi *fairness-aware* RL dengan *multi-agent traffic control* untuk optimasi pada jaringan persimpangan kompleks.

1.4.2 Manfaat Praktis

1. Meningkatkan *fairness* dalam distribusi rata-rata waktu tunggu, sehingga tidak ada kaki simpang yang mengalami waktu tunggu ekstrem.
2. Memberikan kepastian giliran bagi pengguna jalan, dengan mempertahankan siklus tetap dalam sistem RL yang adaptif.
3. Dapat menjadi solusi pendukung dalam pembangunan sistem *smart city* yang membutuhkan *traffic signal control* adaptif berbasis RL.

1.5 BATASAN MASALAH

Agar penelitian ini tetap fokus dan memiliki ruang lingkup yang jelas, beberapa batasan berikut diterapkan dalam studi ini:

1. Penelitian ini menerapkan pengendalian TSC secara adaptif atau *Adaptive Traffic Signal Control* (ATSC).
2. Penelitian ini menggunakan algoritma *Deep Q-Network* (DQN) untuk mengembangkan model *Reinforcement Learning* (RL).
3. *Environment* persimpangan lalu lintas menggunakan *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) tanpa implementasi langsung pada sistem lalu lintas di dunia nyata.
4. Simulasi dilakukan pada persimpangan tunggal (*single intersection*) dengan empat kaki simpang / simpang empat (*four-way intersection*).
5. *Fairness* dalam penelitian ini berfokus pada pemerataan distribusi rata-rata waktu tunggu antar kaki simpang dalam satu siklus.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Bab 1 Pendahuluan

Pada bagian pendahuluan ini memaparkan secara rinci tentang latar belakang dari penelitian yang dilakukan, masalah yang terjadi, tujuan yang ingin dicapai dan manfaat penelitian.

Bab 2 Kajian Pustaka

Pada bagian Kajian Pustaka ini berisi mengenai teori penunjang termasuk mengenai *Traffic Signal Control*, *Reinforcement Learning*, Algoritma DQN dan simulator SUMO yang diimplementasikan. Selain itu pada bab ini juga dibahas terkait penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini.

Bab 3 Desain Sistem

Pada bab ini diuraikan metodologi dan desain pengembangan sistem pengendalian lampu lalu lintas berbasis RL, termasuk model algoritma, rancangan pembelajaran, dan metode implementasi yang digunakan.

Bab 4 Eksperimen dan Analisis

Bab ini diuraikan secara detail mengenai detail pelaksanaan eksperimen dan hasil pengujian, selain itu pada bab ini juga dijabarkan analisa dari hasil yang didapatkan.

Bab 5 Penutup

Bab ini berisi kesimpulan sebagai jawaban terhadap permasalahan, eksperimen, dan analisis yang telah dilakukan. Jika ada kekurangan dalam penelitian ini, bab ini juga memberikan ruang untuk memberikan saran yang konstruktif setelah menarik kesimpulan.