Kode/Nama Rumpun Ilmu: 451/Teknik Elektro

# LAPORAN TAHUN TERAKHIR PENELITIAN HIBAH BERSAING



### PERANCANGAN DAN REALISASI MODEL SISTEM PENCAHAYAAN TEROWONGAN UNTUK KENDARAAN BERMOTOR

Tahun ke - 2 dari rencana 2 tahun

#### TIM PENELITI:

KETUA: IR. ENDAH SETYANINGSIH, MT NIDN: 0317076105 ANGGOTA: IR. JEANNY PRAGANTHA, M ENG. NIDN:0309096204

> UNIVERSITAS TARUMANAGARA November 2016

## HALAMAN PENGESAHAN

Judul : PERANCANGAN DAN REALISASI MODEL SISTEM

PENCAHAYAAN TEROWONGAN

Peneliti/Pelaksana

Nama Lengkap : Ir. ENDAH SETYANINGSIH M.T.

Perguruan Tinggi : Universitas Tarumanagara

NIDN : 0317076105
Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
Program Studi : Teknik Elektro
Nomor HP : 0817174808

Alamat surel (e-mail) : endah.setyaningsih@yahoo.com

Anggota (1)

Nama Lengkap : Ir. JEANNY PRAGANTHA M.Eng

NIDN : 0309096204

Perguruan Tinggi : Universitas Tarumanagara

Institusi Mitra (jika ada)

Nama Institusi Mitra : Alamat :

Penanggung Jawab : -

Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 2 dari rencana 2 tahun

Biaya Tahun Berjalan : Rp 50.000.000,00 Biaya Keseluruhan : Rp 124.500.000,00

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik<sup>s</sup> TARUM

Jakarta, 28 - 11 - 2016

Ketua,

(Prof. Dr. AGUSTINUS PURNA IRAWAN

ST., MT.) NIP/NIK 10398021 (Ir. ENDAH SETYANINGSIH M.T.) NIP/NIK 10388017

Menyetujui Ketua Lembaga Penelitian

(JAP TJI BENG, Ph.D) NIP/NIK 10381047

## **DAFTAR ISI**

]	Hal.
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	X
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang Masalah	1
1.2.Rumusan Masalah	3
1.3.Batasan Masalah	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Terowongan.	5
2.2 Pencahayaan Terowongan	6
2.2.1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pencahayaan Terowongan	13
2.2.2. Macam-macam Pengaturan Pencahayaan Terowongan	16
2.2.3. Jenis Lampu untuk Pencahayaan Terowongan	17
2.3. Model Sistem Pencahayaan Terowongan	18
2.3.1. Mikrokontoler	19
2.3.2 Modul Catu Daya	20
2.3.3. Modul Light Dependent Resistor	20
2.3.4. Modul Pendeteksi Kendaraan Bermotor	21
2.3.5. Light Emitting Dioda (LED)	21
BAB 3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	26
3.1 Tujuan Penelitian	26
3.2 Manfaat Penelitian	26
3.3 Urgensi Penelitian	27
BAB 4 METODE PENELITIAN	28

4.1. Tempat dan Waktu Pelaksanaan	28
4.2. Peralatan dan Bahan yang Dibutuhkan	28
4.3. Prosedur penelitian	28
4.4. Bagan Alir Penelitian	29
4.5. Realisasi Model Sistem Pencahayaan Terowongan	30
BAB 5 Hasil dan Luaran yang dicapai	32
5.1 Gambaran Umum Terowongan Pasar Rebo	32
5.2 Hasil Pengukuran dan Analisis Terowongan Pasar Rebo	34
5.3 Perancangan dan Realisasi Model Sistem Pencahayaan	
Terowongan	42
5.4 Hasil Pengujian dan Analisis Model Sistem Pencahayaan	
Terowongan Pasar Rebo	50
5.4.1 Hasil Pengujian Model Sistem Pencahayaan Terowongan Malam	
Hari	52
5.4.2 Hasil Pengujian Model Sistem Pencahayaan Terowongan Siang	
Hari	53
BAB 6 Kesimpulan dan Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	57
Lampiran 1 List program	58
Lampiran 2 Ketersediaan Sarana dan Prasarana Penelitian	61

## **DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1	Contoh pencahayaan dalam terowongan	Hal
Gambar 2.2	Area eksternal dan internal terkait desain pencahayaan	5
	terowongan	
Gambar 2.3	Lima Zona Terowongan	8
Gambar 2.4	Grafik luminansi pada zona threshold dan transisi	8
Gambar 2.5	Terowongan di jalan raya (scene 1,2,3), di daerah urban	9
	(scene 4,5,6) dan di pegunungan (scene 7,8)	
Gambar 2.6	Teknik Aplikasi cahaya lampu Terowongan	11
Gambar 2.7	Diagram Blok Model Sistem Pencahayaan Terowongan	17
Gambar 2.8	Rencana Pencahayaan Tiap Zona system yang dirancang.	19
Gambar 2.9	Diagram blok catu daya	19
Gambar 2.10	Contoh Bentuk LDR	20
Gambar 2.11	Contoh Bentuk Dioda Inframerah	21
Gambar 2.12	Proses Pemancaran Cahaya pada LED dan simbol LED	21
Gambar 2.13	Karakteristik Optik LED	22
Gambar 2.14	Grafik Intensitas Relatif Warna LED Terhadap Panjang	23
	Gelombang	23
Gambar 2.15	Grafil Arus Maju dan Pola Iluminansi LED	24
Gambar 2.16	Berbagai Bentuk LED	25
Gambar 4.1	Bagan Alir Penelitian	29
Gambar 4.2	Draft Teknologi Tepat Guna Model Sistem Pencahayaan	
	Terowongan untuk Kendaraan Bermotor	31
Gambar 5.2	Denah Rencana Pemasangan Lampu Terowongan Pasar	
	Rabu	34
Gambar 5.3	Terowongan Pasar Rebo	35
Gambar 5.4	Grafik Luminansi Terowongan Pasar Rebo Siang	38
Gambar 5.5	Grafik Luminansi Terowongan Pasar Rebo Malam	38
Gambar 5.6	Grafik Iluminansi Terowongan Pasar Rebo Malam	39
Gambar 5.7	Denah Hasil Dialux Terowongan Pasar Rebo	39

Gambar 5.8	Luminansi Hasil Dialux Terowongan Pasar Rebo Siang.				
Gambar 5.9	Luminansi Hasil Dialux Terowongan Pasar Rebo Siang				
Gambar 5.10	Grafik Pernyataan Persepsi Silau Terowongan Pasar				
	Rebo	4			
Gambar 5.11	Grafik Pernyataan Persepsi Terang Terowongan Pasar	4			
	Rebo	4			
Gambar 5.12	Tampak Warna Cahaya Lampu HPS dan Lampu LED				
Gambar 5.13	Diagram Blok Sesuai Modul Model Sistem				
	PencahayaanTerowongan				
Gambar 5.14	Skema Rangkaian Model Sistem Pencahayaan				
	Terowongan				
Gambar 5.15	Arduino Uno dan Pin-pin yang Tersedia				
Gambar 5.16	Hasil Rangkaian Model Sistem Pencahayaan				
	Terowongan				
Gambar 5.17	Desain Base Bawah dan Dinding model Terowongan				
Gambar 5.18	Tahapan Pembuatan Base Bawah dan Dinding Model				
	Sistem Terowongan				
Gambar 5.19	Desain dan Hasil Akhir Base, Dinding dan Atap				
Gambar 5.20	Bentuk Fisik RGB LED tipe WS281B				
Gambar 5.21	Pemasangan Untaian RGB LED pada Dinding Model				
	Terowongan				
Gambar 5.22	Test Program RGB LED				
Gambar 5.23	Desain Boks Selungkup untuk Simulasi Luar				
	Terowongan				
Gambar 5.24	Tampak Bagian Dalam Boks Selungkup				
Gambar 5.25	Hasil Akhir Boks Selungkup				
Gambar 5.26	Tampak Depan Model Terowongan dan Boks Selengkup				
Gambar 5.27	Tampak Bagian Dalam Model Terowongan				
Gambar 5.28	Rancangan Model Terowongan dan sensor LDR				
Gambar 5.29	Rancangan Model Terowongan dan sensor photodiode				
Gambar 5.30	Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan				

	malam hari tidak ada mobil	52
Gambar 5.31	Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan	
	malam hari ada mobil	53
Gambar 5.32	Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan	
	siang hari tidak ada mobil.	54
Gambar 5.33	Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan	
	siang hari ada mobil	55
Gambar 5.34	Uji intensitas cahaya dengan memberikan cahaya Hp	
	pada sensor LDR	56

## DAFTAR TABEL

		Hal
Tabel 2.1	Panjang zona akses zona threshold zona transisi untuk	
	penentuan adaptasi pencahayaan	9
Tabel 2.2	Luminansi (cd/m2) untuk zona interior pada terowongan	
	panjang	9
Tabel 2.3	Luminansi rata-rata (Cd/m2) untuk zona interior pada	
	terowongan untuk siang hari sesuai dengan kecepatan rencana	
	dan kepadatan lalu lintas	10
Tabel 2.4	Konversi Iluminansi rata-rata ke Luminansi rata-rata untuk	
	dinding terowongan	10
Tabel 2.5	Tingkat Luminansi rata-rata di permukaan jalan pada zona	
	threshold (Lth) yang disarankan pada terowongan untuk	
	kendaraan bermotor pada siang hari	11
Tabel 2.6	Pencahayaan pada zona threshold terowongan sesuai dengan	
	panjang geometri dan kepadatan lalu lintas	12
Tabel 2.7	Faktor Penyesuaian Pencahayaan pada Zona Threshold	12
Tabel 2.8	Kualitas Pencahayaan Normal (SNI)	13
Tabel 2.9	Karakteristik Pengaturan Pencahayaan Terowongan	16
Tabel 5.1	Perbandingan hasil pengukuran dan hasil simulasi terhadap	
	standar terowongan siang dan malam untuk terowongan	
	Pasar Reho	36

## DAFTAR LAMPIRAN

	Hal	
Lampiran 1	List Program.	59
Lampiran 2	Ketersediaan Sarana dan Prasarana Penelitian	62

#### **RINGKASAN**

Pencahayaan terowongan harus dirancang dengan baik, karena salah satu manfaatnya adalah untuk menjamin keselamatan dan keamanan pengguna kendaraan bermotor yang melewati terowongan tersebut. Salah satu caranya adalah dengan memberikan tingkat pencayahaan (iluminansi) dan luminansi sesuai standar untuk terowongan pada siang hari dan malam hari. Badan Standar Nasional pada tahun 2008 mengeluarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) menentukan standar untuk malam hari, namun untuk siang hari menggunakan standar internasional yaitu ANSI/IES Rp-22-11, 2011 dan CIE, 2004. Penelitian ini berupa perancangan model sistem pencahayaan terowongan untuk kendaraan bermotor, yang referensi datanya berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada tahun 2015. Referensi data yang digunakan adalah data terowongan Pasar Rebo yang menunjukkan bahwa pencahayaan di terowongan belum memenuhi standar untuk pencahayaan siang maupun malam hari. Iluminansi terowongan pada malam hari lebih besar dari standard dan pada siang hari iluminansi di semua zona tidak dibedakan. Pencahayaan terowongan siang hari harus mengikuti tinggi rendahnya cahaya matahari, untuk itu iluminansi di zona threshold ke zona exit harus turun secara bergradasi sesuai cahaya matahari. Hal ini bertujuan untuk mengurangi efek black hole, yaitu supaya mata pengguna kendaraan bermotor dapat berdaptasi dengan baik.

Perancangan model sistem pencahayaan terowongan ini mempunyai beberapa fitur yaitu pada malam hari iluminansi terowongan dirancang sesuai dengan iluminansi jalan raya diluar terowongan. Pada siang hari iluminansi di dalam terowongan mengikuti tinggi rendahnya cahaya matahari. Pada siang dan malam hari iluminansi saat tidak ada kendaraan bermotor yang melewati terowongan lebih kecil daripada saat ada kendaraan yang melewati terowongan. Hal ini dimaksudkan untuk penghematan pemakaian energi listrik, sesuai dengan program pemerintah (ESDM, 2012).

Berdasarkan model sistem pencahayaan terowongan yang telah direalisasikan diperoleh hasil sesuai dengan fitur yang direncanakan, sehingga memenuhi tujuan rancangan. Terdapat kelemahan dari model yang telah dibuat yaitu penggunaan RGB LED tidak dapat mewakili lampu aslinya (lampu LED). RGB LED yang digunakan tidak ada pengarah cahaya, sehingga pada lajur tengah tidak diperoleh iluminansi yang sama dengan lajur kanan dan kirinya dari 3 lajur yang dibuat dalam model terowongan ini. Seharusnya jalur tengah ini intensitasnya sama dengan jalur kanan dan kiri, sehingga *uniformity* dapat terpenuhi.

Kata Kunci: terowongan, iluminansi, luminansi, model sistem pencahayaan terowongan, standar pencahayaan terowongan.

#### BAB 1

#### **PENDAHULUAN**

#### 1.1. Latar Belakang Masalah

Terowongan merupakan salah satu infrastruktur yang dibangun agar lalu lintas menjadi lebih lancar dan aman untuk dilalui. Lalu lintas kendaraan yang padat menyebabkan kemacetan dan memperlama waktu yang dibutuhkan menuju tempat tujuan. Terowongan dibuat untuk mengalihkan lalu lintas yang melalui suatu persimpangan agar dapat memotong jalur lalu lintas lain dengan rekayasa elevasi. Perbedaan tingkat elevasi antara jalan umum dengan terowongan memungkinkan kedua jalur yang saling berpotongan pada bagian horizontal, tetapi berada pada level vertikal yang berbeda untuk dilalui sehingga lalu lintas mempunyai jalur masing-masing dan tidak saling mengganggu [CIE 88, 2004].

Terowongan pada siang hari secara umum memiliki tingkat pencahayaan alami yang berbanding terbalik dengan panjangnya, yaitu semakin panjang suatu terowongan maka semakin rendah tingkat pencahayaan alami pada bagian tengah terowongan tersebut. Luas bukaan, tinggi terowongan, orientasi bukaan, dan koefisien refleksi permukaan dalam terowongan juga ikut mempengaruhi tingkat pencahayaan alami terowongan [CIE 88,2004]. Intensitas cahaya matahari sangat tinggi, sementara terowongan sangat gelap, untuk itu perlu perancangan pencahayaan terowongan pada siang hari dengan baik. Sementara itu pada malam hari, diperlukan sistem pencahayaan buatan yang dapat dipergunakan sebagai sumber cahaya utama karena pencahayaan alami tidak tersedia. Perancangan pencahayaan yang baik untuk terowongan pada siang dan malam hari akan mengurangi/menghilangkan fenomena black hole, sehingga mata pengendara dapat beradaptasi dengan baik.

Pemerintah Daerah/Kotamadya dan PT. Jasa Marga Tbk bertanggung jawab dalam pengadaan penerangan terowongan sebagai bagian dari Penerangan Jalan Umum (PJU). PJU merupakan bentuk pelayanan kepada masyarakat u peningkatan keamanan dan keselamatan pengguna jalan, terowongan, dan lingkungan. Berdasarkan pengamatan pendahuluan di beberapa terowongan di DKI Jakarta, lampu dalam terowongan tersebut ada yang mati sehingga tidak sesuai dengan tingkat pencahayaan standar. Selain itu juga ditemui terowongan yang mempunyai tingkat pencahayaan berlebihan pada malam hari dan pada terowongan tersebut kurang diperhatikan pengaruh luminansi yang disebabkan oleh pemantulan berulang dari permukaan jalan, dinding dan atap terowongan. Hal ini akan

membuat pengendara kendaraan yang memasuki terowongan menjadi silau. Kekurangan atau kelebihan tingkat pencahayaan dan luminansi dapat berbahaya karena secara tidak langsung akan mengganggu konsentrasi pengemudi kendaraan. Akibat terburuk tentu saja dapat terjadi kecelakaan lalu lintas. Perhatian utama untuk pencahayaan terowongan adalah pada siang hari. Pencahayaan terowongan pada siang hari harus dapat mengikuti tinggi rendahnya cahaya matahari. Pencahayaan zona akses atau di daerah adaptasi kendaraan bermotor memperoleh pencahayaan dari matahari, namun zona *threshold* (zona awal) yang sudah menjadi bagian dari terowongan merupakan zona dengan pencahayaan yang paling tinggi dibandingkan dengan zona lainnya, untuk memberikan kesempatan mata pengendara mulai beradaptasi saat akan memasuki terowongan. Selanjutnya pencahayaan harus menurun secara bergradasi hingga ke zona interior, dan naik lagi saat akan mendekati zona keluar. Hal ini disebabkan mata pengendara harus segera beradaptasi dengan cahaya matahari saat akan meninggalkan terowongan.

Jarak daerah adaptasi sebelum memasuki terowongan ditentukan berdasarkan kecepatan rencana kendaraan bermotor yang akan melewati terowongan. Makin tinggi kecepatan rencana, maka makin jauh jarak daerah adaptasi tersebut. Demikian juga untuk jarak pada zona threshold dan zona transisi. Sementara itu jumlah kendaran yang melewati terowongan mempengaruhi besarnya tingkat pencahayaan di dalam terowongan. Makin banyak jumlah kendaraan bermotor yang melewati suatu terowongan, maka makin tinggi tingkat pencahayaan (iluminnansi) dan luminansi terowongan tersebut.

Selama ini Dinas PJU maupun PT Jasa Marga melakukan perawatan lampu jalan raya dan terowongan secara manual yaitu dengan mensurvei jalan raya dan terowongan secara berkala. Jika ditemui ada lampu yang mati maka lampu tersebut diperbaiki atau diganti. Lampu yang mati berakibat pada kurangnya tingkat pencahayaan dalam terowongan. Masalah disini adalah, lampu dapat mati kapan saja, dan penggantiannya tidak selalu sesuai dengan spesifikasi lampu yang mati. Berdasarkan pengamatan pendahuluan, juga ditemukan bahwa lampu di dalam terowongan ada yang menyala selama 24 jam terus menerus, pada siang maupun malam hari. Sementara itu pencahayaan terowongan pada malam hari tidak harus sama dengan siang hari. Pencahayaan siang hari harus jauh lebih besar dari pada malam hari. Jadi pada malam hari tingkat pencahayaan harus diturunkan sehingga tidak jauh berbeda dengan pencahayaan di jalan sebelum maupun sesudah terowongan. Untuk itu pada malam hari, sebagian lampu terowongan harus dapat mati secara otomatis sehingga tingkat pencahayaan lebih kecil dibandingkan jika pada siang hari.

Untuk membantu meningkatkan kualitas sistem PJU di DKI Jakarta, perawatan dan pemantauan kualitas tingkat pencahayaan dapat dilakukan secara otomatis. Berdasarkan pemikiran tersebut, maka dirancang suatu sistem pemantauan terowongan yang otomatis. Sistem otomatis ini menggunakan laser dan fototransistor sebagai pendeteksi kendaraan, sehingga lampu terowongan dapat menyala secara otomatis ketika ada kendaraan yang akan masuk ke terowongan. *Light dependent resistor* juga digunakan sebagai sensor pedeteksi tingkat pencahayaan alami agar banyaknya lampu yang menyala dapat diatur sedemikian rupa hingga mencapai tingkat pencahayaan standar, selain itu adanya pengaturan pencahayaan matahari yang masuk ke terowongan dapat mengurangi perubahan cahaya yang secara mendadak antara luar dan dalam terowongan, sehingga mata dapat melakukan adaptasi dengan baik. Perancangan awal menggunakan perangkat lunak Dialux untuk merancang tingkat pencahayaan (iluminansi) dan luminansi dalam terowongan sesuai Standar Nasional Indonesia yaitu sebesar 20 lux – 25 lux dan luminansi 2 cd/m² [SNI, 2008] atau standar internasional.

Berdasarkan hasil survei yang dilakukan, maka akan dirancang dan direalisasikan suatu model sistem pencahayaan terowongan yang dapat melakukan pengaturan jumlah lampu yang menyala secara otomatis agar memenuhi tingkat pencahayaan dan luminansi sesuai SNI dan bila terowongan dilalui kendaraan maka lampu terowongan akan menyala secara otomatis dan akan mati jika tidak dilalui kendaraan, hal ini dimaksudkan untuk melakukan penghematan penggunaan listrik dari PLN. Selain itu model sistem ini juga akan mempertimbangkan juga pengaruh cahaya matahari terhadap terowongan pada siang hari, sehingga diharapkan pengguna kendaraan bermotor dapat beradaptasi dengan baik.

#### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan studi pendahuluan dan pengamatan yang telah dijelaskan dalam latar belakang masalah, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana luminansi dan iluminansi pada zona *threshold*, zona transisi dan zona interior pada terowongan di DKI Jakarta pada siang hari dan malam hari?
- b. Bagaimana membuat model untuk mengatur pencahayaan terowongan pada siang hari dan malam hari?
- c. Bagaimana membuat sistem pengaturan pencahayaan secara otomatis sehingga diharapkan dapat menghemat energi listrik?

#### 1.3 Batasan Masalah

- Di DKI Jakarta terdapat banyak terowongan/underpass, dan yang terbanyak ada di wilayah Jakarta Timur, karena wilayah ini banyak jalan yang berpotongan dengan wilayah luar DKI, yaitu Bekasi dan Bogor. Terowongan ada yang berada di jalan arteri dan kolektor, namun banyak juga yang ada di sepanjang jalan tol. Terowongan yang ada di wilayah Jakarta Timur yaitu terowongan Cibubur dan beberapa terowongan di sepanjang jalan tol lingkar luar Jakarta (JORR), yaitu terowongan Pasar Rebo, terowongan Ampera, terowongan Rancho dan terowongan Merdeka. Terowongan yang terpanjang adalah terowongan Pasar Rebo, sehingga data-data terowongan ini digunakan sebagai referensi.
- Batasan lainnya yaitu: model sistem pencahayaan terowongan ini mempunyai panjang 120 cm, tinggi 20 cm dan lebar 14,5 cm. Model terowongan untuk satu jalur kendaraan. Pada jalur ini terdiri dari 3 jalur, dengan lebar masing-masing 3,5 cm, dan bahu jalan 2 cm dan jarak lajur 3 ke dinding terowongan 2 cm.
- Sebagai simulasi untuk cahaya matahari digunakan lampu pijar 100 watt yang diletakkan pada atap dari boks selungkup model sistem terowongan. Panjang boks selungkup adalah 150 cm.

#### BAB 2

#### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Terowongan

Terowongan adalah jalan yang sekelilingnya tertutup oleh struktur, umumnya elevasi jalan tersebut di bawah permukaan tanah [Departemen PU, 2009]. Kata terowongan dalam bahasa Indonesia mempunyai 2 padanan kata dalam bahasa Inggris yaitu *underpass* dan *tunnel*. Kata *underpass* berarti struktur yang panjang dan konfigurasi fisiknya tidak membatasi pengemudi untuk melihat objek di dalam struktur. Biasanya tidak diperlukan pencahayaan pada siang hari karena panjang *underpass* umumnya kurang dari 25 m [IESNA, 2005]. Kata *tunnel* diartikan sebagai penutup jalan, baik yang alami maupun yang buatan manusia, yang di dalamnya pencahayaan alami terhalang sedemikian rupa sehingga pengemudi tidak dapat melihat [IESNA, 2005]. Dalam penelitian ini, kata terowongan lebih dipadankan pada kata *tunnel* dalam bahasa Inggris.

Terowongan dapat dibagi menjadi "terowongan panjang" dan "terowongan pendek" berdasarkan kejelasan pandangnya. Terowongan pendek adalah terowongan yang jalan keluarnya terlihat jelas dari suatu titik tepat di muka jalan masuk terowongan, saat tidak ada kendaraan yang melintas. Biasanya panjang terowongan pendek dibatasi sampai 75 meter [CIE, 2004]. Pada siang hari terowongan pendek umumnya tidak membutuhkan sistem pencahayaan karena masuknya cahaya matahari di siang hari dari kedua sisi terowongan pendek, ditambah efek siluet dari terang cahaya ujung terowongan yang lain, secara umum menjamin jarak pandang yang memuaskan. Contoh pencahayaan terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Contoh pencahayaan dalam terowongan [Thorn, 2004]

Sebaliknya pada terowongan panjang, pengemudi tidak dapat melihat ujung keluar dari terowongan. Terowongan yang panjangnya kurang dari 75 m tetapi jalurnya tidak lurus sehingga pengemudi tidak dapat melihat ujung keluar terowongan, didefinisikan sebagai

terowongan panjang. Untuk itu dari segi pencahayaan *Commision International de L'Ecclairage* (CIE), pada tahun 2004, membagi panjang terowongan menjadi 3 katagori yaitu [CIE, 2004]:

- 1. Terowongan pendek; panjang terowongan kurang dari 75 m, biasanya tidak memerlukan pencahayaan buatan pada siang hari, tetapi jika sinar matahari tidak mencukupi, perlu ditambahkan cahaya buatan di tengah terowongan.
- 2. Terowongan panjang secara geometris: terowongan yang panjangnya lebih dari 75 m sehingga memerlukan pencahayaan buatan di dalam terowongan
- 3. Terowongan panjang secara optikal: terowongan yang panjangnya kurang dari 75 m tetapi pengemudi tidak dapat melihat ujung keluar dari terowongan sehingga memerlukan pencahayaan buatan.

#### 2.2. Pencahayaan Terowongan

Tujuan dasar pencahayaan terowongan adalah untuk memberikan jarak pandang yang cukup dan nyaman bagi pengguna terowongan sehingga pengguna terowongan dapat melalui terowongan dengan aman, baik di siang hari maupun di malam hari [CIE, 2004]. Untuk mencapai tujuan tersebut, ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan [Nordick Vejteknisk Forbund, 1995]:

- 1. Pencahayaan harus memberikan tingkat iluminansi yang cukup dan merata pada pengemudi di sepanjang terowongan baik pada kondisi kering maupun basah.
- 2. Sudut datangnya cahaya lampu relative terhadap penglihatan pengemudi, harus memberikan tingkat penglihatan yang tinggi terhadap marka jalan dalam semua kondisi cuaca.
- 3. Bagian bawah terowongan juga harus mempunyai tingkat pencahayaan yang cukup
- 4. Pencahayaan tidak boleh menimbulkan silau (*glare*)
- 5. Pencahayaan tidak boleh berkedip-kedip (*flicker*)

Selain hal tersebut, perlu dipertimbangkan juga kemampuan mata manusia dalam mengadaptasi perubahan tingkat pencahayaan dari terang ke gelap tidak secepat mengadaptasi perubahan tingkat pencahayaan dari gelap ke terang. Hal ini yang disebut sebagai kondisi *black out*. Dengan memperhatikan hal-hal di atas, tingkat pencahayaan pada terowongan panjang dibagi menjadi 5 zona yang berbeda, seperti pada Gambar 2.2 [ANSI/IES Rp-22-11, 2011] dan Gambar 2.3 [CIE, 2004]. Panjang zona akses, zona

threshold, dan zona transisi untuk penentuan adaptasi pencahayaan dapat dilihat pada Tabel 2 [NPRA, 2004]. Pembagian 5 (lima) zona untuk terowongan adalah:

#### 1. Zona akses

Zona akses adalah bagian dari jalan yang menuju mulut terowongan. Pada zona inilah pengemudi dapat melihat adanya terowongan. Tingkat pencahayaannya sama dengan tingkat pencahayaan lingkungan di luar terowongan.

#### 2. Zona threshold

Zona *threshold* adalah bagian dari jalan tempat pengemudi dapat melihat ke dalam terowongan. Panjang zona *threshold* sama dengan panjangnya zona berhenti kendaraan (*stopping distance*), sehingga tergantung dari kecepatan kendaraan maksimum yang diijinkan di dalam terowongan. Semakin tinggi kecepatan kendaraan yang melintas, maka zona inipun semakin panjang. Pengemudi yang berada di zona akses harus dapat mendeteksi rintangan-rintangan di zona *threshold* sebelum pengemudi memasuki terowongan. Gambar 2.3 menunjukkan jarak berhenti yang aman di permukaan jalan yang basah sebagai sebuah fungsi kecepatan kendaraan dan gradien jalan. Tingkat pencahayaan pada zona *threshold* secara gradual berkurang (lihat Gambar 2.4).

Rumus yang digunakan untuk menghitung tingkat pencahayaan di zona threshold:

$$L_{\text{th}} = \frac{L_{\text{m}}}{\frac{1}{C_{\text{m}}} \left(\frac{\rho}{\pi \cdot q_{\text{c}}} - 1\right) - 1}$$
 (2.1)

dengan

$$L_{\rm m} = \frac{\left(\tau_{\rm ws} \cdot L_{\rm atm} + L_{\rm ws} + L_{\rm seq}\right)}{\left(\tau_{\rm ws} \cdot \tau_{\rm atm}\right)}$$

C<sub>m</sub> = minimum kontras penglihatan, untuk kasus ini ditetapkan 28%

 $\rho$  = faktor refleksi penghalang, ditetapkan sebesar 0.2

 $q_c$  = koefisien kontras, perbandingan antara luminansi permukaan jalan dan vertikal iluminansi

 $\tau_{ws}$  = faktor transmisi dari kaca depan mobil

 $L_{atm}$  = Luminansi dari atmosfir

Lws = Luminansi dari kaca depan kendaraan

L<sub>seq</sub> = luminansi ekuivalen dari selubung terowongan, cd/m2

#### 3. Zona transisi

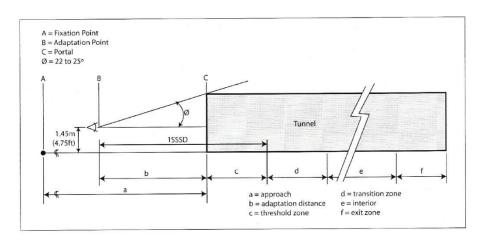
Zona transisi adalah zona tempat terjadinya transisi tingkat pencahayaan, yang semula relatif tinggi di zona *threshold* kemudian menjadi jauh lebih rendah di zona *interior*. Transisi tingkat kuat pencahayaan ini terjadi secara bertahap. Panjang zona ini adalah

fungsi dari kecepatan lalu-lintas maksimum yang telah ditentukan dan perbedaan tingkat pencahayaan antara akhir zona *threshold* dan awal zona *interior* (lihat Gambar 2.4).

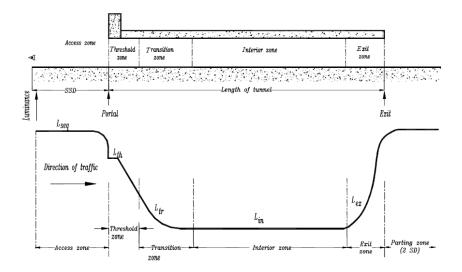
#### 4. Zona interior

Zona *interior*, sesuai dengan namanya, zona ini adalah bagian terowongan yang tidak mendapat pengaruh cahaya matahari. Penglihatan pengemudi, pada zona ini, hanya diberikan oleh pencahayaan buatan. Zona interior memiliki satu sifat khusus yaitu tingkat pencahayaan yang konstan di seluruh zona. Tingkat pencahayaan di zona ini dapat dilihat pada Tabel 2.1 [CIE, 2004] atau Tabel 2.2 [ANSI/IES Rp-22-11, 2011].

5. Zona Keluar (*exit*) adalah zona paling akhir tempat pengemudi keluar dari terowongan, tingkat pencahayaan pada zona ini secara linier meningkat sehingga mencapai tingkat cahaya alami di luar terowongan.

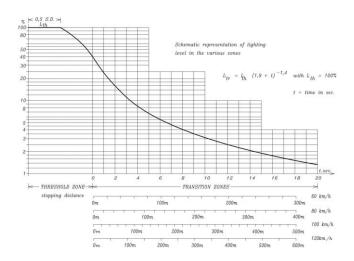


Gambar 2.2 Area eksternal dan internal terkait dengan desain pencahayaan terowongan [ANSI/IES Rp-22-11,2011].



Gambar 2.3 Lima Zona Terowongan [CIE, 2004]

Tingkat pencahayaan untuk terowongan dinyatakan dalam nilai-nilai horisontal ratarata jalan raya pada kondisi yang minimum. Pemantulan dinding sebesar 70% atau lebih dan penggunaan luminer (rumah lampu) yang menerangi jalan dan dinding, akan menghasilkan tingkat pencahayaan horisontal sesuai ketentuan sehingga jarak pandang akan memuaskan atau cukup baik. Pada kondisi inilah, tingkat pencahayaan horisontal juga akan memberikan tingkat pencahayaan vertikal yang cukup.



Gambar 2.4. Grafik luminansi pada zona threshold dan transisi [CIE, 2004]

Tabel 2.1 Panjang zona akses zona threshold zona transisi untuk penentuan adaptasi pencahayaan (NPRA, 2004)

Kecepatan rencana	Panjang zona akses	Panjang zona threshold	Panjang zona transisi
(Km/jam)	(m)	(m)	(m)
50	45	40	70
60	60	50	80
70	80	60	100
80	100	70	110
90	130	75	120

Tabel 2.2 Luminansi (cd/m²) untuk zona interior pada terowongan panjang [CIE, 2004]

Stopping Distance	Long Tunnel			
(m)	Traffic flow [vehicles/hour/lane]			
	Low Heavy			
160 m	6	10		
60 m	3	6		

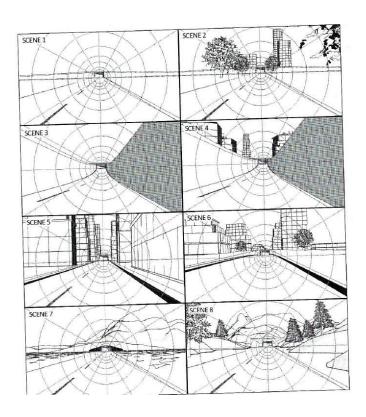
Tabel 2.3 Luminansi rata-rata (Cd/m²) untuk zona interior pada terowongan untuk siang hari sesuai dengan kecepatan rencana dan kepadatan lalu lintas [ANSI/IES Rp-22-11,2011].

Recommended Daytime Interior Zone Average Pavement Luminance (in cd/m²)						
Kecepatan rencana	Kepadatan lalu lintas					
	< 2,400 AADT >2,400 AADT >24,000 AADT					
	< 24,000 AADT					
100 km/h (60 mph)	6	8	10			
80 km/h (50 mph)	4	6	8			
60 km/h (40 mph)	3 4 6					

Tabel 2.4 Konversi Iluminansi rata-rata ke Luminansi rata-rata untuk dinding terowongan (WEa x faktor konversi = WLa) [ANSI/IES Rp-22-11,2011].

WE <sub>a</sub> = Illuminance Average Wall (lux)	10% (0.10) Wall Reflectance Conversion Factor = 0.032	
	20% (0.20) Wall Reflectance Conversion Factor = 0.064	
	30% (0.30) Wall Reflectance Conversion Factor = 0.095	WL <sub>a</sub> = Luminance Average Wall (cd/m <sup>2</sup> )
	40% (0.40) Wall Reflectance Conversion Factor = 0.127	VVLa = Eulilliance Average vvali (cum)
	50% (0.50) Wall Reflectance Conversion Factor = 0.159	
	60% (0.60) Wall Reflectance Conversion Factor = 0.190	

Pencahayaan pada zona threshold terowongan tergantung dari lingkungan sekitar terowongan itu berada. Lingkungan ini akan menentukan penetrasi cahaya siang hari. Lingkungan sekitar terowongan dapat berupa jalan raya (open road), pegunungan dan daerah perkotaan, seperti terlihat pada Gambar 2.5. Tingkat Luminansi rata-rata zona threshold yang disarankan pada siang hari sesuai lingkungan sekitar terowongan dapat dilihat pada Tabel 2.5. Pencahayaan pada zona threshold terowongan selain tergantung pada lingkungan terowongan, juga tergantung dari panjang, geometri dan kepadatan lalu lintas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.6 [Thorn, 2004 dan CIE 88 2004] atau Tabel 2.7 [ANSI/IES Rp-22-11, 2011]. Tabel 2.6 sama dengan Tabel 2.7, namun dibuat dengan nilai persentase berdasarkan tingkat pencahayaan normal pada zona threshold (lihat Tabel 2.5). Tabel 2.8 adalah standar pencahayaan SNI.



Gambar 2.5 Terowongan di jalan raya (scene 1,2,3), di daerah urban (scene 4,5,6) dan di pegunungan (scene 7,8) [ANSI/IES Rp-22-11, 2011].

Tabel 2.5 Tingkat Luminansi rata-rata di permukaan jalan pada zona threshold (Lth) yang disarankan pada terowongan untuk kendaraan bermotor pada siang hari [ANSI/IES Rp-22-11, 2011].

Suggested Daytime Maintained Average Pavement Luminance Levels							
	in the Threshold Zone of Vehicle Tunnels (Lth)						
Approach	Traffic Speed Driver Direction						
Characteristics							
	Km/h	mph	North	East-West	South		
				cd/m <sup>2</sup>			
Open Road	100	60	250	310	370		
Scene 1,2,3	80	50	220	260	320		
	60	40	180	220	270		
Urban Tunnel	100	60	320	280	310		
Scene 4,5,6	80	50	280	240	270		
	60	40	230	200	220		
Mountain Tunnel	100	60	230	200	200		
Scene 7,8	80	50	200	170	170		
	60	40	170	140	140		

Tabel 2.6 Pencahayaan pada zona threshold terowongan sesuai dengan panjang, geometri dan kepadatan lalu lintas [Thorn, 2004]

Length of tunnel	<25m			25-75m					75-1	125m			>125n
Is exit fully visible when viewed from stopping distance in front of tunnel?	is.	yes	yes	no	no	no	yes	yes	no	no	no	no	27
ls daylight penetration good or poor?	- 3	150		good	good	poor	-	-	good	good	good	poor	
Is wall reflectance high (>0.4) or low (<0.2)?		1150		high	low	15	-	*	high	high	low	*	
ls traffic heavy (or does it include cyclists or pedestrians) or light?	12	light	heavy	light	.5	·	light	heavy	light	heavy	-	÷:	7
Lighting required		•	1		•	0	•	0	•	0	0	0	

Tabel 2.7 Faktor Penyesuaian Pencahayaan pada Zona Threshold [ANSI/IES Rp-22-11, 2011]

			Ujung t	erowongai	n keluar 1	erlihat	Ujung	terowong	an kelu	ar tidak
Votagori Voluma		D	dari zona threshold				terlihat dari zona threshold			
Kategori	Volume lalulintas	Peng	Pen	Penetrasi cahaya siang hari			Penetrasi cahaya siang hari			
terowo	(AADT)	guna	Ва	Bagus Kurang		Bagus		Κι	Kurang	
ngan	(AADI)	sepeda	Reflektansi		si dindin	g		Reflektansi dinding		
			Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah
< 25 m	< 25 m Ada Ada		0% (pe	encahayaa	n zona th	reshold	0% (pencahayaan zona threshold			
< 23 III				tidak dib	utuhkan)		tidak dibutuhkan)			
	< 15000	Tidak	0%	50%	50%	50%	50%	50%	100%	100%
25 - 75		Ya	0%	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%
m	> 15000	Tidak	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%
		Ya	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%
	< 15000	Tidak	50%	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%
76 – 125		Ya	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%
m	> 15000	Tidak	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Ya	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
> 125 m	Ada	Ada		100	0%	•		100	0%	

- Reflektansi dinding rendah <30%
- Reflektansi dinding tinggi >30%
- 100% = tingkat pencahayaan normal zona threshold
- 50% = 50% dari tingkat pencahayaan normal zona threshold
- AADT = Rata-rata lalu lintas harian tahunan (*Average Annual Daily Traffic*)

Tabel 2.8 Kualitas Pencahayaan Normal [SNI, 2008]

		encahayaan minansi)	ı	Luminar	Batasan silau			
Jenis/ klasifikasi jalan	E Komorataan		L rata-rata (cd/m2)		merataan niformity)	G	TJ (%)	
			(CU/III2)	VD	VI		(70)	
Trotoar	1 - 4	0,10	0,10	0,40	0,50	4	20	
Jalan lokal : - Primer - Sekunder	2 - 5 2 - 5	0,10 0,10	0,50 0,50	0,40 0,40	0,50 0,50	4 4	20 20	
Jalan kolektor : - Primer - Sekunder	3 - 7 3 - 7	0,14 0,14	1,00 1,00	0,40 0,40	0,50 0,50	4 - 5 4 - 5	20 20	
Jalan arteri : - Primer - Sekunder	11 - 20 11 - 20	0,14 - 0,20 0,14 - 0,20	1,50 1,50	0,40 0,40	0,50 - 0,70 0,50 - 0,70	5-6 5-6	10 - 20 10 - 20	
Jalan arteri dengan akses kontrol, jalan bebas hambatan	15 - 20	0,14 - 0,20	1,50	0,40	0,50 - 0,70	5-6	10 - 20	
Jalan layang, simpang susun, terowongan	20 - 25	0,20	2,00	0,40	0,70	6	10	

- Keterangan: g1 = Emin/Emaks, VD = Lmin/Lmaks, V1 = Lmin/Lrata-rata,
- G = Silau (Glare) dan TJ = Batas ambang kesilauan

#### 2.2.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pencahayaan dalam Terowongan

Pencahayaan terowongan di siang hari berbeda dari pencahayaan terowongan di malam hari. Namun secara umum pencahayaan terowongan ditentukan oleh faktor-faktor berikut ini [Philips, 1993]:

#### 1. *Lighting Control* (kontrol pencahayaan)

Luminansi yang dihasilkan oleh pencahayaan terowongan haruslah memenuhi standar prosentase dari luminansi zona akses.Luminansi zona akses juga berubah mengikuti perubahan kondisi sinar matahari di luar. Hal ini menyebabkan munculnya fasilitas switching otomatis yang memungkinkan pengaturan level pencahayaan buatan di sepanjang terowongan sehingga rasio luminansi threshold terhadap luminansi akses tidaklah berubah. Photocells memantau tingkat iluminansi di muka terowongan secara terus menerus. Photocells akan menghasilkan sinyal yang menjadi masukan untuk mengatur switching pencahayaan. Switching sendiri dapat dilakukan secara terus menerus

(kontinyu) maupun bertahap (*stepwise*). Pemantauan luminansi akses secara langsung dengan sebuah *photometer* lebih disukai karena pengaturan *switching* menjadi lebih akurat untuk berbagai kondisi, seperti kondisi basah, kering, diliputi salju, dan lainnya. Sebuah *photometer* dapat mengkompensasi kurangnya perawatan (*maintenance defects*). Demi alasan kenyamanan dan ekonomi, penurunan tingkat pencahayaan tidak boleh dilakukan dengan skala 3:1. Sedangkan kenaikan tingkat pencahayaan dapat dilakukan dengan skala maksimum 5:1. Beberapa langkah *switching* juga dapat dihilangkan untuk menghemat energi. Terobosan ini hanya dapat dilakukan jika diketahui banyaknya sinar matahari sebagai fungsi waktu di lokasi tertentu.

#### 2. *Glare* (silau)

Glare mengurangi jarak pandang sehingga glare harus diminimalisasi. Ukuran glare, yang disebut *Treshold Increment* (TI), harus bernilai kurang dari 15 persen untuk semua zona, terkecuali zona *exit* pada saat matahari bersinar. Jika luminansi rata-rata dari trotoar dan dinding yang membentuk *background* bernilai tidak lebih dari 5 cd/m2 maka formula yang digunakan untuk menghitung *glare* adalah sebagai berikut:

$$TI = 65 L_v/(L_{av})^{0.8}$$
 .....(2.2)

Jika luminansi rata-rata dari trotoar dan dinding yang membentuk *background* bernilai lebih dari 5 cd/m2 maka formula yang digunakan untuk menghitung *glare* adalah sebagai berikut:

$$TI = 95 L_v/(L_{av})^{0.8}$$
 .....(2.3) dengan:

 $L_v$  = luminansi veiling yaitu luminansi tabir cahaya yang disebabkan oleh glare

 $L_{av}$  = luminansi rata-rata permukaan jalan

TI = threshold increment (ukuran glare yang digunakan)

Luminansi *veiling* disini dihasilkan oleh semua *luminaire* di lokasi dengan sudut 20 derajat dari horisontal.

#### 3. *Uniformity* (kemerataan)

Permukaan jalan dan dinding terowongan harus memiliki kemerataan luminansi yang baik supaya keduanya dapat membantu pendeteksian rintangan-rintangan pada jalur kendaraan dalam terowongan. Jalan dan dinding setinggi 2 meter sebaiknya memiliki rasio luminansi keseluruhan ( $L_{min}/L_{av}$ ) lebih besar dari 0,4. Luminansi rata-rata pada dinding tidak boleh lebih rendah daripada luminansi rata-rata pada jalan yang berbatasan dengannya, tanpa menghilangkan garis-garis lantai pada jalan (kerb). Rasio luminansi longitudinal sepanjang garis tengah setiap jalur ( $L_{min}/L_{max}$ ) harus bernilai lebih besar

dari 0,6. Keseragaman yang terlalu tinggi untuk jarak yang jauh tidaklah disarankan karena dapat menyebabkan keletihan pada pengemudi (fatigue) dan juga menyebabkan hilangnya kontras.

#### 4. *Flicker* (kilatan cahaya)

Luminaire yang dipasang pada baris yang berselang-seling di sepanjang terowongan dapat menghasilkan *flicker* di mata pengemudi. Flicker disebabkan oleh cahaya dari *luminaire* sendiri dan oleh pantulan cahaya *luminaire* pada permukaan-permukaan yang bersinar, seperti : tubuh penutup mesin kendaraan (*bonnet of a vehicle*), dan dan bagian belakang mobil lain yang sedang diikuti.

Flicker yang mengganggu pengemudi akan tergantung pada ketiga faktor berikut ini [4]:

- a. Perbedaan luminansi dalam satu siklus tunggal
- b. Jumlah perubahan luminansi yang terjadi tiap detik (flicker frequency)
- c. Waktu total terjadinya flicker

Faktor pertama di atas tergantung pada karakteristik optik dari *luminaire* yang digunakan. Kedua faktor lainnya tergantung pada kombinasi dari kecepatan kendaraan, jarak antar *luminaire*, dan panjang terowongan. Gangguan yang disebabkan oleh *flicker* pada umumnya dapat diabaikan pada frekuensi di bawah 2,5 Hz dan di atas 15 Hz. Frekuensi *flicker* dirumuskan sebagai berikut [2]:

Frekuensi 
$$flicker$$
 (Hz) =  $\underline{\text{kecepatan lalu-lintas (meter/detik)}}$  ......(2.4) jarak antar  $luminaire$  (meter)

Untuk pencahayaan terowongan pada malam hari, pemecahan masalahnya lebih sederhana karena berasal dari pencahayaan buatan seluruhnya. Ada 2 hal yang perlu dipertimbangkan [CIE, 2004]:

- 1. Jika terowongan adalah bagian dari jalan raya yang diberi penerangan maka kualitas cahaya di dalam terowongan sedikitnya harus sama dengan kualitas cahaya di luar terowongan, sehingga membentuk tingkat pencahayaan yang *uniform*. Kemerataan pencahayaan ini sama dengan kemerataan pencahayaan dalam terowongan pada siang hari
- 2. Jika terwongan bukan merupakan bagian dari jalan raya yang diterangi, maka luminansi di permukaan jalan raya minimal sebesar 1 cd/m2. Kemerataan menyeluruh sekurangnya 40% dan kemerataan longitudinal sekurangnya adalah 60%.

## 2.2.2. Macam-macam pengaturan pencahayaan terowongan dan teknik aplikasi cahaya lampu terowongan

Ada beberapa pengaturan susunan lampu dalam terowongan untuk mencapai tingkat pencahayaan yang sesuai yaitu [Thorn, 2004]:

- 1. *Ceiling mounting*, yaitu pemasangan luminair di sepanjang atap/*ceiling* terowongan, bisa dipasang pada 1 line maupun 2 line.
- 2. *Wall mounting*, yaitu pemasangan luminer di sepanjang dinding terowongan, biasanya dipasang dalam 2 line dikiri dan kanan terowongan.

Karakteristik serta kelebihan dan kekurangan dari masing-masing pengaturan lampu dapat dilihat pada Tabel 2.9.

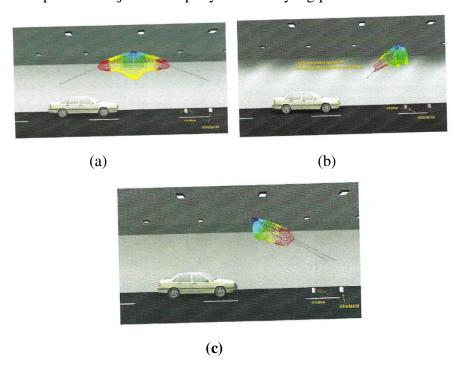
Tabel 2.9 Karakteristik pengaturan pencahayaan terowongan [Thorn, 2004]

	Mounting constraint	Arrangement type	Advantages	Disadvantages	Tunnel profile
Ceiling	Enough spacing above legal and	Above road on several rows	- best utilisation factor for luminaires - glare limited	- luminaires concealed by signs - heavy fixings	- Arched type with or without fan tubes
mounting	ounting protection and minimum height 1 row above road - less investment - and maintenance	- closure of carriageway required	- Framed type with or without fan tubes		
Wall	Not enough spacing above legal and	acing above		- utilisation factor downgraded - high glare	- Arched type with fan tubes
mounting	protection minimum height	Single sided	- less investment and maintenance	- beware trucks blocking light	- Framed type with or without fan tubes

Teknik Aplikasi cahaya lampu ditentukan oleh luminer yang akan menentukan distribusi pencahayaan di terowongan. Terdapat 3 (tiga) teknik aplikasi cahaya, yang dapat dilihat pada Gambar 2.6 [ANSI/IES Rp-22-11, 2011] yaitu:

- a. Symmetrical Light Distribution (Gambar 2.6 a), distribusi cahaya simetri.
- b. Asymmetrical Light Distribution Negative Contract (ALD-NC) dikenal juga sebagai Counterbeam Lighting (CBL) seperti pada Gambar 2.6 b, distribusi cahaya dominan menuju ke pengendara kendaraan, luminansi diermukaaan jalan tinggi, arah cahaya searah kendaraan diminimalkan dan meningkatkan kontras negatif.
- c. Asymmetrical Light Distribution Positive Contrast (ALD-PC) dikenal juga sebagai Pro-beam Lighting (PBL) seperti Gambar 2.6 c, arah cahaya dominan

searah dengan lalu lintas, luminansi kea rah obyek tinggi dan luminansi di permukaan jalan mempunyai kontras yang positif.



Gambar 2.6 Teknik Aplikasi cahaya lampu Terowongan

#### 2.2.3. Jenis Lampu untuk Pencahayaan Terowongan

Karakteristik udara dalam terowongan berbeda dengan karakteristik udara di jalan raya biasa. Di dalam terowongan, konsentrasi gas buang kendaraan akan lebih tinggi dari jalan raya biasa karena pertukaran udara lebih lamban dibanding dengan jalan raya biasa. Dengan demikian lampu penerangan yang digunakan juga harus lebih tahan terhadap zat-zat berbahaya yang dikandung dalam gas buang kendaraan seperti asam sulfat, asam nitrat, karbon mono oksida dan sejenisnya. Beberapa jenis lampu yang direkomendasikan untuk digunakan sebagai lampu pencahayaan terowongan adalah [(Liu, 2005), (Phadnis, 2012), (SNI, 2008) dan (ANSI/IES Rp-22-11, 2011)]:

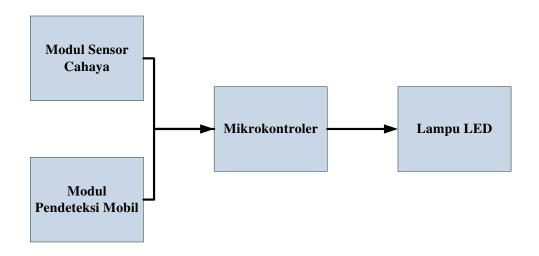
- 1. Lampu Fluorescent
- 2. Lampu Sodium tekanan rendah
- 3. Lampu sodium tekanan tinggi
- 4. Lampu merkuri tegangan tinggi
- 5. Lampu LED (Light Emitting Diode)
- 6. Electrodeless lamps (Lampu Induksi) [Buraczynski,et all, 2010]

Lampu LED kurang disarankan untuk pencahayaan terowongan, karena pemasangannya yang kompleks, dan belum konsisten pada warna cahaya, umur lampu dan efikasinya. [Buraczynski,et all, 2010], akan tetapi untuk saat ini sudah ada lampu LED yang digunakan sebagai PJU dengan kinerja yang baik [Fat, 2013]. Namun lampu LED tidak akan memberikan kinerja yang baik, bila dalam perencanaan, perancangan dan pemasangannya tidak optimal. Hal ini bisa dijumpai pada PJU di Jl. Antasari DKI Jakarta, yaitu penggunaan lampu LED yang berlebihan sehingga tingkat pencahayaan jauh melebihi standar SNI (seperti pada Tabel 2.9) dan menimbulkan silau [Setyaningsih, 2013].

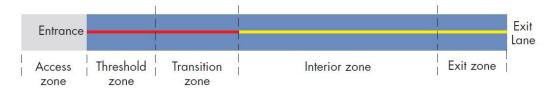
#### 2.3. Model Sistem Pencahayaan Terowongan

Model sistem otomatisasi pencahayaan terowongan yang dirancang menggunakan lampu *light emitting diode* (LED) sebagai pengganti lampu terowongan yang sebenarnya. Model terowongan yang dirancang adalah untuk pencahayaan malam dan siang hari. Iluminansi pada malam hari sesuai dengan kondisi pencahayaan jalan di sekitar terowongan. Sistem pencahayaan malam hari ada dua fitur yaitu pada saat ada dan tidak ada kendaraan bermotor yang melewati terowongan. Pada saat ada kendaraan, maka intensitas cahaya lebih tinggi dari pada saat tidak ada kendaraan. Demikian juga pencahayaan terowongan pada siang hari akan mengikuti ada atau tidak adanya kendaraan bermotor. Selain itu pada siang hari kondisi pencahayaan di dalam terowongan akan mengikuti besar kecilnya intensitas cahaya matahari. Hal ini dimaksudkan untuk menghemat pemakaian energi listrik saat terowongan tidak digunakan.

Sebelum melakukan perancangan hardware, maka dilakukan perancangan pencahayaan terowongan menggunakan perangkat lunak Dialux (dapat diunduh dari internet) pada ke 5 zona, sesuai dengan ketentuan tingkat pencahayaan SNI sebesar 20-25 lux pada malam hari (lihat Tabel 2.4) dan untuk pencahayaan siang hari menggunakan standar internasional yaitu ANSI/IES Rp-22-11,2011 dan NPRA, 2004. Perancangan pencahayaan akan mempertimbangkan tinggi dan lebar terowongan, serta jarak antar lampu/luminer dan daya lampu (watt) agar dapat dihasilkan tingkat pencahayaan sesuai dengan SNI dan standar ANSI/IES Rp-22-11,2011. Hasil perancangan dengan dialux akan memberikan gambaran pencahayaan terowongan yang sesuai dengan kondisi sebenarnya terowongan tersebut. Selanjutnya berdasarkan hasil ini akan diperoleh fluks luminous dari jenis lampu yang digunakan yang berguna untuk perancangan hardware model sistem terowongan, sehingga dalam pembuatan model sistem terowongan dapat mendekati hasil yang sebenarnya. Diagram blok dari model sistem yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 2.7, dan rencana skematik dari alat yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 2.8. Modul rancangan dari model sistem yang direalisasikan yaitu modul mikrokontroler, modul sensor cahaya, modul sensor pendeteksi mobil dan modul catu daya. Spesifikasi rancangan adalah menggunakan catu daya 5 V<sub>DC</sub> untuk keseluruhan modul sistem, menggunakan catu daya 12 V<sub>DC</sub> untuk lampu LED, menggunakan sensor LDR, dan photodioda. Adapun batasan rancangan untuk model sistem terowongan ini antara lain: panjang terowongan 120 cm dan memiliki 1 (satu) jalur kendaraan, terowongan berorientasi utara – selatan, konfigurasi lampu *ceiling mounting* dengan jalur lampu 2 (dua) baris, koefisien refleksi dinding dan permukaan jalan yang bernilai sebesar 0,3 (warna abu-abu muda).



Gambar 2.7 Diagram blok model sistem pencahayaan terowongan



Gambar 2.8 Rencana Pencahayaan di tiap zona dari sistem pencahayaan terowongan

#### 2.3.1. Mikrokontroler

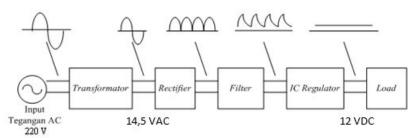
Mikrokontroler merupakan sebuah sistem komputer yang telah dilengkapi dengan prosesor, memori, dan *input-output* (I/O) serta dikemas dalam sebuah *chip* tunggal. Mikrokontroler terdiri dari beberapa bagian penting yaitu:

a. Central Processing Unit (CPU) adalah pusat pengolahan data mikrokontroler.

- b. *Random Access Memory* (RAM) adalah memori sementara yang berfungsi menyimpan data yang akan diproses oleh CPU.
- c. *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory* (EEPROM) adalah memori semi-permanen yang biasanya berisi program dan dapat dihapus dengan cara tertentu.
- d. Input/Output (I/O) merupakan pin jalur keluar/masuk data pada mikrokontroler.
- e. Interrupt Controller berfungsi mengontrol interrupt yang masuk ke mikrokontroler.
- f. Analog-to-Digital Converter (ADC) dan Digital-to-Analog Converter (DAC) berguna untuk melakukan konversi dari analog ke digital dan sebaliknya.

#### 2.3.2 Modul Catu Daya

Modul catu daya dalam sistem ini berguna untuk memberi daya pada beberapa modul lain. *Input* dari catu daya ini bertegangan 220  $V_{AC}$ , sedangkan *output* yang diperlukan sistem adalah 12  $V_{DC}$ . Rencana realisasi modul catu daya menggunakan rangkaian komponen *transformator step-down*, *rectifier*, *filter*, dan *regulator*. *Transformator step-down* menerima tegangan 220  $V_{AC}$  dari PLN dan mengubahnya menjadi gelombang sinusoidal 14,5  $V_{AC}$  yang akan diteruskan ke *rectifier* untuk disearahkan menjadi sinus gelombang penuh lalu masuk ke *filter* agar menjadi agar tegangan menjadi stabil. Keluaran filter selanjutnya disalurkan ke *regulator* yang akan membuang tegangan berlebih dan menghasilkan tegangan 12  $V_{DC}$  [6]. Gambar diagram blok catu daya dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram Blok Catu Daya [7]

#### 2.3.3 Modul Light Dependent Resistor (LDR)

Modul pencahayaan berfungsi mengetahui keadaan cuaca cerah atau mendung di luar terowongan. LDR atau fotoresistor adalah sebuah resistor yang nilai resistansinya berbanding terbalik terhadap intensitas cahaya yang jatuh pada permukaannya. LDR digunakan dalam modul pencahayaan untuk mengetahui intensitas pencahayaan lingkungan sekitar yang akan diterima oleh modul mikrokontroler untuk mengatur jumlah LED modul pencahayaan yang menyala. LDR biasanya terbuat dari bahan Kadmium Sulfida (CdS) atau Kadmium Selenium (CdSe). Contoh gambar LDR dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Contoh bentuk LDR

#### 2.3.4 Modul Pendeteksi Kendaraan Bermotor

Modul pendeteksi kendaraan bermotor berupa photodioda inframerah. Fotodioda inframerah adalah dioda *reverse bias* yang menahan arus yang melewatinya jika tidak terpapar cahaya inframerah dan sebaliknya bila terpapar. *Reverse bias* adalah dioda yang bekerja dengan terbalik yaitu positif pada katoda dan negatif pada anoda. Fotodioda inframerah digunakan pada penghitung sebagai *collector* inframerah. *Case* fotodioda inframerah berwarna gelap untuk menyerap spektrum cahaya lain selain inframerah. Fotodioda inframerah biasanya terbuat dari bahan germanium atau indium galium arsenida (InGaAs). Gambar fotodioda inframerah dapat dilihat pada Gambar 2.11.



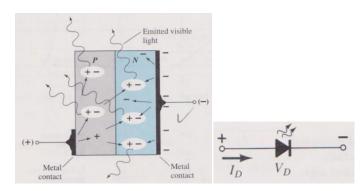
Gambar 2.11 Contoh bentuk dioda inframerah

#### 2.3.5 Light Emitting Dioda (LED)

Sesuai dengan namanya, LED adalah sebuah dioda yang mengeluarkan cahaya ketika diberi energi. Dioda adalah komponen semikonduktor paling sederhana yang memegang peranan sangat penting dalam sistem elektronika. Karakteristiknya menyerupai sebuah *switch* sederhana. Idealnya dioda menghantar arus listrik dalam satu arah sesuai dengan arah anak panah dalam simbol, dan berlaku seperti rangkaian terbuka jika dialirkan arus berlawanan arah anak panah. Karakteristik dioda yang ideal adalah seperti *switch* yang hanya bisa mengalirkan arus dalam satu arah saja. LED adalah dioda semikonduktor dengan sambungan *p-n*. Pada sambungan *p-n* yang diberi arus maju, terutama di struktur yang berdekatan dengan sambungan, terdapat rekombinasi antara lubang dan elektron. Rekombinasi ini membutuhkan

pelepasan energi ke keadaan yang lain oleh elektron yang tadinya bebas tak terikat. Pada semua semikonduktor dengan sambungan *p-n*, energi ini dilepaskan dalam bentuk panas dan foton. Material *silicon* dan *germanium* akan melepas sebagian besar energi dalam bentuk panas, sedangkan cahaya yang dilepas tidaklah terlihat. Pada material lainnya, seperti *gallium arsenide phosphide* (GaAsP) atau *gallium phosphide* (GaP), jumlah foton dari energi cahaya yang dilepaskan adalah cukup banyak untuk menghasilkan sumber cahaya yang terlihat (kasat mata). Proses pelepasan cahaya karena pemberian sumber energi listrik disebut *electroluminescence*.

Permukaan konduksi yang terhubung ke material p adalah terlalu kecil untuk memungkinkan munculnya jumlah foton energi cahaya (lihat Gambar 2.12). Perhatikan bahwa rekombinasi elektron-lubang pada pita valensi, yang disebabkan oleh arus maju, menyebabkan pemancaran cahaya oleh elektron pada pita valensi. Tentu saja ada energi foton yang diserap oleh struktur material itu sendiri, tetapi sebagian energi foton bisa dilepaskan dalam bentuk cahaya.



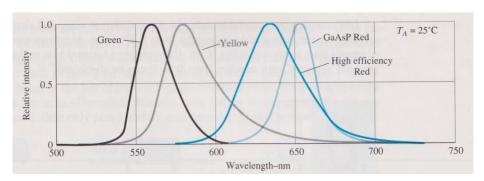
Gambar 2.12 Proses Pemancaran Cahaya pada LED dan simbol LED (Boylestad, 2008)

Karakteristik optik/listrik LED pada suhu  $25^{\circ}$  C dapat dilihat pada Gambar 2.13. Dua karakteristik LED yang berhubungan dengan pencahayaan adalah *luminous intensity* dalam satuan candela dan *luminous efficacy* dalam satuan lumen/watt. Satu candela memancarkan fluks cahaya sebesar 4  $\pi$  lumen dan menghasilkan iluminansi sebesar 1 *footcandel* pada area 1 *feet square* atau pada jarak 1 kaki dari sumber cahaya. Istilah *efficacy* berarti besarnya kemampuan alat untuk memberikan hasil yang diinginkan. Pada LED, *efficacy* berarti rasio antara jumlah lumen yang dihasilkan dengan setiap watt energi lisrik yang diberikan. Intensitas relatif setiap warna cahaya LED terhadap panjang gelombang dapat dilihat pada Gambar 2.14.

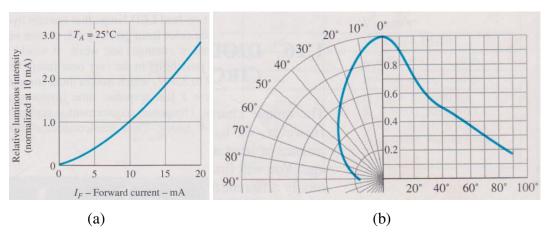
LED adalah komponen semikonduktor dengan sambungan *p-n* sehingga ia akan memiliki karakteristik arah maju yang hampir sama dengan kurva respons dioda. Perhatikan bahwa meningkatnya *relative luminous intensity* adalah hampir linear terhadap arus maju. (lihat pada Gambar 2.15.a), sedangkan pola iluminasi LED dapat dilihat di gambar 2.15.b, yang menyatakan bahwa intensitas cahaya terbesar adalah pada sudut 0° (area di depan lampu LED) dan intensitas cahaya terkecil adalah pada sudut 90° (area di samping lampu).

Description					
Description	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
					$I_F = 10 \text{ mA}$
Axial luminous intensity	1.0	3.0		mcd	
Included angle between half luminious intensity points		80		deg.	Note 1
Peak wavelength		635		nm	Measurement at peak
Dominant wavelength		628		nm	Note 2
Speed of response		90		ns	
Capacitance		11		pF	$V_F = 0; f = 1 \text{ Mhz}$
Thermal resistance		120		°Ċ/W	Junction to cathode lead at 0.79 mm (.031 in from body
Forward voltage		2.2	3.0	V	$I_F = 10 \text{ mA}$
Reverse breakdown voltage	5.0			V	$I_R = 100 \mu\text{A}$
Luminous efficacy		147		lm/W	Note 3
	intensity Included angle between half luminious intensity points Peak wavelength Dominant wavelength Speed of response Capacitance Thermal resistance Forward voltage Reverse breakdown voltage Luminous efficacy	intensity Included angle between half luminious intensity points Peak wavelength Dominant wavelength Speed of response Capacitance Thermal resistance Forward voltage Reverse breakdown voltage Luminous efficacy	intensity Included angle between half luminious intensity points Peak wavelength  Dominant wavelength Speed of response Capacitance Thermal resistance  Forward voltage Reverse breakdown voltage Luminous efficacy  80  628  628  629  628  629  629  620  620  620  620  620  620	intensity Included angle between half luminious intensity points Peak wavelength  Dominant wavelength Speed of response Capacitance Thermal resistance  Forward voltage Reverse breakdown voltage Luminous efficacy  80  628  90  11  11  Forward voltage 2.2  3.0  47	intensity Included angle 80 deg. between half luminious intensity points Peak wavelength 635 nm  Dominant wavelength 628 nm Speed of response 90 ns Capacitance 11 pF Thermal resistance 120 °C/W  Forward voltage 2.2 3.0 V Reverse breakdown 5.0 V

Gambar 2.13 Karakteristik Optik/Listrik sebuah LED pada Suhu 25° C (Boylestad, 2008)

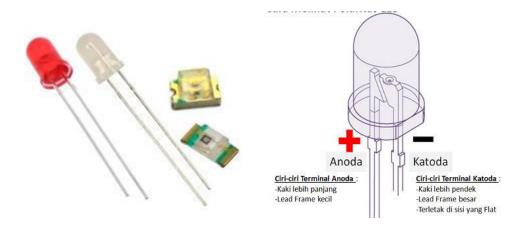


Gambar 2.14 Grafik Intensitas Relatif Warna LED terhadap Panjang Gelombangnya (Boylestad, 2008)



Gambar 2.15 (a) Grafik Arus Maju vs Intensitas Cahaya Relatif (b) Pola Iluminasi LED (Boylestad, 2008)

Pabrik dapat membuat lampu LED yang memancarkan warna merah, kuning dan inframerah (tak kelihatan) dengan menggunakan unsur-unsur seperti gallium, arsen, dan phosfor. Sekarang ini lampu LED yang ada di pasaran dapat menghasilkan cahaya dengan warna merah, kuning, putih, hijau, biru, dan jingga, yang disebut sebagai LED satu warna, namun terdapat juga LED dengan lebih dari satu warna, yang dikenal sebagai RGB LED (Red, Green, Blue). RGB LED dilengkapi dengan rangkaian kontrol (berupa IC) terpadu yang tertanam dalam satu paket. Melalui rangkaian kontrol ini dapat dilakukan pencampuran dari ketiga warna ini yang dapat menghasilkan seluruh warna. Lampu LED yang menghasilkan pancaran cahaya yang kelihatan dapat berguna untuk lampu penerangan, papan iklan, backlight LCD (TV, display handphone, monitor), display peralatan, mesin hitung, jam digital, dan lainnya. LED infra merah dapat digunakan pada sistim alarm dan ruang lingkup lain yang membutuhkan pancaran cahaya yang tak kelihatan, seperti remote kontrol (TV, AC, AV Player). Umumnya LED beroperasi pada tegangan 1.7 V sampai dengan 3.3 V, sehingga LED dapat dipasangkan dengan rangkaian solid-state. Tegangan yang dibutuhkan lampu LED lebih kecil daripada tegangan yang dibutuhkan lampu pijar. Lampu LED juga mempunyai waktu respon yang cepat (dalam nano detik). Waktu respon yang cepat ini menyebabkan lampu LED cepat sekali dihidupkan dan dimatikan dari saklar. Lampu LED juga mempunyai rasio kontras yang cukup baik untuk penglihatan manusia. Daya yang dibutuhkan lampu LED berkisar antara 10 mW - 150 mW dengan waktu nyala sekitar 100,000 jam. Lampu LED juga bertahan lebih lama daripada lampu pijar. Berbeda dengan Lampu Pijar, LED tidak memerlukan pembakaran filamen sehingga tidak menimbulkan panas dalam menghasilkan cahaya. Jadi keuntungan lampu LED adalah konsumsi energi yang rendah, ukurannya yang relatif kecil, waktu *switching* yang cepat, bentuk fisiknya yang *robust* dan *life-time* yang relatif lama (Boylestad, 2008). Berbagai bentuk LED dan cara melihat polaritasnya seperti pada Gambar 2.16 yang diakses dari teknikelektronika.com. Ciriciri terminal Anoda (+) pada LED adalah kaki yang lebih panjang dan juga lead frame yang lebih kecil. Sedangkan ciri-ciri terminal Katoda (+) adalah kaki yang lebih pendek dengan lead frame yang besar serta terletak di sisi yang flat, diakses dari teknikelektronika.com.



Gabar 2.16 Berbagai bentuk LED dan cara melihat polaritasnya

#### BAB 3

#### TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

#### 3.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini adalah berupa perancangan dan pembuatan model sistem pencahayaan terowongan untuk kendaraan bermotor. Tujuan penelitian adalah:

- Membuat model sistem pencahayaan terowongan untuk siang dan malam hari, dengan pengaturan pencahayaan yang dilakukan secara otomatis. Otomatisasi ini meliputi peredupan intensitas cahaya lampu jalan pada malam hari yang disesuaikan dengan intensitas cahaya di luar terowongan, meningkatkan dan atau menurunkan intensitas cahaya di dalam terowongan pada pagi, siang dan sore hari mengikuti tinggi rendahnya intensitas cahaya matahari.
- Membuat model sistem pencahayaan terowongan untuk siang hari dengan intensitas cahaya yang berbeda antara zona threshold, zona transisi, zona interior dan zona exit.
   Tinggi rendahnya intensitas cahaya pada tiap zona tersebut mengikuti tinggi rendahnya intensitas cahaya matahari.
- Membuat model sistem pencahayaan terowongan yang memperhatikan penghematan energi sesuai dengan Peraturan Menteri no 13 tahun 2012, yaitu dengan mengurangi intensitas cahaya pada malam dan siang hari pada saat tidak ada kendaraan bermotor yang melewati terowongan. Intensitas cahaya pada saat tidak ada kendaraan bermotor yang melewati terowongan lebih kecil daripada saat ada kendaraan bermotor yang melewati terowongan.

#### 3.2 Manfaat Penelitian

- Adanya model terowongan ini, nantinya dapat digunakan sebagai media pembelajaran/ referensi bagi perancang pencahayaan terowongan. Hal ini mengingat di DKI Jakarta khususnya atau Indonesia pada umumnya belum ada sistem pencahayaan terowongan yang mempunyai pencahayaan pada malam dan siang hari berbeda.
- Adanya model terowongan ini dapat digunakan untuk pembelajaran/referensi dalam penerapan penghematan energi pada sistemnya, selain pada pemilihan jenis lampunya.

• Secara umum adanya model terowongan ini dapat digunakan sebagai media diskusi antar para perancang pencahayaan terowongan atau antar para peneliti tentang pencahayaan terowongan.

### 3.3. Urgensi Penelitian

Selama ini belum ada penelitian mengenai tingkat pencahayaan di dalam terowongan di DKI Jakarta sehingga tidak diketahui apakah tingkat pencahayaan yang ada dalam terowongan tersebut sudah sesuai dengan standar atau tidak. Berdasarkan pengamatan dan pengukuran yang telah dilakukan sebelumnya pada terowongan yang diteliti, ada perbedaan tingkat pencahayaan yang signifikan ketika kendaraan masuk ke dalam terowongan, berada di dalam dan keluar dari terowongan. Seharusnya, tingkat pencahayaan itu berkurang atau menguat secara bertahap ketika kendaraan melewati terowongan sehingga dapat memberikan kesempatan bagi mata para pengemudi untuk menyesuaikan dengan tingkat pencahayaan dalam terowongan. Dengan demikian terowongan dapat dilewati dengan adanya jaminan keselamatan dan keamanan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan kepada Dinas Perindustrian dan Energi DKI Jakarta yang menangani dan mengelola PJU untuk melakukan perbaikan pada pencahayaan terowongan di DKI Jakarta. Kontribusi terhadap Ilmu Pengetahuan dari penelitian ini adalah merealisasikan teori-teori mengenai pencahayaan khususnya pencahayaan dalam terowongan yang diharapkan pada akhirnya akan memicu penelitian lebih lanjut mengenai pencahayaan baik di terowongan maupun di jalan raya pada umumnya, tidak hanya di DKI Jakarta saja, namun juga mencakup seluruh kota di Indonesia sehingga keselamatan dan keamanan bagi pengguna jalan umum dapat terjamin.

#### **BAB 4**

#### METODE PENELITIAN

## 4.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Tempat penelitian di laboratorium Jurusan Teknik Elektro dan Program Studi Teknik Informatika, Universitas Tarumanagara. Waktu pelaksanaan penelitian sekitar 1 tahun dari bulan Maret sampai dengan Desember 2016.

## 4.2 Peralatan dan bahan yang dibutuhkan

- Luxmeter dipinjam dari Laboratorim Fisika Bangunan, Jurusan Arsitek,
   Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara
- Multimeter dan Osiloskop, dipinjam dari Laboratorium Elektronika,
   Jurusan Teknik Elektro, Universitas Tarumanagara.
- Komputer lengkap, dipinjam dari laboratorium pemrograman Fakultas
   Teknologi Informasi Universitas Tarumanagara
- Komponen untuk pembuatan modul mikrokontroler
- Komponen untuk pembuatan modul Sensor LDR
- Komponen untuk pembuatan modul sensor pendeteksi kendaraan
- Komponen untuk pembuatan modul catu daya 5 Vdc dan 12 Vdc
   Lampu LED 5 Vdc dan 12 Vdc

#### 4.3 Prosedur Penelitian

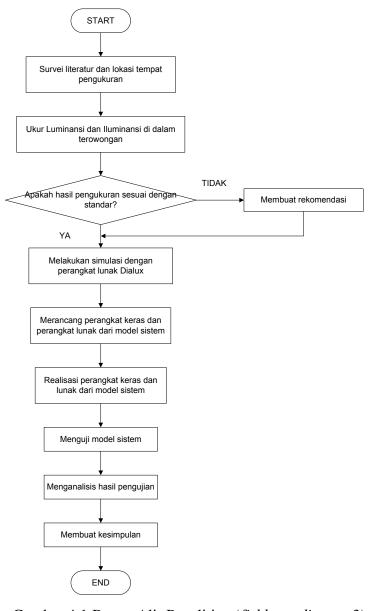
Urutan langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

- 1. Menentukan terowongan yang data-datanya akan digunakan sebagai referensi pembuatan modul, ditentukan yaitu terowongan Pasar Rebo.
- 2. Merancang perangkat keras (*hardware*) model sistem pencahayaan terowongan berdasarkan hasil kesimpulan dan rekomendasi perancangan pencahayaan terowongan yang telah dilakukan pada tahun pertama yaitu tahun 2015.
- 3. Merancang pemprograman (software) model sistem pencahayaan terowongan
- 4. Melakukan pengujian dan analisis perangkat keras dan perangkat lunak sehingga sesuai dengan tujuan perancangan sistem ini.

## 4.4 Bagan Alir Penelitian.

Diagram ini menunjukkan kegiatan penelitian selama 2 (dua) tahun. Penelitian tahun pertama yaitu tahun 2015 berupa pengukuran iluminansi dan luminansi pada 5 (lima) lokasi terowongan/*underpass* di Jakarta dan perancangan simulasi pencahayaan terowongan dengan perangkat lunak dialux. Lima terowongan tersebut adalah terowongan Cibubur, terowongan Pasar Rebo, terowongan Merdeka, terowongan Rancho dan terowongan Ampera.

Tahun kedua, yaitu tahun 2016 merancang perangkat keras model sistem pencahayaan terowongan dengan berdasarkan hasil simulasi dialux dan data-data dari terowongan Pasar Rebo. Kemudian merancang optimisasi sistem dengan perangkat lunak dialux berdasarkan keadaan terowongan Pasar Rebo saat ini.



Gambar 4.1 Bagan Alir Penelitian (fishbone diagram3)

## 4.5 Realisasi Model Sistem Pencahayaan Terowongan

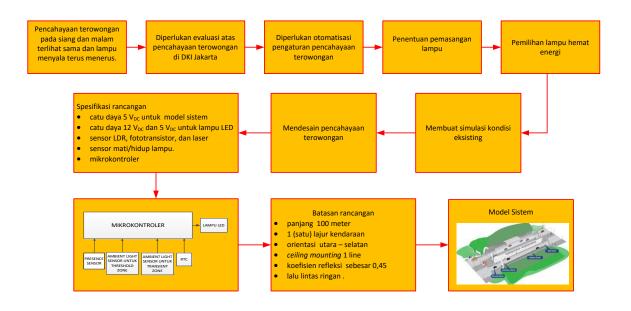
Rencana tahap kedua adalah merancang dan merealisasikan perangkat keras (hardware) model sistem pencahayaan terowongan berdasarkan hasil yang diperoleh dari tahap pertama. Selanjutnya adalah merancang dan membuat program (software) untuk model sistem pencahayaan terowongan. Setelah semua perangkat selesai direalisasikan, tahap berikutnya adalah melakukan pengujian dan analisis perangkat keras dan perangkat lunak sehingga sesuai dengan tujuan perancangan sistem ini. Tujuan perancangan sistem tahap kedua adalah menentukan iluminansi terowongan yang sesuai untuk pencahayaan terowongan untuk meningkatkan kualitas pencahayaan terowongan dan penghematan energi. Selain itu adalah membuat otomatisasi pencahayaan terowongan agar dicapai tingkat pencahayaan untuk siang hari dan malam hari dengan iluminansi dan luminansi yang berbeda.

Model sistem otomatisasi lampu terowongan yang dirancang akan menggunakan *light* emitting diode (LED) sebagai pengganti lampu terowongan yang terpasang (existing). Model yang akan dirancang memiliki beberapa fitur, yaitu mengontrol peredupan lampu secara otomatis sesuai waktu dan keberadaan kendaraan di terowongan, pada siang dan malam hari. Kontrol hidup/mati lampu menggunakan photoresistor atau sensor cahaya, sensor ini akan mengubah sinyal optik/cahaya menjadi sinyal listrik. Sensor ini digunakan untuk mengatur cahaya lampu pijar yang digunakan sebagai simulasi cahaya matahari.

Pada siang hari pencahayaan terowongan mengikuti tinggi rendahnya intensitas cahaya matahari terutama pada zona *threshold* dan zona transisi dan akan mempunyai intensitas yang berbeda pada saat ada mobil maupun tidak ada mobil yang melewati terowonga. Demikian juga pada malam hari lampu menyala seluruhnya, namun intensitas cahaya akan berbeda pada saat ada mobil dan tidak ada mobil yang melewati terowongan. Pada malam hari intensitas cahaya akan mengikuti kondisi cahaya di sekitar terowongan. Hal ini dilakukan untuk penghematan energi.

Perancangan pencahayaan pada ke 5 zona terowongan menggunakan perangkat lunak Dialux, sesuai dengan ketentuan tingkat pencahayaan SNI sebesar 20-25 lux atau standar internasional. Perancangan pencahayaan akan mempertimbangkan tinggi dan lebar terowongan, serta jarak antar lampu/luminer dan daya lampu (watt) agar dapat dihasilkan tingkat pencahayaan sesuai dengan standar. Hasil perancangan dengan perangkat lunak Dialux akan memberikan gambaran pencahayaan terowongan yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Selanjutnya berdasarkan hasil ini akan diperoleh fluks luminous dari jenis lampu

yang digunakan yang berguna untuk perancangan *hardware* model sistem terowongan, sehingga dalam pembuatan model sistem terowongan dapat mendekati hasil yang sebenarnya. Draft teknologi tepat guna, yang nantinya berupa model Sistem Pencahayaan Terowongan untuk Kendaraan Bermotor dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Draft Teknologi Tepat Guna Model Sistem Pencahayaan Terowongan untuk Kendaraan Bermotor

#### BAB 5

# HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

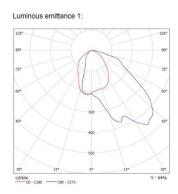
## 5.1 Gambaran Umum Terowongan Pasar Rebo

Perancangan dan realisasi model sistem pencahayaan terowongan untuk kendaraan bermotor yang dilaksanakan pada tahun 2016 ini merupakan pelaksanaan penelitian hibah bersaing untuk tahun ke-2, yaitu berupa pembuatan model sistem perangkat keras dan perangkat lunaknya. Data-data yang digunakan adalah data-data dari terowongan Pasar Rebo. Penjelasan berikut adalah hasil penelitian terowongan Pasar Rebo yang telah dilaksanakan pada tahun 2015 (tahun ke-1). Terowongan Pasar Rebo berada di daerah Pasar Rebo Jakarta Timur, dikenal juga sebagai terowongan Raya Bogor karena terletak di bawah jalan Raya Bogor, yaitu di (KM.30+450). Pembangunan terowongan ini untuk menghindari kemacetan lalu lintas di simpang tiga Pasar Rebo. Terowongan Pasar Rebo merupakan terowongan dua arah, yaitu terowongan ke arah Kampung Rambutan dan ke arah Cijantung, namun masingmasing tidak saling terlihat karena dipisahkan oleh dinding pembatas. Jadi terowongan ini termasuk pada tipe *devided tunnel*, yaitu hanya ada satu arah lalu lintas pada tiap terowongan. Terowongan ini dapat digunakan untuk kendaraan dalam tiga lajur dan dilengkapi dengan bahu jalan selebar 2,18 m di tepi kiri, dan lebar trotoar 1 (satu) meter, yang didalamnya merupakan saluran tepi jalan dengan lebar 30 cm, yang sebagian berpenutup dan sebagian lagi penutupnya telah rusak/hilang. Di sisi kanan tidak terdapat bahu jalan maupun trotoar, karena lebar hanya 0,5 m. Jumlah lajur pada terowongan adalaht 3 lajur, lebar lajur 1 adalah 4 m, lebar lajur 2 sekitar 3,34 m dan lebar lajur 3 sekitar 3,34 m. Jadi total lebar terowongan Pasar rebo adalah sekitar 14,36 m. Panjang terowongan 270 m dan tinggi 4,2 m.

Jumlah lampu pada masing-masing terowongan adalah (66 x 2) buah lampu, yang terdiri (61 x 2) lampu SON T atau High Pressure Sodium (HPS), daya 250 watt dan 400 watt, dengan warna kuning yaitu dengan CCT 2700 K dan (5 x 2) buah lampu LED, warna putih dengan CCT 5000 K, bentuk luminer dan spesifikasi lain dapat dilihat pada (Gambar 5.1). Jadi pada masing-masing terowongan terdapat (28 x 2) lampu HPS 250 watt dan (38 x 2) lampu HPS 400 watt, sehingga total keseluruhan lampu yang ada di terowongan Pasar Rebo adalah 112 lampu HPS 250 watt dan 152 lampu HPS 400 watt. Gambar 5.2 adalah rencana pemasangan lampu terowongan jalan Raya Bogor (terowongan Pasar Rebo), denah diperoleh dari PT Jasa Marga Tbk bagian pemeliharaan. Jarak antar lampu semula adalah 10 m, namun saat ini berjarak 5 meter, kecuali pada zona threshold lampu ke-1 berjarak setengah meter dari portal dan selanjutnya berjarak 2 m sampai lampu ke-3. Demikian juga pemasangan

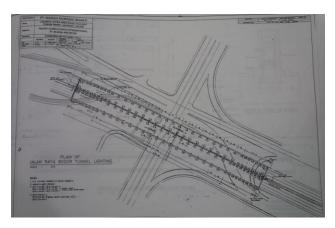
lampu pada zona keluar. Namun mulai lampu ke-47 sampai dengan lampu ke-57 ditambahkan lampu dengan jarak antar lampu 2 m. Lampu diletakkan di sisi kiri dan kanan, yaitu pada perpotongan antara dinding dan atap. Pemasangan lampu untuk sebagian zona dilakukan secara berselang seling dengan cara luminer di pasang di dinding bagian atas terowongan (sistem ressesed) yang disorotkan kearah bawah dan luminer di tempel (sistem surface mounting) di dinding atas yang disorotkan agak ketengah permukaan jalan. Secara keseluruhan system pemasangan lampu di terowongan TB Simatupang disebut dengan sistem wall mounting asymmetrical lighting (Torn, 2004), pemasangan lampu dapat dilihat pada Gambar 5.3. c,d. Terdapat 2 buah lubang cahaya, lubang cahaya pertama terletak antara lampu ke-26 dan ke-27 yaitu berjarak sekitar 130 m dari portal dan lubang cahaya kedua terletak antara lampu ke-33 dan ke-24, yaitu berjarak sekitar 165 m dari portal. Bentuk lubang cahaya dapat dilihat pada (Gambar 5.3 e dan f), tujuan adanya lubang cahaya adalah untuk membuang asap dari pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor dan juga untuk meneruskan cahaya matahari kedalam terowongan. Sebaiknya di dalam terowongan dihindari adanya lubang cahaya supaya tidak menimbulkan silau dan menyulitkan pengendara dalam beradaptasi. Asap dari kendaraan bermotor seharusnya dibuang melalui blower/kipas yang dipasang di bagian atap atau dinding terowongan.





122 Pieces Philips SMF383 1xSON-T250W SGR A
Article No.:
Luminous flux (Luminaire): 17920 Im
Luminous flux (Lamps): 28000 Im
Luminaire Wattage: 276.0 W
Luminaire classification according to CIE: 100
CIE flux code: 49 85 98 100 64
Fitting: 1 x SON-T250W/220 (Correction Factor 1.000).

Gambar 5.1 Bentuk Luminer Lampu SON T (HPS) pada terowongan Pasar Rebo

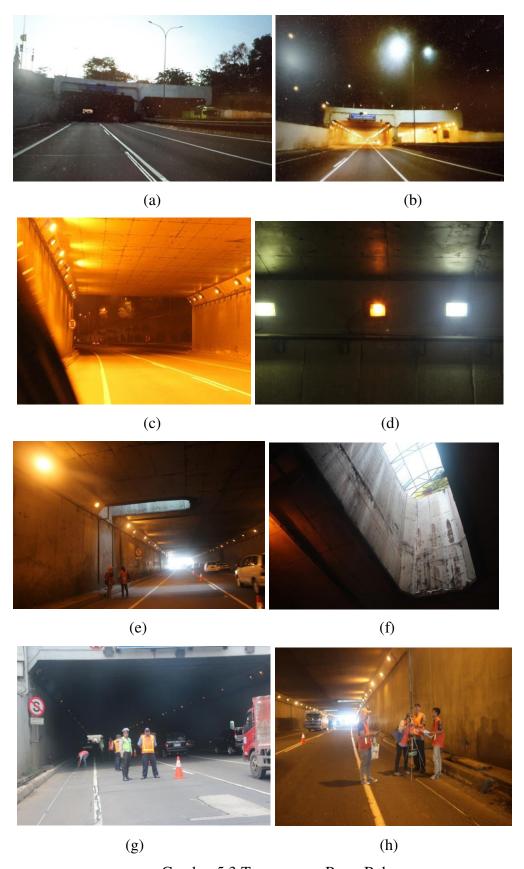


Gambar 5.2 Denah rencana pemasangan lampu terowongan Pasar Rebo (Raya Bogor) (Sumber: PT. Jasa Marga TbK, 2015)

## 5.2 Hasil Pengukuran dan Analisis Terowongan Pasar Rebo

Pengukuran dilakukan hanya pada satu terowongan yaitu yang menuju ke arah Cijantung, pada siang dan malam hari. Pengukuran dilakukan pada zona akses, zona threshold, zona transisi zona interior dan segmen keluar. Titik ukur berada pada jarak 1 (satu) m dari dinding sebelah kiri dan di lajur 1 dengan jarak 5 m dari dinding sebelah kiri. Hasil pengukuran luminansi dan iluminansi dapat dilihat pada Lampiran 2, sedangkan grafik hasil pengukuran pada Lampiran 3. Pengukuran hanya dilakukan pada lajur 1, dengan cara lajur 1 tersebut di bebaskan dari kendaraan bermotor yang lewat, sementara itu lajur 2 dan lajur 3 tetap dibuka untuk mencegah kemacetan yang berkepanjangan, terutama pada saat pengukuran pada siang hari. Pada saat pengukuran pengaturan lalu lintas dilakukan oleh Polisi Jalan Raya (PJR) dan dibantu pihak patroli dari PT JLJ, suasana pengukuran dapat dilihat pada Gambar 5.3. g dan h.

Simulasi menggunakan *software* dialux juga dilakukan pada terowongan Pasar Rebo, Lampiran 5 menunjukkan hasil simulasi tersebut. Sementara itu data ukur selain diperoleh dari pengukuran langsung di terowongan, juga dilakukan melalui kuisioner. Pengisian kuisioner dilakukan setelah responden melihat rekaman video terowongan Pasar Rebo untuk kondisi siang dan malam hari. Hasil kuisioner berupa persepsi responden terhadap pencahayaan terowongan tersebut. Perbandingan hasil ukur dan hasil simulasi dengan standar terowongan dapat dilihat pada Tabel 5.1.



Gambar 5.3 Terowongan Pasar Rebo

- (a) dan (b) Terowongan dua arah yang dipisahkan dengan dinding saat siang dan malam (c) dan (d) Sistem pemasangan luminer (e) dan (f) Lubang cahaya (g) dan (h) Pengaturan lalu lintas oleh PJR dan patroli.

Tabel 5.1 Perbandingan hasil pengukuran dan hasil simulasi terhadap standar terowongan siang dan malam untuk terowongan Pasar Rebo.

N	Para	Terowongan Pasar Rebo Siang				Terowongan Pasar Rebo Malam			
0.	me ter	Stan dar Terw. Siang	Hasil Pengu kuran	Hasil Simu lasi	Hasil Perbandi ngan	Stan dar Terw. Malam	Hasil Penguku ran	Hasil Simul asi	Hasil Perban dingan
1	Zona Akses	100 m*	>200 m	-	Meme nuhi	100 m*	>200 m	-	Memen uhi
2	Zona Thres hold	70 m*	70 m*	-	Meme nuhi	70 m*	70 m*	-	Meme nuhi
3	Zona Tran sisi	110 m*	110 m*	-	Meme nuhi	110 m*	110 m*	-	Meme nuhi
4	L <sub>R</sub> Portal	4 kcd/m <sup>2</sup> = 4000 cd/m <sub>2</sub> = 62.500 lux **	L = 1486 cd/m <sub>2</sub> E = tidak teru kur	-	Kurang memenu hi	-	1,85 cd/m <sup>2</sup> E = 35,3 x 1,6 = 56,4 lux	-	1
5	$L_{Thresh}$ old rata- rata $= L_{th}$	$\begin{array}{c} 240 \\ \text{cd/m}^2 \\ E_{th} = \\ 1.889,7 \\ \text{lux***} \end{array}$	$L_{th} = \\ 181,8 \\ cd/m2 \\ E_{th} = \\ 2195 x \\ 1,6*** \\ *** = \\ 3512 \\ lux$	-	L <sub>th</sub> hasil ukur kurang E <sub>th</sub> memenu hi	$L_{th} = 2$ $cd/m^{2}$ $E_{ev} = 20 - 25$ $lux$	$L_{th} = 0.84$ $cd/m^2$ $E_{th} = 36.4 x$ 1.6 = 58.3 lux	-	$\begin{aligned} L_{th} \\ has il \\ ukur < \\ L_{th} stan \\ dar tapi \\ E_{th} > \\ E_{ev} \\ standar \end{aligned}$
6	L <sub>Inte</sub> rior = L int	6 cd/m <sup>2</sup> = 93,75 lux***	$L_{int} = 11.8  cd/m2  E_{int \cdot ev}  = 97.5  x 1.6 = 156 lux$	$L_{int} = 15$ $cd/m^{2}$ $E_{int ev} = 468$ $lux$	L <sub>int</sub> dan E <sub>int-ev</sub> >dari standar	$L_{int} = L_{th} = 2$ $cd/m^{2}$ $E_{ev} = 20 - 25$ $lux***$	$L_{int} = 4,55$ $cd/m^{2}$ $E_{int} = 97,2 x$ $1,6 = 155,5$ $lux$	L = 7,59 $cd/m^2$ $E_{ev} = 247$ lux	$\begin{array}{l} L_{int}dan \\ E_{int} \\ hasil \\ ukur > \\ L_{int}dan \\ E_{ev} \\ standar \end{array}$
7	Uni Form ity/ keme ra taan	0,3***  **  Hanya untuk zona interior	-	0,263	Uo baik	0,3***	-	0,484	Uo hasil ukur kurang baik

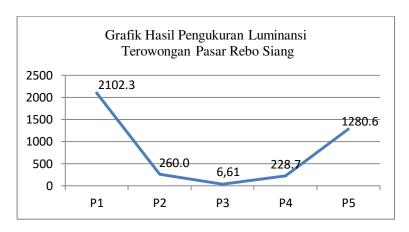
### Keterangan

- (\*) = Kecepatan rencana terowongan Pasar Rebo adalah 80 km/jam, (NPRA, 2004).
- (\*\*) = Luminansi = Iluminansi x faktor koreksi, yang disesuaikan dengan faktor refleksi permukaan jalan atau dinding. Untuk  $L_R = L_{Road}$  dengan faktor koreksi = 0,064, (ANSI/IES Rp-22-11, 2011)
- (\*\*\*) = kecepatan disetarakan dengan 80 km/jam, ANSI/IES Rp-22-11, 2011. Arah pengemudi pada arah Timur-Barat (*East-West*), sesuai dengan arah terowongan Pasar Rebo. Karakteristik terowongan Pasar Rebo adalah *urban tunnel*, yaitu di daerah perkotaan. Faktor koreksi = 0,064, refleksi dinding = 0,2.
- (\*\*\*\*) = kecepatan rencana 80 km/jam, faktor koreksi = 0,064 dengan refleksi dinding= 0,2 (ANSI/IES Rp-22-11, 2011). *Traffic flow* >2.400 AADT<24.000 AADT (*Annual Average Daily Traffic*)
- (\*\*\*\*\*) = nilai *uniformity* diperoleh dari standar ANSI/IESNA Rp-8-2000, sedangkan bila menurut SNI No. 739, 2008 adalah 0,4 perbandingan antara  $L_{min}$  terhadap  $L_{maks}$ . Bila perbandingan antara  $L_{min}$  terhadap  $L_{rata-rata}$  adalah 0,7. Nilai  $E_{ev}$  diambil dari SNI No. 7391, 2008. Standar SNI hanya ada parameter  $E_{ev}$  dan  $L_{ev}$ , tidak ada  $L_{th}$ ,  $L_{int}$ .

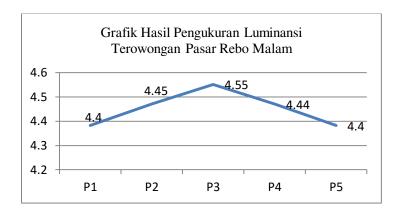
(\*\*\*\*\*) = angka 1,6 adalah diperoleh berdasarkan kalibrasi alat ukur luxmeter.

Terlihat dari Tabel 5.1, panjang zona akses telah memenuhi standar, dan panjang zona threshold serta zona transisi juga sesuai dengan standar, hal ini sesuai dengan panjang terowongan Pasar Rebo adalah 270 m. Pencahayaan terowongan Pasar Rebo pada siang hari mempunyai luminansi di zona threshold yang kurang dibandingkan dengan standar (lihat juga Gambar 5.4), sedangkan untuk zona interior lebih besar dari standar, namun nilai kemerataan cahayaannya baik. Pernyataan ini sesuai juga dengan hasil simulasi dialux, yaitu luminansi pada permukaan jalan nilainya 8,75 cd/m2 (lihat warna ungu pada Gambar 5.8). Untuk itu luminansi dan iluminansi di zona threshold harus dinaikkan yaitu dengan penambahan lampu atau daya lampu pada zona threshold, sedangkan jumlah lampu di zona interior dikurangi yaitu dengan melepas lampu yang saat ini terpasang. Luminansi yang kurang pada zona threshold pada siang hari akan menyebabkan mata pengendara tidak dapat beradaptasi dengan baik karena perubahan luminansi yang terlalu jauh antara zona akses dan zona threshold. Hal ini juga menyebabkan fenomena black hole pada muka terowongan. Hasil persepsi responden menunjukkan pernyataan yang sama untuk kondisi tersebut, yaitu dalam pernyataan persepsi terang dan cerah, responden merasakan kurang terang pada saat memasuki terowongan pada siang hari namun pada saat berada di zona interior merasakan silau karena adanya lubang cahaya (seperti terlihat dari denah pada Gambar 5.7) pada terowongan tersebut (lihat Gambar 5.10 dan Gambar 5.11).

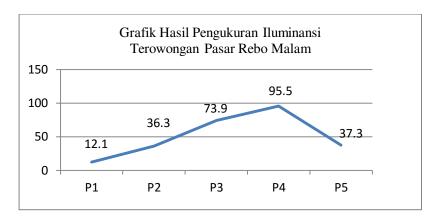
Luminansi zona threshold malam hari lebih kecil dari standar, namun nilai iluminansinya lebih besar dari standar. Hal ini disebabkan karena pengaruh nilai luminansi di zona akses yang belum memenuhi standar. Sementara itu di zona interior luminansi dan iluminansinya lebih besar bila dibandingkan dengan standar, sehingga kemerataan cahaya sepanjang terowongan kurang baik (lihat Gambar 5.5 dan 5.6). Hasil simulasi dengan dialux juga menunjukkan pencahayaan di zona interior mempunyai luminansi rata-rat pada 6,25 cd/m² (lihat warna biru Gambar 5.9). Jadi lampu pada zona threshold sudah cukup dan pengurangan lampu hanya diperlukan pada zona interior. Malam hari pencahayaan di zona akses yang setara dengan pencahayaan jalan umum harus setara juga dengan pencahayaan di zona threshold, bila lebih tinggi maka akan menyebabkan mata pengendara kurang dapat beradaptasi dengan baik, seperti terlihat pada Gambar 5.5 dan 5.6. Pernyataan ini sesuai dengan hasil ukur persepsi, bahwa responden merasakan terang dan silau pada saat akan memasuki terowongan pada malam hari, demikian juga pada saat berada di dalam terowongan (lihat Gambar 5.10 dan 5.11).



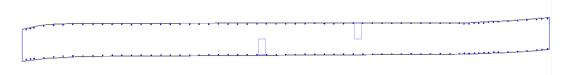
Gambar 5.4 Grafik Luminansi Terowongan Pasar Rebo Siang



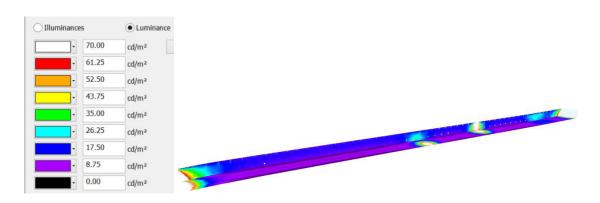
Gambar 5.5 Grafik Luminansi Terowongan Pasar Rebo Malam



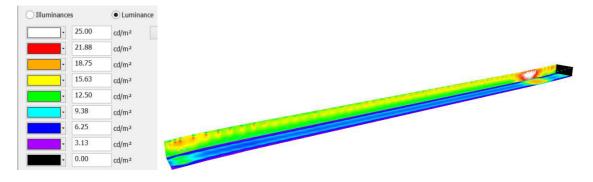
Gambar 5.6 Grafik Iluminansi Terowongan Pasar Rebo Malam



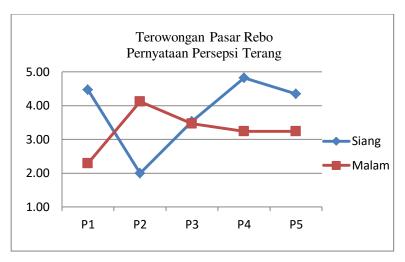
Gambar 5.7 Denah Hasil Dialux Terowongan Pasar Rebo



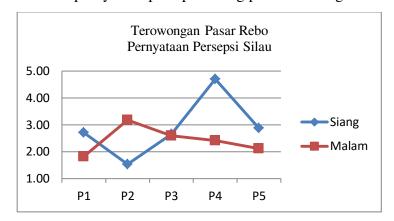
Gambar 5.8 Luminansi Hasil Dialux Terowongan Pasar Rebo Siang



Gambar 5.9 Luminansi Hasil Dialux Terowongan Pasar Rebo Malam



Gambar 5.10 Grafik pernyataan persepsi terang pada terowongan Pasar Rebo



Gambar 5.11 Grafik pernyataan persepsi silau pada terowongan Pasar Rebo

Jenis lampu HPS yang terpasang di sebagian besar terowongan dan adanya sebagian kecil LED yang ditambahkan dengan dipasang secara berselang-seling pada terowongan Pasar Rebo, menyebabkan kesan warna yang bercampur antara kuning dan putih (lihat Gambar 5.12). Sebaiknya pemasangan lampu pada satu terowongan adalah satu jenis, sehingga kesan warna yang dimunculkan adalah sama, yaitu kuning (warm) atau putih (daylight atau cool daylight). Apabila terdapat dua kesan warna yang berbeda, hal ini menunjukkan kurangnya perencanaan pemilihan jenis lampu pada terowongan tersebut. Namun apabila ada keinginan dari pihak pengelola terowongan (dalam hal ini adalah PT Jasa Marga) untuk mengganti jenis lampu HPS ke lampu LED yang lebih tinggi efikasi dan lebih panjang umurnya (yaitu mencapai > 50.000 jam), serta lebih baik renderasi warnanya (yaitu 83%), maka sebaiknya dicarikan kesan warna yang sama untuk seluruh terowongan. Pilihan warna dari sebuah lampu dapat dilihat dari nilai temperatur warnanya (CCT/ Corelated Color Temperature). Apabila diinginkan kesan warna kuning, maka pilihan CCT adalah 2700 K sampai dengan 3000 K dan bila putih adalah 5000 K

sampai dengan 6500 K. Bila menginginkan warna tengah antara kuning dan putih, maka dapat dipilih jenis lampu LED dengan CCT 4000 K.



Gambar 5.12 Tampak warna cahaya yang bercampur antara kuning dari lampu HPS dan putih dari lampu LED.

Berdasarkan analisis di atas, yaitu sesuai kondisi existing, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1. Luminansi zona *threshold* siang hari pada terowongan Pasar Rebo belum mencapai nilai sesuai standar. Jumlah lampu atau daya lampu di zona *threshold* pada kedua terowongan harus ditambah. Hal ini dilakukan agar dapat mengurangi/menghilangkan fenomena *black hole* yang terjadi, sehingga mata pengendara kendaraan bermotor dapat beradaptasi dari cahaya matahari di luar terowongan terhadap cahaya di dalam terowongan dengan baik. Luminansi zona *threshold* malam hari pada Pasar Rebo kurang dari standar, sehingga perlu ada penambahan lampu untuk malam hari pada zona *threshold* tersebut.
- 2. Pencahayaan siang dan malam hari di zona interior pada Pasar Rebo mencapai nilai yang melebihi standar. Untuk itu lampu yang saat ini ada sebaiknya dilepas, jangan hanya dimatikan saja supaya tidak terkesan lampu mati/rusak.
- 3. Adanya lubang cahaya pada terowongan Pasar Rebo tidak terlalu menimbulkan silau, karena ukurannya yang tidak luas dan kedalamannya tinggi.
- 4. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa pencahayaan di terowongan belum memberikan performansi pencahayaan terowongan yang baik untuk pencahayaan siang maupun malam hari. Untuk itu perlu dilakukan otomatisasi pada sistem pencahayaan terowongan, agar pengaturan luminansi dan iluminansi pada siang dan malam hari memenuhi aspek kualitas pencahayaan suatu terowongan.

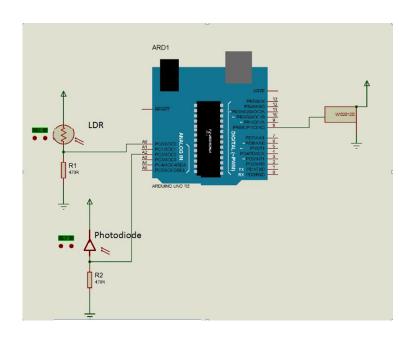
## 5.3 Perancangan dan Realisasi Model Sistem Pencahayaan Terowongan

Perancangan dan realisasi model sistem pencahayaan terowongan meliputi perancangan dan realisasi pencahayaan untuk malam hari dan untuk siang hari. Kondisi yang diinginkan pada malam hari yaitu luminansi (L) atau iluminansi (E) di sepanjang terowongan (untuk semua zona) adalah sama. Besarnya L atau E di dalam terowongan tidak jauh berbeda dengan L atau E di luar terowongan. Dalam rangka penghematan energi, kondisi pencahayaan terowongan malam hari tidak dilakukan dengan penurunan besarnya L atau E sebesar 50% pada pukul 12.00 sampai dengan pukul 05.00 (sesuai peraturan menteri no 13 tahun 2011 tentang penghematan energi listrik), namun dengan cara penurunan L atau E pada saat tidak ada mobil yang besarnya lebih kecil dibandingkan pada saat ada mobil yang melintasi terowongan. Kondisi yang diinginkan untuk pencahayaan pada siang hari adalah besarnya L atau E antara zona threshold, zona transisi, zona interior dan zona exit berbeda. Besarnya L atau E pada zona threshold lebih besar dari pada L atau E zona transisi. Besarnya L atau E pada zona transisi lebih besar daripada L atau E di zona interior. Besarnya L atau E di zona interior sedikit lebih kecil daripada L atau E di zona exit. Sementara itu L atau E di zona threshold mengikuti L atau E dari cahaya matahari. Tujuan pencahayaan terowongan siang hari dirancang demikian adalah untuk menghindari terjadinya "black hole efect' bagi mata pengendara mobil. Dalam rangka penghematan energi, maka pada saat tidak ada mobil, maka pencahayaan terowongan pada siang hari juga diredupkan.

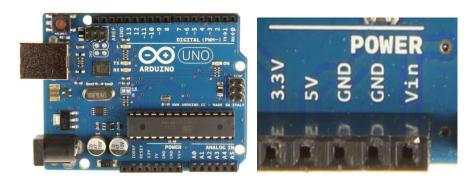
Penggunaan sensor LDR dan sensor photodioda, Arduino uno dan RGB LED dalam diagram Gambar 5.13 dan skema model terowongan dapat dilihat pada Gambar 5.14. Gambar 5.15 merupakan Arduino uno dan pin-pin yang tersedia dan hasil rangkaiannya dapat dilihat pada Gambar 5.16. Desain dan tahapan pembuatan base bawah dan dinding terowongan dapat dilihat pada Gambar 5.17 dan 5.18, sedangan Gambar 5.19 menunjukkan desain dan hasil akhir base bawah, dinding dan atap model terowongan.



Gambar 5.13 Diagram blok sesuai modul model sistem pencahayaan terowongan



Gambar 5.14 Skema rangkaian model sistem pencahayaan terowongan



Gambar 5.15 Arduino Uno dan pin-pin yang tersedia

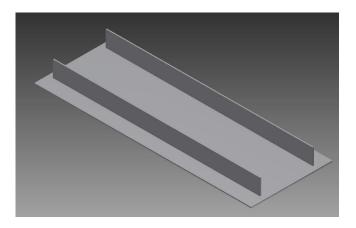


Gambar 5.16 Hasil Rangkaian Model Sistem Pencahayaan Terowongan

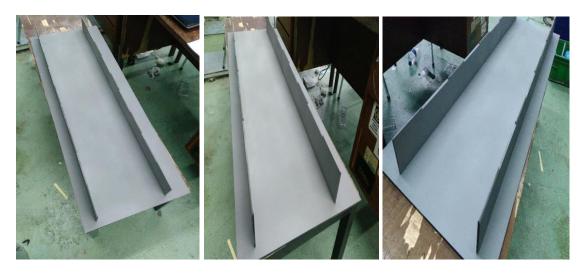
Perancangan ini menggunakan arduino yaitu jenis suatu papan (*board*) yang berisi mikrokontroler (*minimum system*). Papan mikrokontroler ini mempunyai ukuran yang kecil, hampir seukuran kartu kredit, dilengkapi dengan sejumlah pin yang dapat digunakan untuk berkomunikasi dengan peralatan lain. Salah satu arduino yang banyak digunakan adalah arduino uno yang mempunyai pin-pin seperti terlihat pada Gambar 5.15. Bagian-bagian pada Arduino Uno adalah:

- Mikrokontroler Atmega328 sebagai "otak" Arduino ini. Atmega328 adalah sebuah IC
   (integrated Circuit), yang dipasangkan ke header soket sehingga memungkinkan
   untuk dilepas untuk mengganti IC bila mengalami kerusakan.
- Konektor USB (*Universal Serial Bus*) berfungsi sebagai penghubung ke PC. Konektor ini bisa juga berfungsi sebagai pemberi tegangan bagi Arduino
- Konektor catu daya berfungsi sebagai penghubung ke sumber tegangan eksternal. Hal ini diperlukan bila konektor USB tidak terhubung ke PC. Adaptor AC- ke DC atau baterai dapat dihubungkan ke konektor ini. Konektor ini dapat menerima tegangan dari +7 hingga +12V.
- Arduino memiliki 14 pin digital dan 6 pin analog. Pin digital adalah pin yang digunakan untuk menerima atau mengirim isyarat digital. Isyarat 1 (sering dinyatakan dengan *HIGH*) direpresentasikan dalam bentuk tegangan +5V dan isyarat 0 (sering dinyatakan dengan *LOW*) diwujudkan dalam bentuk tegangan 0V. Nomor untuk pin digital berupa 0 hingga 13. Beberapa pin digital, dinamakan pin PWM dapat digunakan sebagai keluaran analog. Pin PWM ditandai dengan simbol ~. Ada 6 pin PWM, yaitu 2,5,6,9,10, dan 11.
- Pin analog adalah pin yang dipakai untuk menerima nilai analog. Jika dinyatakan dalam tegangan, nilai analog akan berkisar antara 0 hingga 5V. Pada pin analog, nilai seperti 1,0 atau 2,7 dimungkinkan.
- Pin sumber tegangan adalah pin yang memberikan catu daya kepada pin-pin lain yang membutuhkannya, terlihat dari Gambar 5.13, bagian-bagian pin tersebut adalah:
  - Vin berasal dari voltage in, adalah pin yang memberikan tengangan sama dengan tegangan luar yang diberikan kepada Arduino
  - o GDN berasal dari ground, terdapat 3 buah pin ground, 1 pin lain terletak di sebelah pin digital 13.
  - o 5V berisi tegangan 5V
  - o 3.3V berisi tengan 3,3 V

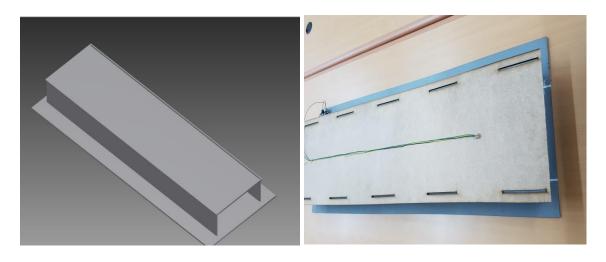
- LED yang tersedia berjumlah 4, yang masing-masing fungsinya adalah:
  - ON akan meyala bila Arduino mendapat sumber tegangan
  - o RX dan TX menyatakan data yang sedang dikirim dan diterima oleh Arduino
  - L adalah LED yang terhubung ke pin 13.
- Tombol reset akan membuat program yang ada pada Arduino dijalankan ulang.
   Terkadang, instruksi yang diberikan ke Arduino bisa menimbulkan hal-hal yang tidak normal (*error*). Pada keadaan seperti ini , tombol reset yang ditekan akan membuat sistem direset dan kembali diaktifkan kembali.



Gambar 5.17 Desain base bawah dan dinding model terowongan

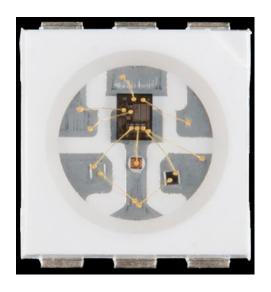


Gambar 5.18 Tahapan pembuatan base bawah dan dinding model terowongan



Gambar 5.19 Desain dan hasil akhir base bawah, dinding dan atap model terowongan

Cahaya yang digunakan untuk merealisasikan model terowongan ini berasal dari rangkaian Red, Green dan Blue Light Emitting Diode (RGB LED), untuk menggantikan lampu LED dan lampu HPS yang terpasang pada terowongan Pasar Rebo. Pada perancangan ini menggunakan RGB LED, dengan tipe WS2812. WS2812 merupakan LED RGB sederhana dengan rangkaian kontrol terpadu tersembunyi atau tertanam dalam satu paket, seperti terlihat pada Gambar 5.20 (diakses dari teknikelektronika.com). Terlihat pada LED RGB tersebut sebuah IC yang tertanam dalam LED, yang berfungsi sebagai pengendali semua proses penampilan warna pada RGB LED tersebut. Gambar 5.21 merupakan untaian LED RGB yang terdiri dari 35 buah RGB LED yang dipasang pada masing-masing dinding model terowongan, sehingga total RGB LED yang digunakan adalah 70 buah. Gambar 5.22 memperlihatkan warna-warna yang ditampilkan pada saat test program untuk RGB LED. Semula pemasangan RGB LED pada dinding ini secara tegak lurus dari masing-masing dinding, namun setelah dilakukan pengujian intensitas cahaya dari RGB LED ini tidak sampai pada lajur tengah dari model terowongan dan intensitas cahaya paling tinggi terdapat pada lajur kiri dan kanan (model terowongan terdiri dari 3 lajur, sesuai dengan terowongan Pasar Rebo). Untuk mengatasi kekurangan ini maka untaian RGB LED dipasang dengan sudut 45°, namun karena RGB LED ini berupa untaian yang tidak ada pengarah cahayanya, maka pada lajur tengah intensitas cahayanya juga masih lebih rendah dari lajur kiri dan kanannya.



Gambar 5.20 Bentuk fisik RGB LED tipe WS2812B



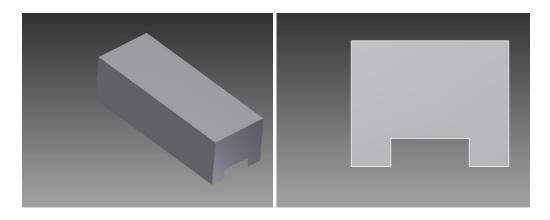
Gambar 5.21 Pemasangan untaian LED RGB pada dinding model terowongan



Gambar 5.22 Test program RGB LED, menghasilkan warna putih dan merah

Pencahayaan terowongan pada siang hari, dirancang mengikuti intensitas cahaya matahari, untuk merealisasikan keadaan ini pada model terowongan maka didesain boks selungkup terowongan yang dilengkapi dengan lampu. Lampu ini difungsikan sebagai

simulasi cahaya matahari. Desain boks selungkup, tampak bagian dalam boks selungkup saat lampu mati dan menyala, serta hasil akhir boks selungkup dapat dilihat pada Gambar 5.23, 5.24 dan 5.25. Gambar 5.26 merupakan tampak depan model terowongan dan boks selungkup, sedangkan Gambar 5.27 adalah nagian dalam dari terowongan saat RGB LED dinyalakan. Jarak dari muka boks selungkup sampai ke muka terowongan (portal) difungsikan sebagai simulasi zona akses, saat pengemudi mulai melihat adanya terowongan didepannya. Panjang zona akses tergantung dari kecepatan rencana pada terowongan. Untuk terowongan Pasar Rebo, kecepatan rencana adalah 80 km/jam, karena terowongan ini berada pada jalur tol. Panjang terowongan Pasar Rebo adalah 250 m, lebar 14,36 m dan tinggi 5 m. Model sistem terowongan ini mempunyai ukuran panjang 120 cm, lebar 14,5 cm dan tinggi 20 cm.



Gambar 5.23 Desain boks selungkup untuk simulasi luar terowongan



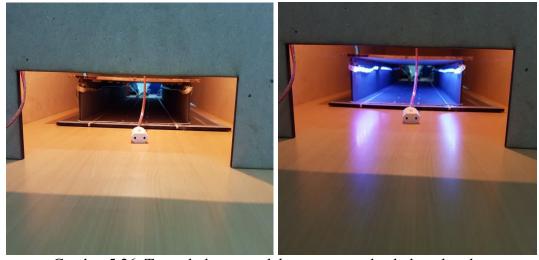


Gambar 5.24 Tampak bagian dalam boks selungkup terowongan untuk simulasi luar terowongan





Gambar 5.25 Hasil akhir boks selungkup terowongan untuk simulasi luar terowongan



Gambar 5.26 Tampak depan model terowongan dan boks selungkup

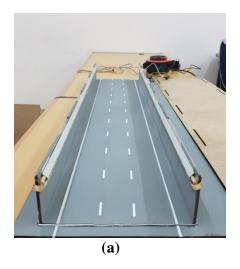


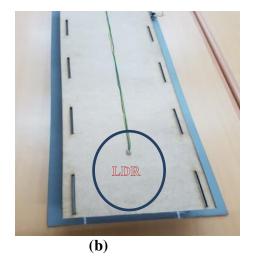
Gambar 5.27 Tampak bagian dalam model terowongan Pasar Rebo

# 5.4 Hasil Pengujian dan Analisis Model Sistem Pencahayaan Terowongan Pasar Rebo

Model sistem pencahayaan terowongan ini menggunakan mikrokontroler Arduino Uno, modul sensor cahaya, modul pendeteksi mobil dan RGB LED. Tampak pada Gambar 5.28 a. hasil rancangan seluruh modul rangkaian yang sudah diletakkan pada bagian samping dari dasar model terowongan dan Gambar 5.28 b merupakan model sistem terowongan yang ada LDR di bagian atas. Untuk melakukan simulasi intensitas cahaya matahari, maka dirancang suatu boks selungkup yang mempunyai panjang 150 cm yang dilengkapi dengan cahaya dari lampu pijar 100 W. Gambar 5.29.a adalah model terowongan yang diletakkan pada boks selungkup Gambar 5.29.b merupakan model sistem terowongan secara lengkap yaitu terdiri dari model terowongan dan boks selungkup untuk simulasi cahaya matahari.

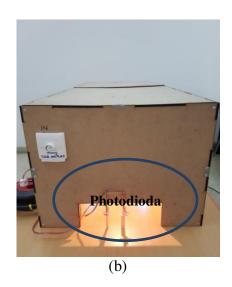
Model sistem pencahayaan terowongan ini terdiri dari beberapa kondisi yang tujuannya untuk optimalisasi penggunaan energi listrik. Kondisi pertama adalah otomatisasi pencahayaan siang dan malam hari pada saat ada kendaraan yang melewati maupun tidak. Kondisi kedua adalah pencahayaan di setiap zona yang mengikuti tinggi rendahnya intensitas cahaya matahari. Hasil rancangan model ini dibuat untuk memenuhi semua kondisi dan apabila model ini bisa diimplementasikan pada terowongan Pasar Rebo dan lainnya, maka diharapkan akan ada penghematan energi.





Gambar 5.28 Rancangan model terowongan (a) Modul keseluruhan yang ada disamping bagian dasar model terowongan dan (b) Model sistem terowongan yang ada LDR di bagian atas.



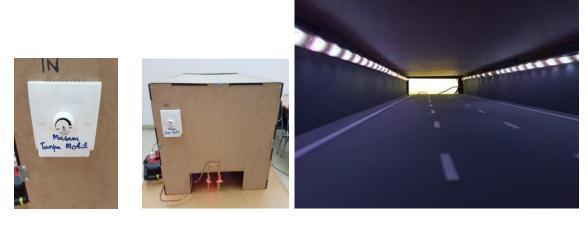


Gambar 5.29 Rancangan model terowongan (a) Model terowongan dalam boks selungkup untuk simulasi
(b) Model sistem terowongan secara lengkap

## 5.4.1 Hasil Pengujian Model Sistem Pencahayaan Terowongan Malam Hari

Terowongan pada malam hari mempunyai pencahayaan yang sama pada tiap zona terowongan dan mempunyai iluminansi yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan siang hari. Pada malam hari pencahayaan terowongan cukup mengikuti kondisi pencahayaan diluar terowongan, yaitu sesuai dengan pencahayaan jalan sebelum masuk maupun keluar terowongan. Model sistem pencahayaan terowongan malam hari dibagi dalam dua fitur, yaitu pertama sistem pencahayaan terowongan malam hari bila tidak ada mobil yang melewati terowongan (seperti pada Gambar 5.30) dan kedua sistem pencahayaan terowongan malam

hari bila ada mobil yang melewati terowongan (seperti pada Gambar 5.31). Iluminansi terowongan malam hari bila tidak ada mobil yang melewati terowongan lebih kecil dari pada iluminansi terowongan malam hari bila ada mobil yang melewati terowongan. Hal ini dimaksudkan untuk penghematan energi. Penurunan iluminansi pada model sistem pencahayaan terowongan ini dilakukan dengan cara menurunkan intensitas cahaya (yaitu dengan cara meredupkan) dari semua RGB LED yang ada di dalam terowongan. Jumlah total RGB LED adalah 70, yaitu 35 dipasang pada sisi kiri dan 35 dipasang pada sisi kanan dari model terowongan. Panjang terowongan adalah 120 cm, lebar 14,5 cm dan tinggi 20 cm. Model terowongan untuk satu jalur kendaraan. Pada jalur ini terdiri dari 3 jalur, dengan lebar masing-masing 3,5 cm, dan bahu jalan 2 cm dan jarak lajur 3 ke dinding terowongan 2 cm. Sementara itu lampu Pijar 100 Watt yang digunakan sebagai simulasi cahaya matahari dalam keadaan mati (cahaya gelap), dengan cara mengatur posisi potensiometer yang ada pada bagian depan terowongan dalam posisi minimum.



Gambar 5.30 Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan malam hari tidak ada mobil



Gambar 5.31 Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan malam hari ada mobil

# 5.4.2 Hasil Pengujian Model Sistem Pencahayaan Terowongan Siang Hari

Pencahayaan terowongan pada siang hari mempunyai dua fitur, yaitu pertama Pencahayaan Terowongan Siang Hari pada saat tidak ada kendaraan yang melewati terowongan (seperti pada Gambar 5.32) dan kedua pencahayaan terowongan siang hari pada saat ada kendaraan yang melewati terowongan (seperti pada Gambar 5.33). Iluminansi pencahayaan terowongan pada siang hari berbeda pada tiap zona. Iluminansi zona threshold lebih besar dari pada iluminansi zona transisi dan iluminansi zona transisi lebih besar dari pada iluminansi zona interior. Sedangkan iluminansi zona interior lebih besar atau sama dengan iluminansi zona exit. Perbedaan iluminansi ini mengikuti besar kecilnya iluminansi dari cahaya matahari, dimaksudkan untuk mengurangi efek *black hole* bagi pengendara kendaraan bermotor. Semua kondisi ini dibedakan pada saat tidak ada mobil dan ada mobil yang melintasi terowongan. Iluminansi semua zona pada saat tidak ada mobil lebih kecil dari pada iluminansi semua zona pada saat ada mobil yang melewati terowongan.

Pengujian untuk menentukan besar kecilnya intensitas cahaya, yaitu melalui simulasi lampu Pijar 100 W yang diletakkan di dalam boks selungkup terowongan. Sedangkan sensor LDR diletakkan di atas model sistem terowongan. Cahaya diperoleh dari cahaya handphone yang disorotkan pada sensor LDR (seperti terlihat pada Gambar 5.34). Pengujian untuk siang hari pada saat ada mobil dilakukan dengan cara:

- Mengatur potensiometer pada posisi dari minimum ke maksimum (untuk simulasi perubahan intensitas cahaya matahari) sehingga lampu pijar menyala dari minimum ke maksimum, sehingga diperoleh intensitas cahaya pada zona eksis di muka terowongan
- 2. Melewatkan mobil ke sensor photodiode yang ada di muka boks selungkup terowongan.
- 3. Menyalakan maksimum semua RGB LED pada zona transisi (panjang 25 cm dengan jumlah 8 RGB LED),
- 4. Meredupkan semua RGB LED pada zona threshold (terdisi dari 12 RGB LED pada panjang 40 cm).
- 5. Mengatur RGB LED pada kondisi nyala dan mati secara bergantian untuk sejumlah 15 RGB LED pada zona interior serta zona exit dengan panjang 55 cm.

Catatan: Nomor 3, 4 dan 5 dilakukan secara bersamaan. Berdasarkan tahapan ini, maka akan di peroleh intensitas cahaya yang berbeda pada tiap zona terowongan. Pengujian untuk siang hari bila tidak ada mobil, dilakukan dengan cara yang sama dengan di atas,

namun tahapan nomor 2 ditiadakan dan tahapan 3, 4 dan 5 pada kondisi diredupkan semua, sehingga intensitas cahayanya lebih kecil.

Berdasarkan semua pengujian yang telah dilakukan di atas, maka model sistem pencahayaan terowongan telah berhasil untuk:

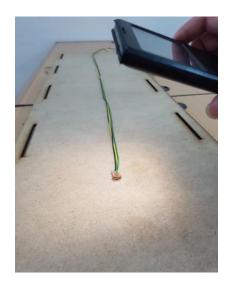
- Memenuhi semua fitur sesuai rancangan, baik pada siang dan malam hari
- Apabila model sistem pencahayaan ini bisa diimplementasikan ke terowongan Pasar Rebo, maka diharapkan akan diperoleh keamanan, kenyamanan, mengurangi black hole bagi pengguna kendaraan bermotor dan hemat energi

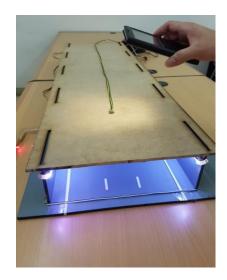


Gambar 5.32 Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan siang hari tidak ada mobil



Gambar 5.33 Hasil realisasi model sistem pencahayaan terowongan siang hari ada mobil





Gambar 5.34 Uji intensitas cahaya dengan memberikan cahaya Hp pada sensor LDR di atas atap model sistem terowongan

#### BAB 6

#### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

- 1. Model sistem pencahayaan terowongan dapat terealisasi sesuai dengan spesifikasinya.
- 2. Model sistem pencahayaan terowongan dapat memenuhi fitur ke satu yaitu pada siang hari intensitas pencahayaan di dalam terowongan dapat mengikuti intensitas pencahayaan matahari, terutama untuk zona threshold dan zona transisi. Hal ini dimaksudkan untuk penyesuaian mata dari pengendara kendaraan bermotor pada saat memasuki terowongan.
- 3. Model sistem pencahayaan terowongan dapat memenuhi fitur kedua, yaitu pada malam hari pencahayaan di terowongan mempunyai intensitas yang jauh lebih kecil dibandingkan pada siang hari. Pencahayaan pada malam hari disesuaikan dengan pencahayaan jalan umum di luar terowongan.
- 4. Model sistem pencahayaan terowongan dapat memenuhi fitur ketiga yaitu iluminansi pada saat tidak ada kendaraan bermotor lebih kecil daripada saat ada kendaraan bermotor. Hal ini dimaksudkan untuk penghematan energi listrik, yaitu untuk memenuhi Permen tahun 2012.
- 5. Kelemahan pada sistem ini adalah penggunaan RGB LED yang digunakan sebagai pengganti jenis lampu sebenarnya (lampu LED) yang tidak dapat mengikuti spesifikasi dari jenis lampu LED. Hal ini disebabkan RGB LED tidak ada pengarah cahayanya, sehingga intensitas cahaya yang diperoleh tidak sampai pada jalur tengah dengan baik. Seharusnya jalur tengah ini intensitasnya sama dengan jalur kanan dan kiri, sehingga *uniformity* dapat terpenuhi.

# 6.2 Saran

- Diperlukan daya yang lebih tinggi dari RGB LED yang digunakan untuk pembuatan model sistem pencahayaan terowongan, sehingga diharapkan cahayanya dapat menjangkau ke lajur tengah.
- 2. Selain itu diperlukan pengaturan sudut tertentu, sehingga peletakkan RGB LED dapat lebih baik, yaitu cahayanya lebih merata.

#### DAFTAR PUSTAKA

R. Boylestad dan L. Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*, 10<sup>th</sup> ed., USA: Prentice Hall International Editions, 2008.

Buraczynski, John J.; Li, Thomas K.; Kwong, Chris; and Lutkevich, Paul J., 2010. *Tunnel Lighting Systems*" 4th International Symposium on Tunnel Safety and Security. Frankfurt Germany.

Commision International de L'Ecclairage, 2004. CIE Technical Report: Guide for Lighting Road Tunnels and Underpasses CIE 88-2004, 2nd Edition. Vienna: CIE Central Bureau.

Departemen Pekerjaan Umum, *Geometri Jalan Bebas Hambatan untuk Jalan Tol: Standar Kontstruksi dan Bangunan*, Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum, 2009, No. 007/BM, halaman 7.

Fat, Joni; Setyaningsih, Endah; Zureidar, dan Ida; Wardhani, Lydwina., "Kinerja Lampu LED Terpasang untuk Jalan Non Tol DKI Jakarta", 2013, Lembaga Penelitian dan Publikasi Ilmiah, Universitas Tarumanagara.

Illuminating Engineering Society, 2010. *IES Lighting Handbook*, 9th edition.

Illuminating Engineering Society of North America, 2011. "ANSI/IES RP-22-11: *Tunnel Lighting*". New York: IESNA.

Liu, Huo-Yen, 2005. Design Criteria for Tunnel Lighting, World 2005 Long Tunnel.

Nordisk VejtekniskForbund, 1995. Road Tunnel Lighting: Common Nordic guidelines. Copenhagen: NVF.

Phadnis, Mohit, 2012. Lighting Design Of An Urbanised Tunnel

Setyaningsih, Endah; Zureidar, Ida; Susatyo, Budi., 2013, "Evaluasi Tata Pencahayaan Kawasan Jalan Non Tol Pangeran Antasari", Dinas Perindustrian dan Energi, DKI Jakarta.

SNI No. 7391, Penerangan Jalan Umum, Badan Standarisasi Nasional, 2008.

Thorn, 2004. Tunnel Lighting. Hertfordshire: Thorn Lighting Main Office.

# Lampiran 1 List Program

```
// terdapat 3 daerah di terowongan: luar, threshold, transition, interior
     // tingkat keterangan antara luar terowongan dan ujung mulut terowongan
                        (threshold)>> threshold 50% luar
  // led threshold memiliki tingkat keterangan yang menurun dari 3000 hingga 1500
                            (atau sebanding) >> 8 led
// led transition memiliki tingkat keterangan yang menurun dari 1500 hingga 60 (atau
                              sebanding) >> 12 led
      // led interior memiliki tingkat keterangan yang sama yaitu 60 >> 15 led
                             #include "FastLED.h"
                      #define NUM_LEDS 70 //jumlah led
           #define DATA_PIN 8 // data pin yang terhubung dengan led
        #define LDR1 limit 300 // batas nilai ldr pembeda siang dan malam
        #define LDR2 limit 300 // batas nilai ldr pembeda siang dan malam
    #define LDR_Pin1 A0 // pin yang digunakan untuk pembacaan nilai LDR 1
    #define LDR_Pin2 A1 // pin yang digunakan untuk pembacaan nilai LDR 2
          CRGB leds[NUM_LEDS]; // variabel yang mewakili setiap led
//variabel warna menampung nilai hexa dari setiap warna yang akan digunakan, warna
 dimulai dari indeks 0 (paling terang) hingga indeks 14(paling redup) dan indeks 15
                                     (mati)
 // warna akan semakin redup apabila setiap nilai pada masing-masing elemen warna
   (dalam hal ini GRB, jadi 0xB4F928 memiliki G:B4, R:F9, dan B:28) dikurangi
                             dengan nilai yang sama
                            //const long warna[16] =
{0xFFFFF,0xEEEEEE,0xDDDDDD,0xCCCCCC,0xBBBBBB,0xAAAAAA,0x999
999,0x888888,0x777777,0x666666,0x555555,0x444444,0x333333,0x222222,0x1111
                                 11,0x000000);
                             const long warna[16] =
{0xB4F928,0xA3E817,0x92D706,0x81C6F5,0x70B5E4,0x6FA4D3,0x5E93C2,0x4D
82B1,0x3C71A0,0x2B609F,0x1A5F8E,0x094E7D,0xF83D6C,0xE72C5B,0xD61B4
                                 A,0x0000000};
                        //mengatur brightness, maks 255
                           long BRIGHTNESS = 255;
                      //fungsi setup, dijalankan pertama kali
                                 void setup() {
                               //inisiasi WS2812B
       FastLED.addLeds<WS2812B, DATA_PIN, RGB>(leds, NUM_LEDS);
                                       }
```

```
void loop()
    { int whiteLed=0; // variabel sebagai counter indeks led dalam looping
        int LDR_One=0, LDR_Two=0; // variabel penampung ADC LDR
                            // membaca nilai LDR
                     LDR_One=analogRead(LDR_Pin1);
                     LDR_Two=analogRead(LDR_Pin2);
 BRIGHTNESS = ((LDR_One+LDR_Two)/2)/4; // brightness sebanding dengan
                                keadaan luar
if(BRIGHTNESS>200) // jika tingkat keterangan yang diterima LDR > 200, maka
                       brightness led akan diatur maks
                             BRIGHTNESS=255;
else if(BRIGHTNESS<25) // jika LDR<25, maka akan diatur 25, untuk mencegah
                           brightness=0 atau mati
                             BRIGHTNESS=25;
 FastLED.setBrightness(BRIGHTNESS); // fungsi untuk men-set brightness led
    if(LDR_One < LDR1_limit || LDR_Two < LDR2_limit) // saat malam hari
  ditandakan dengan salah satu nilai LDR yang diterima lebih kecil dari batas
                                      {
  for(whiteLed=0;whiteLed<69; whiteLed = whiteLed+1) // daerah interior -- 15
                                   LED
 if(whiteLed == 16) // indeks 16 adalah daerah transisi, maka lompat ke indeks 56
           yaitu daerah interior tapi di sisi terowongan yang berbeda
                                whiteLed = 56;
 if(whiteLed%2==0) // untuk mengatur agar hanya led dengan indeks genap yang
          menyala sementara led ganjil mati (karena daerah interior)
                           leds[whiteLed] = warna[0];
                                     else
                          leds[whiteLed] = warna[15];
  for(whiteLed=16;whiteLed<56; whiteLed = whiteLed+1) // mencakup daerah
              transisi dan daerah threshold, dinyalakan maksimal
                          leds[whiteLed] = warna[0];
                            else // saat siang hari
for(whiteLed = 28; whiteLed <44; whiteLed = whiteLed+1) // daerah threshold -- 8
                                   LED
                               if(whiteLed<36)
  leds[whiteLed] = warna[35-whiteLed]; //nilai led akan menjadi semakin terang,
                           mulai dari awal daerah
```

```
else if(whiteLed>=36 && whiteLed<44)
   leds[whiteLed] = warna[whiteLed-36]; //nilai led akan menjadi semakin redup
            (bandingkan dengan variabel warna yang telah diinisiasi)
 for(whiteLed = 16; whiteLed < 56; whiteLed = whiteLed+1) // daerah transition --
                                    12 LED
                                 if(whiteLed<28)
 { if(whiteLed%2==0) // agar led meredup setiap 2 led, warna akan berubah setiap
                                   led genap
     leds[whiteLed] = warna[((27-whiteLed)/2)+8]; //dibagi dua karena efek dari
                                   modulo 2
   else if(whiteLed%2!=0)// jika led ganjil warna akan mengikuti led sebelumnya
                         leds[whiteLed] = leds[whiteLed-1];
 else if( whiteLed == 28) // daerah transisi hanya sampai 27, selanjutnya langsung
      lompat ke led 44, led pertama daerah transisi di sisi dinding berbeda
                                  whiteLed = 44;
                     else if(whiteLed>=44 && whiteLed <56)
  {if(whiteLed%2==0) // agar led meredup setiap 2 led, warna akan berubah setiap
                                   led genap
     leds[whiteLed] = warna[((whiteLed-44)/2)+8]; //dibagi dua karena efek dari
                                   modulo 2
   else if(whiteLed%2!=0)// jika led ganjil warna akan mengikuti led sebelumnya
                         leds[whiteLed] = leds[whiteLed-1];
for(whiteLed=0;whiteLed<69; whiteLed = whiteLed+1) // daerah interior -- 15 LED
  if(whiteLed == 16)// indeks 16 adalah daerah transisi, maka lompat ke indeks 56
           yaitu daerah interior tapi di sisi terowongan yang berbeda
                                  whiteLed = 56;
  if(whiteLed%2==0) // untuk mengatur agar hanya led dengan indeks genap yang
           menyala sementara led ganjil mati (karena daerah interior)
                           leds[whiteLed] = warna[14];
                                       else
                           leds[whiteLed] = warna[15];
                 FastLED.show(); // fungsi untuk menyalakan led
                                   delay(100);
                                       }
```

## Lampiran 2

#### Ketersedian Sarana dan Prasarana Penelitian

## Laboratorium yang digunakan:

- Laboratorium Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
   Universitas Tarumanagara, Jakarta
- Laboratorium Pemrograman, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Tarumanagara.

# Peralatan untuk penelitian ini:

- Luxmeter dipinjam dari Laboratorim Fisika Bangunan, Jurusan Arsitektur,
   Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara
- Alat ukur meteran untuk jalan raya, dipinjam dari PT. Focus Daya Utama,
   Kontraktor Bidang Penerangan Jalan Umum
- Luminance Meter, dipinjam dari Program Studi Teknik Fisika ITB.
- Perlengkapan saat pengukuran (rambu, cone penyekat, dll), sewa (jika memungkinkan) dari polisi lalu lintas di sekitar lokasi pengukuran
- Rompi pengaman dan helm, dibeli atau sewa (jika memungkinkan) dari polisi lalu lintas di sekitar lokasi pengukuran
- Multimeter, Osiloskop dan *Otomatic Distance Meter*, dipinjam dari Laboratorium Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Tarumanagara.
- Komputer lengkap, dipinjam dari laboratorium pemrograman Fakultas Teknologi Informasi Universitas Tarumanagara

## 3. Material yang dibeli:

- Komponen untuk pembuatan modul mikrokontroler
- Komponen untuk pembuatan modul Sensor LDR
- Komponen untuk pembuatan modul sensor pendeteksi mobi
- Komponen untuk pembuatan modul catu daya 5 Vdc dan 12 Vdc
- Lampu RGB LED