

Pemodelan Persimpangan Jalan dengan Jalur Lawan Arus untuk Bus Rapid Transit Menggunakan Logika Temporal Linier

Reasoning About Road Intersection with Contraflow Lanes for Bus Rapid Transit Using Linear Temporal Logic

Sarah Andianti Atmawardhana¹

¹Prodi S1 Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Telkom,

¹sarahandiantia@gmail.com

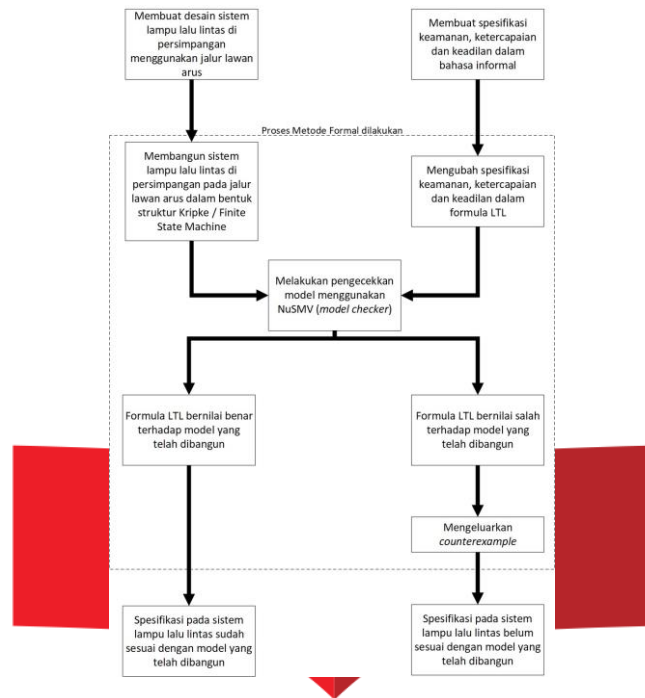
Abstrak

Bus Rapid Transit -yang lebih umum dikenal sebagai busway -merupakan sarana transportasi umum yang cukup banyak dipakai oleh warga ibukota. Tetapi jalur khusus bus sering disalahgunakan oleh pe-ngendara kendaraan non-bus, oleh karena itu pengelola berencana membangun sistem jalur lawan arus (contraflow). Akan tetapi, sistem ini akan mempunyai masalah ketika diterapkan di persimpangan. Untuk mengatasi hal tersebut Dibutuhkan sebuah lampu lalu lintas untuk mengatur arus lalu lintas. Pada tugas akhir ini, penulis akan memodelkan sistem lampu lalu lintas di persimpangan menggunakan jalur lawan arus. Kemudian model akan diformalisasikan ke dalam model formal dengan logika temporal tertentu. Model selanjutnya akan diverifikasi dan hasil dari verifikasi akan dianalisis untuk memastikan bahwa model formal yang dibangun memenuhi spesifikasi yang telah dibuat.

Kata Kunci: Lampu lalu lintas, Persimpangan, Metode Formal, Logika Temporal Linear, NuSMV.

1 Pendahuluan

Kemacetan saat ini sudah menjadi hal yang umum di jalan raya terutama di kota-kota yang mempunyai jumlah penduduk yang besar. Di Jakarta, untuk mengurangi tingkat kemacetan yang ada, pemerintah membuat sistem transportasi baru, yang dinamakan dengan Bus Rapid Transit atau yang lebih dikenal dengan busway. Salah satu kelebihan dari sistem Bus Rapid Transit ini adalah sistem mempunyai jalur khusus bus. Sayangnya, jalur tersebut digunakan oleh pengendara kendaraan non-bus, sehingga kemacetan masih sering terjadi. Oleh karena itu, untuk mensterilkan jalur bus pihak pengelola berencana untuk menerapkan sistem jalur lawan arus (contraflow). Ketika sistem jalur lawan arus diterapkan, sistem pengendalian lampu dapat menjadi lebih kompleks. Oleh karena itu, sistem harus mampu menjamin keamanan dan kinerja sistem tersebut. Sebelumnya, pemodelan sistem transportasi menggunakan metode formal sudah pernah dilakukan di beberapa negara diantaranya India, Indonesia, Italy dan Perancis. Di India, Vivek Vishal memodelkan sistem lampu lalu lintas adaptif [1]. Di Perancis, Anthon Staines memodelkan sistem kereta bawah tanah [?]. Sedangkan di Universitas Indonesia, pemodelan sistem transportasi yang digunakan untuk menguji coba sistem pengendali lalu lintas kereta api [?]. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini penulis memodelkan model formal dari sistem lampu lalu lintas di persimpangan menggunakan jalur lawan arus (contraflow) dengan lokasi bus Transjakarta. Selanjutnya model formal tersebut akan diuji menggunakan model checker. Berikut ini adalah metodologi yang penulis gunakan.



Gambar 1: Metodologi penelitian pada tugas akhir ini

2 Kajian Pustaka

2.1 Metode Formal

Metode formal adalah teknik yang digunakan untuk memodelkan suatu sistem yang kompleks [2]. Metode formal dapat digunakan untuk mengembangkan sebuah aplikasi baik itu perangkat lunak atau perangkat keras. Pada masa spesifikasi, metode formal dapat digunakan untuk memberikan gambaran dari sistem yang akan dikembangkan sedetail yang diinginkan. Metode formal dapat digunakan untuk memandu kegiatan pengembangan selanjutnya dan dapat digunakan untuk memverifikasi bahwa pra-syarat untuk sistem yang dikembangkan telah lengkap dan dapat dilanjutkan ke tingkat selanjutnya.

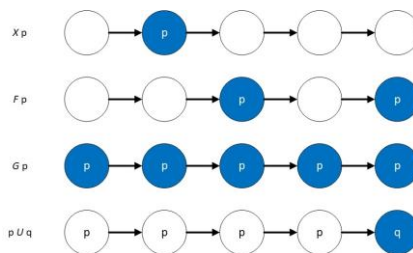
2.2 LTL (Logika Temporal Linear)

2.2.1 Sintaks LTL

Berikut sintaks Backus Normal Form (BNF) untuk logika temporal linier, misalkan $P = \{p \mid p \text{ proposisi atom}\}$ menyatakan himpunan seluruh proposisi atom yang ditinjau dan $p \in P$. Formula ϕ didefinisikan dengan BNF berikut:

$$\phi ::= p \mid \neg\phi \mid \phi \wedge \phi \mid \phi \vee \phi \mid \phi \rightarrow \phi \mid X\phi \mid F\phi \mid G\phi \mid \phi U \phi \mid \phi W \phi \mid \phi R \phi$$

2.2.2 Semantik LTL



Gambar 2: Ilustrasi Semantik LTL

3 Konstruksi Model Formal

Pada bab ini akan dilakukan pembahasan mengenai konstruksi model formal yang berisikan data dan desain persimpangan, spesifikasi informal, serta translasi model formal dan spesifikasi formal dengan LTL.

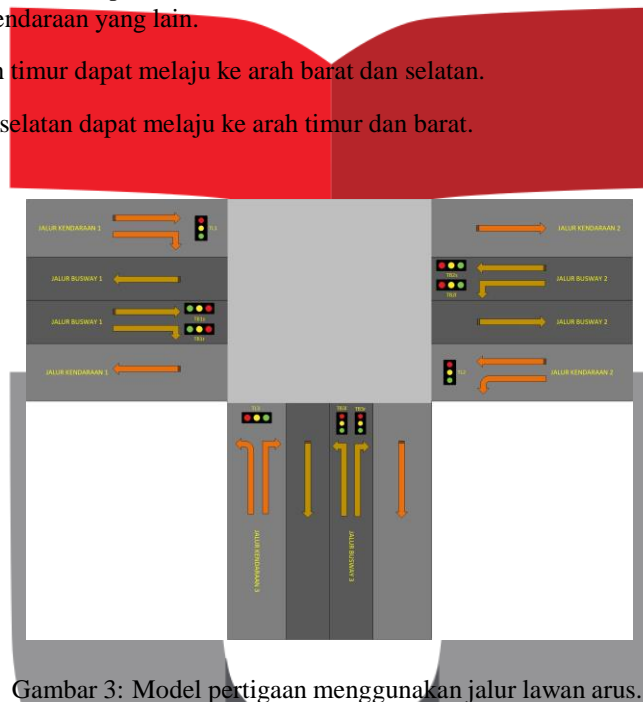
3.1 Data dan Spesifikasi Informal

Model formal yang dibuat merupakan model dari sistem lampu lalu lintas di persimpangan menggunakan jalur lawan arus. Model formal tersebut berasal dari desain. Data yang penulis gunakan diambil dari asumsi penulis.

3.1.1 Desain Pertigaan

Pada bagian ini, akan dijelaskan desain pertigaan yang menggunakan jalur lawan arus. Desain yang penulis ajukan dapat dilihat pada Gambar 3. Laju setiap kendaraan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kendaraan dari arah barat dapat melaju ke arah timur dan selatan. Kendaraan yang melaju dari arah barat ke timur tidak menggunakan lampu lalu lintas, kendaraan selalu diasumsikan berada di lajur kiri sehingga tidak mengganggu laju kendaraan yang lain.
2. Kendaraan dari arah timur dapat melaju ke arah barat dan selatan.
3. Kendaraan dari arah selatan dapat melaju ke arah timur dan barat.



Gambar 3: Model pertigaan menggunakan jalur lawan arus.

3.1.2 Desain Perempatan Tanpa Skema Belok Kanan

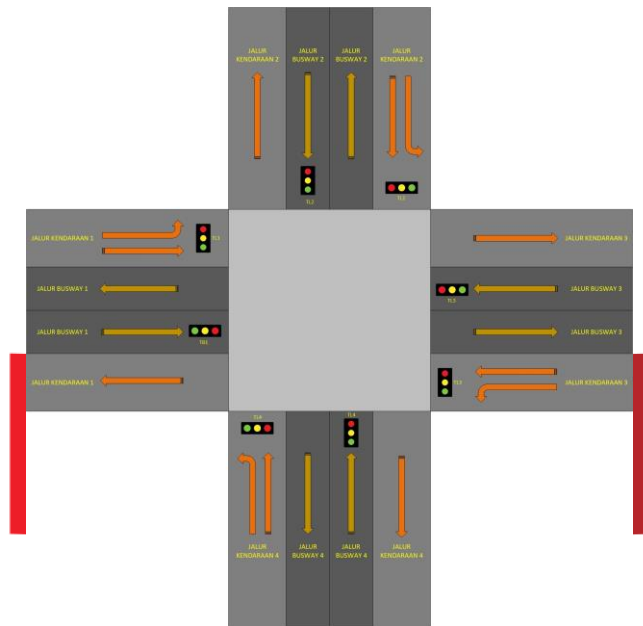
Pada bagian ini, akan dijelaskan desain perempatan tanpa skema belok kanan menggunakan jalur lawan arus. Desain yang penulis ajukan dapat dilihat pada Gambar 4. Laju kendaraan non-bus dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kendaraan dari arah barat dapat melaju ke arah timur dan utara.
2. Kendaraan dari arah utara dapat melaju ke arah selatan dan timur.
3. Kendaraan dari arah timur dapat melaju ke arah barat dan selatan.
4. Kendaraan dari arah selatan dapat melaju ke arah utara dan barat.

Kendaraan non-bus menggunakan skema belok kiri langsung, sehingga kendaraan tersebut tidak mengikuti lampu lalu lintas untuk belok kiri. Sedangkan laju bus dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Bus dari arah barat hanya dapat melaju ke arah timur.
2. Bus dari arah utara hanya dapat melaju ke arah selatan.
3. Bus dari arah timur hanya dapat melaju ke arah barat.

4. Bus dari arah selatan hanya dapat melaju ke arah utara.

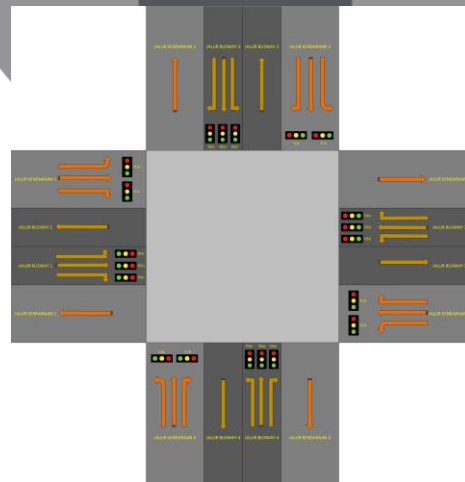


Gambar 4: Model perempatan tanpa skema belok kanan menggunakan jalur lawan arus.

3.1.3 Desain Perempatan dengan Skema Belok Kanan

Pada bagian ini, akan dijelaskan desain perempatan dengan skema belok kanan menggunakan jalur lawan arus. Desain yang penulis ajukan dapat dilihat pada Gambar 5. Laju setiap kendaraan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kendaraan dari arah barat dapat melaju ke arah utara, timur, dan selatan.
2. Kendaraan dari arah utara dapat melaju ke arah timur, selatan, dan barat.
3. Kendaraan dari arah timur dapat melaju ke arah utara, barat, dan selatan.
4. Kendaraan dari arah selatan dapat melaju ke arah barat, utara, dan timur.



Gambar 5: Model perempatan dengan skema belok kanan menggunakan jalur lawan arus.

3.1.4 Spesifikasi Informal untuk Keamanan

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi keamanan yang ada di pertigaan:

- S1 Pada area yang sama, terdapat beberapa lampu hijau yang tidak boleh menyala bersama-sama. Sebagai contoh adalah ketika lampu hijau menyala pada jalur kendaraan non-bus 1 dan jalur bus 1 dengan arah pergi kendaraan lurus.

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi keamanan yang ada di perempatan tanpa skema belok kanan:

- S1 Ketika lampu pertama dan ketiga berwarna merah, maka lampu kedua dan keempat harus berwarna hijau dan sebaliknya.

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi keamanan yang ada di perempatan dengan skema belok kanan:

- S1.1 Pada area 1-2, 2-3, 3-4, dan 4-1, terdapat beberapa lampu hijau tidak boleh menyala bersama-sama. Sebagai contoh adalah ketika lampu hijau menyala pada jalur kendaraan non-bus 1 dan jalur kendaraan non-bus 2.

3.1.5 Spesifikasi Informal untuk Ketercapaian

1. L1 Pada setiap set lampu, apabila satu-satunya lampu yang menyala berwarna merah, maka kondisi tersebut akan terus terjadi hingga set lampu tersebut berwarna merah dan kuning.
2. L2 Pada setiap set lampu, apabila hanya lampu merah dan kuning yang menyala, maka lampu yang menyala hanya lampu merah dan kuning hingga lampu tersebut berwarna hijau.

3.1.6 Spesifikasi Informal untuk Keadilan

1. F1 Pada setiap set lampu, kondisi ketika satu-satunya lampu yang menyala berwarna hijau harus terjadi secara berkala.
2. F2 Pada setiap set lampu, jika lampu merah menyala secara berkala, maka lampu hijau juga akan menyala secara berkala.
3. F3 Pada setiap set lampu, jika lampu hijau menyala secara berkala, maka lampu merah juga akan menyala secara berkala.

3.2 Konstruksi Model Formal

Pada bagian ini, akan penulis jelaskan model formal yang terdapat pada Subbab 3.1.

3.2.1 Definisi Proposisi Atom dan Struktur Kripke Pertigaan

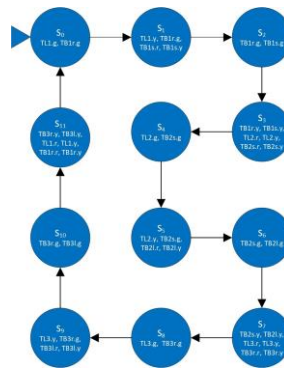
Proposisi atom digunakan untuk merepresentasikan nyalanya lampu pada suatu set lampu lalu lintas. Pada Subbab 3.1.1, set lampu lalu lintas yang mengatur laju kendaraan non-bus disimbolkan dengan TL_i dengan $i \in \{1, 2, 3\}$. Untuk set lampu lalu lintas yang mengatur laju bus disimbolkan dengan TB_{ir} , TB_{is} , dan TB_{il} , dengan r , s , dan l menunjukkan arah pergi kendaraan (belok kanan, lurus, dan belok kiri). Proposisi atom yang menunjukkan nyala lampu pada suatu set lampu lalu lintas di pertigaan dapat ditulis dengan BNF sebagai berikut:

$$\langle \text{atom} \rangle_i ::= \langle T \rangle_i . \langle \text{warna} \rangle_i \langle \text{lampu} \rangle_i$$

Kemudian $\langle T \rangle_i$ dan $\langle \text{warna} \rangle_i$ dijelaskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \langle T \rangle_i &::= TL1 \mid TL2 \mid TL3 \mid TB1r \mid TB1s \mid TB2s \mid TB2l \mid TB3r \mid TB3l \\ \langle \text{warna} \rangle_i &::= r \mid y \mid g \end{aligned}$$

Ilustrasi dari struktur Kripke pertigaan dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 6: Struktur Kripke untuk pertigaan

3.2.2 Definisi Proposisi Atom dan Struktur Kripke Perempatan Tanpa Skema Belok Kanan

Proposisi atom yang menunjukkan nyala lampu pada suatu set lampu lalu lintas pada perempatan tanpa skema belok kanan dapat ditulis dengan BNF berikut:

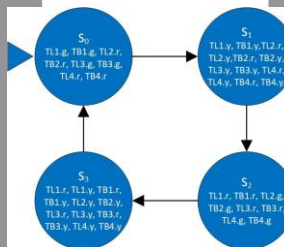
$$\langle \text{atom} \rangle_i ::= \langle T \rangle_i . \langle \text{warna_lampu} \rangle_i$$

Kemudian $\langle T \rangle_i$ dan $\langle \text{warna_lampu} \rangle_i$ dijelaskan sebagai berikut:

$$\langle T \rangle_i ::= TL1 | TL2 | TL3 | TL4 | TB1 | TB2 | TB3 | TB4$$

$$\langle \text{warna_lampu} \rangle_i ::= r | y | g$$

Ilustrasi dari struktur Kripke perempatan tanpa skema belok kanan dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 7: Struktur Kripke untuk perempatan tanpa skema belok kanan.

3.2.3 Definisi Proposisi Atom dan Struktur Kripke Perempatan dengan Skema Belok Kanan

Proposisi atom yang menunjukkan nyala lampu pada suatu set lampu lalu lintas di perempatan dengan skema belok kanan dapat ditulis dengan BNF berikut:

$$\langle \text{atom} \rangle_i ::= \langle T \rangle_i . \langle \text{warna_lampu} \rangle_i$$

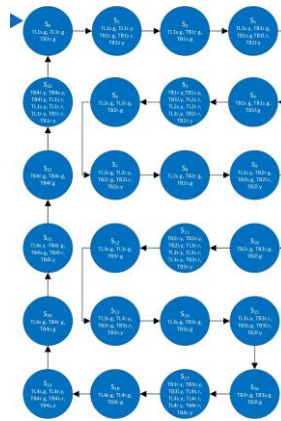
Kemudian $\langle T \rangle_i$ dan $\langle \text{warna_lampu} \rangle_i$ dijelaskan sebagai berikut:

$$\langle T \rangle_i ::= TL1r | TL1s | TL2r | TL2s | TL3r | TL3s | TL4r | TL4s |$$

$$TB1r | TB1s | TB2r | TB2s | TB3r | TB3s | TB4r | TB4s | TB4l$$

$$\langle \text{warna_lampu} \rangle_i ::= r | y | g$$

Ilustrasi dari struktur Kripke perempatan tanpa skema belok kanan dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 8: Struktur Kripke untuk perempatan dengan skema belok kanan

3.3 Translasi dari Spesifikasi Informal ke LTL

Pada subbab ini penulis secara formal mentranslasikan spesifikasi informal ke dalam bentuk NuSMV.

3.3.1 Translasi Spesifikasi untuk Keamanan

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi yang terdapat di pertigaan:

- 1. S4 Pada area yang sama, terdapat beberapa lampu hijau yang tidak boleh menyala bersama-sama (deskripsi lengkapnya telah dijelaskan pada halaman ??).

$$G \neg (TL1.g \wedge TB1s.g) \wedge G \neg (TL2.g \wedge TB2l.g) \wedge G \neg (TL3.g \wedge TB3l.g)$$

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi yang terdapat di perempatan tanpa skema belok kanan:

- 1. S4 Ketika lampu pertama dan ketiga berwarna merah, maka lampu kedua dan keempat harus berwarna hijau dan sebaliknya.

$$G ((TL1.r \wedge \neg TL1.y \wedge \neg TL1.g) \wedge (TL3.r \wedge \neg TL3.y \wedge \neg TL3.g)) \leftrightarrow (TL2.g \wedge TL4.g)$$

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi yang terdapat di perempatan dengan skema belok kanan:

- S4.2 Pada area 1–3 dan 2–4, terdapat beberapa lampu hijau tidak boleh menyala bersama-sama.

$$1. \varphi_5 = \neg (TBil.g \wedge TLjr.g) \wedge \neg (TBil.g \wedge TBjs.g) \wedge \neg (TBil.g \wedge TBjl.g)$$

$$\bigwedge_{hTi \in T} G (\varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \varphi_3 \wedge \varphi_4 \wedge \varphi_5)$$

Dengan $(i, j) \in \{(1, 3), (2, 4), (3, 1), (4, 2)\}$

3.3.2 Translasi Spesifikasi untuk Ketercapaian

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi ketercapaian yang terdapat di Subbab 3.1:

- 1. L1 Pada setiap set lampu, apabila satu-satunya lampu yang menyala berwarna merah, maka kondisi tersebut akan terus terjadi hingga set lampu tersebut berwarna merah dan kuning.

$$\varphi_1 = (Ti.r \wedge \neg Ti.y \wedge \neg Ti.g)$$

$$\varphi_2 = (Ti.r \wedge Ti.y)$$

$$\bigwedge_{Ti \in T} G (\varphi_1 \rightarrow \varphi_1 \cup \varphi_2)$$

3.3.3 Translasi Spesifikasi untuk Keadilan

Berikut ini adalah beberapa contoh dari spesifikasi keadilan yang terdapat di Subbab 3.1:

- 1. F1 Pada setiap set lampu, kondisi ketika satu-satunya lampu yang menyala berwarna hijau harus terjadi secara berkala..

$$\bigwedge_{Ti \in T} G F (Ti.g)$$

4 Verikasi Formal Model Sistem dan Analisis

Salah satu hasil verifikasi yang sudah penulis lakukan adalah menggunakan desain pertigaan. Berikut ini adalah hasil verifikasi pada pertigaan:



Gambar 9: Hasil verifikasi spesifikasi pertigaan.

5 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat penulis ambil dari pengerjaan tugas akhir ini adalah bahwa model formal untuk sistem lampu lalu lintas di persimpangan menggunakan jalur lawan arus pada bernilai benar. Hal ini membuktikan bahwa sistem transisi maupun formula LTL untuk spesifikasi keamanan, ketercapaian dan keadilan sudah sesuai dengan desain dan spesifikasi informal yang telah dibentuk.

6 Saran

Pada penelitian selanjutnya, formalisasi sistem jalur lawan arus di persimpangan menggunakan jalur lawan arus dapat menggunakan adaptive traffic signal, atau formalisasi sistem jalur lawan arus di persimpangan menggunakan jalur lawan arus menggunakan jeda waktu antar lampu lalu lintas.

Pustaka

[1] V. Vishal, S. Gugwad, and S. Singh, “Modeling and verification of agent based adaptive traffic signal using symbolic model verifier,” arXiv preprint arXiv:1208.3461, 2012.

[2] M. Huth and M. Ryan, Logic in Computer Science: Modelling and reasoning about systems. Cambridge university press, 2004.