

TESIS

**PENGATURAN DAYA LAMPU LED UNTUK OPERASI
EFISIENSI LAMPU-LAMPU JALAN YANG
TERINTERKONEKSI SECARA NIRKABEL**

*LED Power Setup for the Efficiency Operation of
Wirelessly Interconnected Street Lights*

**MAYA ITASARI
D032202003**



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



Optimized using
trial version
www.balesio.com

PENGAJUAN TESIS

PENGATURAN DAYA LAMPU LED UNTUK OPERASI EFISIENSI LAMPU-LAMPU JALAN YANG TERINTERKONEKSI SECARA NIRKABEL

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**MAYA ITASARI
D032202003**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



TESIS

PENGATURAN DAYA LAMPU LED UNTUK OPERASI EFISIENSI LAMPU-LAMPU JALAN YANG TERINTERKONEKSI SECARA NIRKABEL

MAYA ITASARI
D032202003

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 25 Agustus 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, ST, MT, IPU, ACPE
NIP. 19750605 200212 1 004

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Pembimbing Pendamping



Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T.
NIP. 19720908 199702 2 001

Ketua Program Studi
S2 Teknik Elektro



uhammad Isran Ramli, ST., MT, IPM., ASEAN Eng.
19730926 200012 1 002

Dr. Eng. Ir. Wardi, ST, M.Eng.
NIP. 19720828 199903 1 003



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Maya Itasari
Nomor mahasiswa : D032202003
Program studi : Magister Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Pengaturan Daya Lampu LED untuk Operasi Efisiensi Lampu-Lampu Jalan yang Terinterkoneksi secara Nirkabel” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof.Dr.-Ing.Ir.Faizal Arya Samman, ST,MT,IPU,ACPE. NIP. 19750605 200212 1 004 dan Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T. NIP. 19720908 199702 2 001). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding 2023 The 18th IMT_GT *International Conference on Mathematics, Statistics, and Their Applications (ICMSA)* sebagai artikel dengan judul “*Comparative Study of the Interconnected Street Light Luminance Levels Control for Energy Efficiency*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 25 Agustus 2023
Yang menyatakan



Maya Itasari



KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Azza wa Jalla, karena hanya dengan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan Tesis ini. Shalawat serta salam semoga tetap terlimpahkan kepada junjungan kita Rasulullah Shallallahu'alaihi Wasallam, sang pembawa kabar gembira dan sebaik-baiknya tauladan bagi yang mengharap Rahmat dan Hidayah-Nya.

Selama proses penulisan Tesis ini, begitu banyak bantuan dan dukungan yang diterima penulis dari berbagai pihak, untuk itu dalam kesempatan ini penulis dengan penuh ketulusan ingin menyampaikan ucapa terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua sersayang, H.Muhammad Tang Said, Sm.Hk dan Ibu Hj.Indo Isa Nurdin serta kedua saudara, Yustiana, SH., MH. dan Ilham Rahmatullah, SH., Amd.B.Ing dan segenap keluarga yang dengan ikhlas memberikan doa dan dukungan selama proses penyelesaian tesis ini.
 2. Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, ST, MT, IPU, ACPE, selaku pembimbing I dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T., selaku pembimbing II, terima kasih banyak atas ilmu, bimbingan, dan waktu yang telah diberikan sehingga penyusunan tesis ini dapat terselesaikan.
 3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU., Bapak Yusri Syam Akil, ST., MT., Ph.D., dan Ibu Prof. Ardiati Arief, ST. MTM. Ph.D., sebagai dewan penguji, terima kasih atas masukan dan arahannya dalam penyelesaian tesis ini.
 4. Bapak Dr. Eng. Ir. Wardi, ST. M.Eng., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
 5. Segenap Dosen Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan bimbingan selama penulis menuntut ilmu di Universitas Hasanuddin serta segenap Pegawai Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang senantiasa membantu dalam pengurusan administrasi.
- teman-teman seperjuangan Magister Teknik Elektro 2020 (2) dan 2021 atas motivasi, dukungan dan arahannya.



7. Teman-teman dan adik-adik di Laboratorium Elektronika dan Divais, terima kasih atas sambutan hangat dan kesempatan untuk bergabung dalam proyek penelitian, semoga kita bisa menyelesaikan studi dengan baik.
8. Evi Damayanti, Dianti Utamidewi, Haris Mukasir, Indry Artini, atas doa, bantuan, dan dukungannya. Terkhusus untuk Martati terima kasih telah berjuang bersama di konsentrasi Teknik Kendali hingga studi kita selesai.
9. Kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu semoga senyum terbaik, doa yang tulus, motivasi, dan saran yang telah diberikan bernilai pahala.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam tesis ini. Oleh karena itu, saran dan kritik dari semua pihak diharapkan untuk kesempurnaan tesis ini. Penulis berharap semoga tesis ini dapat diterima sebagai kontribusi pikiran peneliti yang mendatangkan manfaat baik bagi penulis maupun pembacanya.

Akhir kata, tiada kata yang patut penulis ucapkan selain rasa syukur dan doa, jazakumullah khairan katsiran semoga Allah Azza wa Jalla memberikan balasan dengan sebaik-baik balasan dan mengumpulkan kita kelak di sebaik-baik tempat kembali.

Penulis

Maya Itasari



ABSTRAK

MAYA ITASARI. *Pengaturan Daya Lampu Led untuk Operasi Efisiensi Lampu-Lampu Jalan Yang Terinterkoneksi secara Nirkabel* (dibimbing oleh **Faizal Arya Samman, A. Ejah Umraeni Salam**)

Komitmen pemerintah untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 29% pada rentang tahun 2020-2030 diperlihatkan dengan salah satu usaha dalam melakukan penerapan efisiensi energi pada infrastruktur alat penerangan jalan (APJ). Manfaat lain dari penggunaan energi yang efisien yaitu mengurangi biaya listrik untuk alat penerangan jalan. Berdasarkan data statistik PLN, tarif listrik untuk APJ merupakan tarif termahal, yakni Rp1.461,49-Rp1.447,06 / kWh. Dengan melihat kondisi tersebut, diperlukan sebuah teknologi yang dapat memberikan inovasi dalam pemanfaatan alat penerangan jalan yang efisien. Penelitian ini berfokus pada adopsi teknologi efisiensi energi di negara-negara berkembang, dimana tantangan infrastruktur, anggaran dan regulasi yang berbeda-beda. Melalui pengembangan model simulasi yang lebih realistis dan diimplementasikan pada prototipe untuk mendapatkan hasil pengujian sistem yang lebih akurat. Perencanaan penghematan energi pada penelitian ini adalah menerapkan lampu jalan dengan sistem adaptif yang saling terinterkoneksi. Metode tersebut berupa sistem *on-off* lampu jalan yang tepat waktu dan perubahan pencahayaan dengan pengaturan daya berdasarkan nilai *Pulse Width Modulation* (PWM). Lampu jalan yang dirancang juga dapat dipantau dan dikontrol melalui *website* sehingga memudahkan proses pemeliharaan dan perbaikan. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan prototipe lampu jalan dan menerapkan sistem pengaturan daya, sistem lampu jalan yang dirancang mampu menghemat penggunaan energi listrik sebesar 18,81%.

Kata kunci: alat penerangan jalan, efisiensi energi, *Pulse Width Modulation*



ABSTRACT

MAYA ITASARI. *LED Power Setup for the Efficiency Operation of Wirelessly Interconnected Street Lights* (Supervised by **Faizal Arya Samman, A. Ejah Umraeni Salam**)

The government's commitment to reducing greenhouse gas emissions by 29% in the 2020–2030 is demonstrated by one of the efforts to apply energy efficiency to street lighting equipment (APJ). Another benefit of efficient energy use is reduced electricity costs for street lighting devices. Based on PLN statistical data, the electricity tariff for APJ is the most expensive, namely IDR1,461.49-IDR1,447.06/kWh. By looking at these conditions, a technology is needed that can provide innovation in the use of efficient street lighting. This research focuses on the adoption of energy-efficient technologies in developing countries, where infrastructure, budgetary, and regulatory challenges vary. Through the development of a more realistic simulation model and its implementation on a prototype to obtain more accurate system testing results. Energy-saving planning in this study is to apply street lights with an interconnected adaptive system. The energy-saving plan in this study is to implement an interconnected adaptive streetlight system. The method is in the form of a streetlight on-off system that is timely, and lighting changes with power settings based on Pulse Width Modulation (PWM) values. Streetlights that are designed can also be monitored and controlled through the website to facilitate the maintenance and repair process. Based on the test results using a street lamp prototype and applying a power control system, the designed streetlight system is able to save 18,81% of electricity usage.

Keywords: street lighting equipment, energy efficiency, Pulse Width Modulation



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN DAN SIMBOL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Kajian Penelitian Terkait	6
2.2 Alat Penerangan Jalan	8
2.3 Besaran Pencahayaan	9
2.3.1. Intensitas Cahaya	10
2.3.2. Fluks Cahaya (<i>Luminous Flux</i>).....	10
2.3.3. Iluminasi.....	11
2.3.4. Luminansi.....	11
2.4 Jenis-jenis Lampu	12
1. Lampu Pijar.....	13
2. Lampu Fluoresen.....	13
3. Lampu Uap Merkuri/ <i>Mercury Vapor</i>	14



2.4.4.	Lampu <i>Metal Halide</i>	14
2.4.5.	Lampu Natrium (Natrium)	14
2.4.6.	Lampu LED (<i>Light Emitting Diode</i>)	15
2.5	Manajemen Energi Listrik untuk Pencahayaan	15
2.5.1.	Mengoptimalkan Kapasitas	15
2.5.2.	Mengoptimalkan Kontrol	16
2.5.3.	Menggunakan Konsep Pasif	16
2.5.4.	Tingkat Operasi dan Pemeliharaan	16
2.6	<i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	16
2.7	<i>Long-Range (LoRa)</i>	19
2.8	Topologi Jaringan	21
2.8.1.	Topologi <i>Bus</i>	22
2.8.2.	Topologi <i>Star</i>	22
2.8.3.	Topologi <i>Ring</i>	23
2.8.4.	Topologi <i>Mesh</i>	23
2.8.5.	Topologi <i>Tree</i>	24
2.8.6.	Topologi <i>Hybrid</i>	24
BAB III	PERANCANGAN SISTEM	25
3.1	Tahapan Penelitian	25
3.2	Pemodelan dan Komponen Sistem	25
3.3	Simulasi Proteus	30
3.4	Perancangan Sistem	31
3.5	Perancangan Perangkat Keras	32
3.6	Perancangan Perangkat Lunak	34
3.6.1.	Algoritme Kontrol	34
3.6.2.	Protokol Komunikasi Data	37
3.6.3.	Desain <i>Website</i>	38
3.7	Skenario Pengujian	38
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	40
	Hasil Simulasi Lampu Jalan	40
1.	Simulasi dengan Pengaturan Nilai PWM	40
2.	Simulasi Mode LDR	43



4.2 Implementasi Alat	44
4.2.1. Lampu Jalan	44
4.2.2. <i>Website Monitoring</i>	47
4.3 Perbandingan Hasil Pengujian.....	49
4.4 Analisis Tekno-Ekonomi.....	51
4.5 Pengujian dan Analisis Protokol Komunikasi.....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN.....	62



DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1	Perkembangan teknologi pencahayaan selama lebih dari 130 tahun terakhir (El-Zein, 2013)	12
Gambar 2	Pulsa PWM berdasarkan duty cycle (Gadgetronicx Team, 2021)...	17
Gambar 3	Arsitektur LoRaWAN (LoRa Alliance®, 2015)	20
Gambar 4	Kapasitas jaringan LoRaWAN™ (LoRa Alliance®, 2015)	20
Gambar 5	Jenis-jenis topologi jaringan (Gillis, 2021)	21
Gambar 6	Topologi hybrid (Lelisa Army et al., 2022).....	24
Gambar 7	Framework system.....	26
Gambar 8	Rangkaian lampu LED	27
Gambar 9	Model rangkaian simulasi lampu jalan.....	30
Gambar 10	Tampilan monitoring pada simulasi menggunakan Software Proteus 8 Professional.....	31
Gambar 11	Diagram pengkabelan dan kontrol sistem.....	32
Gambar 12	Skematik LED string	33
Gambar 13	Skematik kontrol lampu jalan.....	33
Gambar 14	Skematik kontrol utama lampu jalan	34
Gambar 15	Flowchart kontrol utama.....	35
Gambar 16	Flowchart lampu jalan	36
Gambar 17	Flowchart website.....	37
Gambar 18	Protokol komunikasi data	37
Gambar 19	Tampilan website lampu jalan.....	38
Gambar 20	Hasil simulasi dengan nilai PWM 100%	40
Gambar 21	Hasil simulasi dengan nilai PWM 70%	41
Gambar 22	Hasil simulasi dengan nilai PWM 50%	41
Gambar 23	Perubahan daya lampu jalan berdasarkan variasi PWM.....	42
Gambar 24	Simulasi mode LDR aktif	43
Gambar 25	Simulasi mode LDR aktif	43
Gambar 26	(a) Kontrol utama dan (b) Lampu jalan	44
Gambar 27	Lampu jalan dengan sistem kontrol dan monitoring	45
Gambar 28	Pengujian lampu jalan.....	45



Gambar 29 Grafik daya lampu jalan tanpa pengaturan nilai PWM	46
Gambar 30 Grafik perubahan daya lampu jalan dengan pengaturan variasi PWM	47
Gambar 31 Tampilan website monitoring	48
Gambar 32 Tampilan website monitoring mode M	49
Gambar 33 Database monitoring lampu jalan	49
Gambar 34 LED string	50
Gambar 35 Skenario 1	53
Gambar 36 Skenario 2	54
Gambar 37 Tampilan serial monitor pada Arduino IDE	55



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 State of the art.....	6
Tabel 2 Jenis-jenis alat penerangan jalan	8
Tabel 3 Hasil monitoring simulasi lampu jalan dengan variasi nilai PWM.....	42
Tabel 4 Hasil pengujian lampu jalan dengan nilai PWM 100 %	46
Tabel 5 Hasil pengujian lampu jalan dengan variasi PWM	47
Tabel 6 Hasil monitoring lampu jalan dengan mode M	48
Tabel 7 Perbandingan hasil pengujian simulasi, lampu jalan dan analisis rangkaian.....	51
Tabel 8 Hasil pengujian pengiriman data LoRa skenario 1	54
Tabel 9 Hasil pengujian pengiriman data LoRa skenario 2	55



DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1	Proses uji coba komponen sebelum membuat skematik dan PCB layout.....	62
Lampiran 2	Proses fabrikasi layout PCB	63
Lampiran 3	Uji coba rangkaian	65
Lampiran 4	Pengujian dan pengambilan data	66
Lampiran 5	Listing program.....	67
Lampiran 6	Monitoring dan database.....	80
Lampiran 7	Rangkaian simulasi proteus 8 professional.....	81
Lampiran 8	Skematik lampu jalan	82
Lampiran 9	Skematik kontrol utama lampu jalan	83



DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN DAN SIMBOL

Istilah/Singkatan/Symbol	Arti/Penjelasan
APJ	= Alat Penerangan Jalan
PJU	= Penerangan Jalan Umum
LED	= Light Emitting Diode
PWM	= Pulse Width Modulation
EES	= Electricity Energy Saving
MOSFET	= Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
LoRa	= Long Range
LPWAN	= Low Power Wide Area Network
RTC	= Real Time Clock
AC	= Alternating Current
DC	= Direct Current
Wh	= Watt hour
kWh	= kilo Watt hour
IoT	= Internet of Things
HPL	= High Pressure LED
LDR	= Light Dependent Resistor
V	= Volt
A/mA	= Ampere/ mili Ampere
P	= Power/Daya
I	= Arus
Φ	= Fluks Cahaya
ω	= Sudut Ruangan
Q	= Energi Cahaya
t	= Waktu
T	= Periode
f	= Frekuensi
cd	= Candela
m	= Meter
PCB	= Printed Circuit Board



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencahayaan jalan memiliki peran vital dalam memberikan kenyamanan dan keamanan bagi masyarakat serta memfasilitasi berbagai aktivitas di lingkungan perkotaan. Namun, penggunaan tradisional lampu jalan dengan teknologi yang konvensional sering kali tidak efisien dari segi energi dan menghasilkan dampak lingkungan yang negatif. Selain itu, meningkatnya permintaan energi dan kebutuhan peningkatan efisiensi energi dalam konteks perubahan iklim global telah memunculkan urgensi untuk mencari solusi yang lebih berkelanjutan dalam penggunaan sumber daya.

Komitmen pemerintah pada *Paris Agreement Article 4.19* untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 29 % pada rentang tahun 2020-2030 diperlihatkan dengan salah satu usaha dalam melakukan penerapan efisiensi energi pada infrastruktur alat penerangan jalan (APJ) (Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim - Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021). Manfaat lain dari penggunaan energi yang efisien yaitu mengurangi biaya listrik untuk alat penerangan jalan. Berdasarkan data statistik PLN, tarif listrik untuk APJ merupakan tarif termahal, yakni Rp1.461,49 - Rp1.447,06 / kWh. Perencanaan efisiensi energi untuk APJ dapat dilakukan dengan penggunaan lampu hemat energi, pengukuran APJ (dalam kWh meter) dan penerapan sistem cerdas lampu jalan untuk mengatur dan mengontrol status APJ secara keseluruhan (Sekretariat Perusahaan PT PLN (Persero), 2021).

Sesuai dengan Permenhub No. 27 tahun 2018 salah satu jenis lampu yang dapat digunakan pada APJ yaitu lampu *light emitting diode (LED)*. Teknologi lampu LED hadir sebagai solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi pencahayaan sehingga dapat diterapkan pada instalasi penerangan jalan untuk menggantikan teknologi yang ada saat ini (Pereira *et al.*, 2015). Keunggulan lampu

u efisiensi energi yang jauh lebih tinggi, kemampuan *dimmer* (peredupan) sibel, memiliki *life time* yang lebih lama dan memproduksi panas yang



lebih serta penurunan biaya investasi (Campisi, Gitto and Morea, 2018; Nasir, Abdullah and Yaseen, 2019).

Sejalan dengan perkembangan teknologi, kemampuan untuk mengintegrasikan sistem lampu jalan secara nirkabel juga berkembang pesat. Konsep pencahayaan jalan yang terinterkoneksi nirkabel memberikan peluang untuk mengoptimalkan pengaturan dan operasi lampu secara cerdas dan efisien. Sebagai contoh yaitu pengaturan daya yang adaptif, pengendalian jarak jauh dan sistem pemantauan merupakan fitur-fitur yang dapat diimplementasikan untuk mencapai penghematan energi yang lebih besar.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan seperti sistem cerdas lampu jalan dengan mendeteksi getaran pergerakan kendaraan dan pejalan kaki menggunakan sensor piezoelectric (Abinaya, Varsha and Hariharan, 2017) dan untuk mengobservasi pergerakan pengendara di jalanan dan menyalakan lampu jalan yang berada di lokasi pengendara (Al-Smadi *et al.*, 2019). Metode pembagian waktu penyalaan lampu jalan dan deteksi pejalan kaki ataupun kendaraan menggunakan sensor PIR dan GPS untuk data penggunaan rute individu. (Modabbir and Mohammad, 2021). Selanjutnya, pengaturan penyalaan lampu jalan (*on-off*) pada waktu tertentu berdasarkan banyaknya kendaraan yang melintas di daerah tersebut serta menggunakan komunikasi NB-IoT untuk pengiriman data ke *server* (Thungtong, Chaichan and Suwannarat, 2021).

Potensi dari teknologi lampu LED dan pengaturan nirkabel memungkinkan penelitian yang lebih komprehensif dan mendalam untuk mengidentifikasi tantangan, manfaat dan dampak dari implementasi sistem pencahayaan yang lebih efisien ini. Sehingga nantinya sistem yang dibuat tidak hanya efisien secara energi tetapi juga memberikan manfaat sosial dan ekonomi yang signifikan.

Penerapan interkoneksi nirkabel untuk perluan pemantauan ataupun pengendalian juga dilakukan pada beberapa penelitian seperti penggunaan *ZigBee* yang mendukung efisiensi karena konsumsi daya yang rendah (Daely *et al.*, 2017), *edge computing devices* untuk memfasilitasi pemrosesan data masif (Yang *et al.*, *arrowband internet of things* karena penggunaan daya rendah dan ng konektivitas perangkat dalam skala besar namun implementasi NB-IoT g pada dukungan dan perencanaan operator seluler (NB-IoT) (Jia *et al.*,



2018; Thungtong, Chaichan and Suwannarat, 2021) dan *Long-Range (LoRa)* hadir dengan konsumsi daya rendah, biaya implementasi yang lebih murah serta jarak jangkauan yang jauh dibandingkan teknologi nirkabel lainnya (Sanchez-Sutil and Cano-Ortega, 2021).

Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah pengetahuan yang ada dengan menganalisis potensi dan implikasi pengaturan daya lampu LED untuk efisiensi lampu-lampu jalan yang terinterkoneksi nirkabel. Penelitian ini berfokus pada adopsi teknologi efisiensi energi di negara-negara berkembang, dimana tantangan infrastruktur, anggaran dan regulasi yang berbeda-beda. Melalui pengembangan model simulasi yang lebih realistis dan diimplementasikan pada prototipe untuk mendapatkan hasil pengujian sistem yang lebih akurat. Selain itu, analisis tekno ekonomi dibuat untuk kajian dampak lingkungan, manfaat dan keberlanjutan pengoperasian sistem.

Pada penelitian ini akan dibuat lampu jalan adaptif yang terinterkoneksi secara nirkabel sehingga dapat mewujudkan penghematan energi melalui efisiensi energi pada penggunaan APJ. Metode yang digunakan adalah pengaturan daya pada lampu jalan melalui kontrol *pulse width modulation* (PWM) untuk mengubah pencahayaan lampu jalan. Lampu yang dirancang menggunakan *high pressure* LED dengan pengaturan pencahayaan (*luminance*) sesuai dengan kebutuhan pada malam hari. Untuk *on-off* lampu tepat pada waktunya digunakan *real time clock* dan pemantauan serta pengontrolan dapat diakses melalui *website*. *Long range (LoRa)* digunakan untuk pengiriman data pada setiap lampu jalan. Data-data yang diperlukan dapat diakses dengan mudah melalui *website* sesuai dengan kebutuhan pemeliharaan atau perbaikan pada lampu jalan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang prototipe lampu jalan dengan sistem pengaturan daya yang terinterkoneksi secara nirkabel?
Bagaimana pengaturan daya pada lampu LED dapat meningkatkan efisiensi operasi lampu-lampu jalan?
Bagaimana kinerja sistem interkoneksi nirkabel pada lampu jalan?



4. Bagaimana analisis tekno-ekonomi lampu jalan dengan pengaturan daya yang terinterkoneksi secara nirkabel?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan prototipe lampu jalan dengan pengaturan daya yang terinterkoneksi secara nirkabel.
2. Mengetahui efisiensi lampu jalan dengan pengaturan daya pada lampu LED.
3. Mengetahui kinerja sistem interkoneksi nirkabel pada lampu jalan.
4. Melakukan analisis tekno-ekonomi lampu jalan dengan pengaturan daya yang terinterkoneksi secara nirkabel.

1.4 Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini, diharapkan memberikan manfaat yang signifikan dari berbagai aspek seperti ilmu pengetahuan, ekonomi, sosial dan lingkungan. Penelitian ini dapat membantu mengoptimalkan pengaturan daya lampu LED sehingga menghasilkan penghematan energi yang signifikan dalam operasi pencahayaan jalan. Dengan mengurangi konsumsi energi, dapat mengurangi dampak lingkungan dan membantu mengatasi masalah keberlanjutan energi.

Implementasi teknologi nirkabel untuk mengintegrasikan dan mengontrol lampu jalan secara adaptif dapat memperlihatkan kemajuan teknologi dalam pengelolaan infrastruktur perkotaan. Selain itu, dapat menjadi contoh nyata tentang bagaimana konsep teknologi cerdas (*smart technology*) dapat diterapkan dalam pengelolaan infrastruktur kota untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas hidup masyarakat.

Sehingga, penelitian ini memiliki potensi untuk menghasilkan solusi inovatif yang dapat berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan, serta kualitas hidup warga di lingkungan perkotaan. Selanjutnya, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut

yang berkaitan dengan pengembangan sistem pengaturan energi cerdas dan aplikasi *internet of things* (IoT) dalam lingkungan perkotaan.



1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini, perancangan yang akan dibuat dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Penelitian ini berfokus pengembangan model simulasi dan implementasi pada prototipe untuk menguji serta mengoptimalkan pengaturan daya, tanpa melibatkan implementasi fisik di lapangan.
2. Pengambilan data melalui pengujian dilakukan pada skala laboratorium.
3. Penelitian ini akan membatasi variasi pengaturan daya pada faktor-faktor tertentu seperti intensitas cahaya atau waktu pengoperasian, tanpa mempertimbangkan variabel-variabel lain seperti suhu dan kelembaban.
4. Data-data dianalisis secara analitik dan matematis.

Penelitian dilakukan mulai Januari 2022 sampai Februari 2023. Lokasi penelitian bertempat di ruangan Laboratorium Elektronika dan Divais Departemen Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Penelitian ini merupakan tindak lanjut dari penelitian sebelumnya terkait perkembangan teknologi pada lampu jalan. Pada Tabel 1 memperlihatkan *State-of-the-art* mengenai perkembangan penelitian teknologi lampu jalan dengan fokus penelitian untuk peningkatan efisiensi energi dengan penerapan teknologi pada sistem kontrol dan terkoneksi internet.

Tabel 1 *State of the art*

No	Judul	Metode	Hasil	Referensi
1	<i>An Energy-efficient Street Lighting Approach Based on Traffic Parameters Measured by Wireless Sensing Technology</i>	Menggunakan metode <i>traffic-adaptive street lighting scheme</i> (TaSLC)	Akurasi TaSLC mencapai 95% dan konsumsi energi listrik hanya 10,5%.	(Jiang <i>et al.</i> , 2021)
2	<i>Energy and Economic Analysis of Smart Technologies on Street Lighting System</i>	Menerapkan sistem penerangan cerdas	Konsumsi daya lampu jalan yang lebih rendah sebesar 96-97%.	(Modabbir and Mohammad, 2021)
3	<i>Smart regulation and efficiency energy system for street lighting with LoRa LPWAN</i>	Menggunakan algoritme <i>artificial bee colony (ABC)</i> Menggunakan <i>Long Range Power Wide Area Network</i>	Penghematan energi selama satu tahun mencapai 12.615,635 kWh.	(Sanchez-Sutil and Cano-Ortega, 2021)
4	<i>Efficient Power Generation to Automated Street Lights based on Traffic Density</i>	Menggunakan informasi kepadatan lalu lintas dengan untuk mengatur pencahayaan lampu	Hemat biaya serta menggunakan sumber energi terbarukan.	(Kalaimathi B <i>et al.</i> , 2021)
5	<i>Design and implementation of street light control system based on power line carrier communication</i>	Menggunakan <i>power line carrier communication</i> , kontrol relai dengan algoritme <i>static routing</i>	Sistem kontrol lampu jalan berjalan dengan stabil dan andal serta memiliki nilai aplikasi yang tinggi.	(Thungtung <i>et al.</i> , 2021)
6	<i>Efficiency Calculation of LEDs Used in Street Lighting Lamps by Matlab</i>	Membandingkan beberapa jenis LED dengan lampu konvensional dan pengujian efisiensi serta penghematan dayanya	Lampu LED memiliki konsumsi daya yang lebih rendah, intensitas cahaya dan rendering warna yang lebih baik. Menghemat penggunaan daya hingga 95%	(Nasir, Abdullah and Yaseen, 2019)
	<i>et Lighting rgy-Saving em</i>	Kontrol <i>switching</i> otomatis berdasarkan arus kendaraan	Penurunan penggunaan daya dan biaya, tanpa mengabaikan keselamatan pengguna jalan.	(Al-Smadi <i>et al.</i> , 2019)



8	<i>A web-based control system for traditional street lighting that uses high-pressure sodium lamps</i>	Menggunakan control konvensional dan modul komunikasi NB-IoT untuk lampu <i>High pressure Sodium (HPS)</i>	Sistem yang diusulkan menghemat 36,6% biaya penggunaan energi.	(Xu, Zhan and Li, 2019)
9	<i>The Study of Natural Exposure Testing for LED Lighting System</i>	Menerapkan metode <i>Prognostics and Health Monitoring (PHM)</i> dan metode <i>Physics of Failure (PoF)</i>	Prediksi <i>Remaning Useful Life (RUL)</i> memberikan peringatan dini degradasi dan kerusakan lampu LED.	(Ye et al., 2017)
10	<i>Design of Smart LED Streetlight System for Smart City with Web-Based Management System</i>	Menggunakan sistem <i>Correlated Color Temperature (CCT)</i> dengan menggunakan komunikasi <i>ZigBee</i>	Pengaturan cahaya lampu dapat menyesuaikan keadaan lingkungan. Serta pengiriman data secara <i>real-time</i> dengan <i>ZigBee</i> yang baik.	(Daely et al., 2017)

Penelitian penyalaan lampu jalan berdasarkan arus lalu lintas dilakukan oleh Al-Smadi dkk., untuk penghematan energi. Sistem cerdas dirancang untuk mengobservasi pergerakan pengendara di jalanan dan menyalakan lampu jalan yang berada di lokasi pengendara (Al-Smadi *et al.*, 2019). Metode pembagian waktu penyalaan lampu jalan dan deteksi pergerakan pejalan kaki ataupun kendaraan menggunakan sensor PIR menunjukkan penurunan konsumsi energi sekitar 96-97% dibandingkan sistem penerangan konvensional (Modabbir and Mohammad, 2021).

Teknologi cerdas lampu jalan (*smart streetlight*) juga telah banyak diteliti dan dikembangkan. Xiaoqiang Xu dkk., memungkinkan pengontrolan dan *monitoring* secara *real-time* pada lampu jalan menggunakan *Power Line Carrier Communication (PLCC)* (Xu et al., 2019). Selanjutnya, desain pengontrolan untuk lampu jalan tradisional diusulkan oleh Anurak Thungtong dkk. Metode yang digunakan adalah yaitu pengaturan penyalaan lampu jalan (*on-off*) pada waktu tertentu berdasarkan banyaknya kendaraan yang melintas di daerah tersebut serta menggunakan komunikasi NB-IoT untuk pengiriman data ke *server*. Penelitian ini berhasil menghemat 36.6 % penggunaan energi (Thungtong et al., 2021).

Penelitian di atas menunjukkan perkembangan teknologi sistem cerdas lampu jalan dengan berbagai metode. Penggunaan sensor yang saling diintegrasikan dan disesuaikan dengan kondisi lingkungan. Namun pada dasarnya lampu jalan berfungsi untuk memberikan pencahayaan yang memadai untuk pengguna jalan.



Untuk suplai listrik beberapa kasus khususnya daerah berkembang, PLTS sangat riskan terjadinya pencurian komponen seperti baterai, ya dll. Suplai listrik dari *grid* menjadi pertimbangan karena tarif listrik

yang harus dibayar. Untuk melakukan penghematan, dilakukan berbagai upaya seperti penggunaan lampu hemat energi serta pengaturan pencahayaan untuk mengurangi konsumsi listrik lampu jalan.

Pada penelitian ini, fokus utama yang dilakukan yaitu menyesuaikan cahaya sesuai kebutuhan pengguna jalan menggunakan parameter cahaya dari kendaraan. Hal ini memungkinkan penggunaan sensor yang minim namun tujuan pencahayaan yang memadai tetap terpenuhi. Penelitian yang penulis usulkan yaitu membuat prototipe lampu jalan dengan pengaturan daya lampu LED yang saling terinterkoneksi sehingga memudahkan pengontrolan dan *monitoring* melalui *website*. Lampu jalan didesain menggunakan lampu *high pressure* LED yang disusun secara seri-paralel serta sistem yang dapat menyesuaikan pencahayaan dengan pengaturan daya pada lampu berdasarkan nilai PWM. Sistem yang diusulkan diharapkan mampu meningkatkan efisiensi energi pada lampu jalan.

2.2 Alat Penerangan Jalan

Alat Penerangan Jalan adalah lampu penerangan jalan yang berfungsi untuk memberi penerangan pada ruang lalu lintas. Komponen utama alat penerangan jalan, meliputi bangunan konstruksi, catu daya, luminer, peralatan kontrol, dan peralatan proteksi. Alat penerangan jalan terbagi tiga berdasarkan jenisnya yaitu lampu, catu daya, dan kuat pencahayaan.

Tabel 2 Jenis-jenis alat penerangan jalan

Jenis Lampu	Catu Daya	Kuat Pencahayaan
<i>Light emitting diode (LED)</i>	Listrik mandiri dengan pemanfaatan energi sinar matahari atau pemanfaatan sumber energi lain yang dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan mengutamakan sumber energi terbarukan	Alat penerangan jalan dengan pencahayaan tetap yaitu kuat pencahayaannya stabil sepanjang aktif menyala
Lampu gas bertekanan tinggi atau <i>high-pressure discharge lamp</i>	Listrik tersuplai atau konvensional	Alat penerangan jalan dengan pencahayaan adaptif yaitu kuat pencahayaannya dapat disesuaikan dengan kebutuhan pencahayaan pada ruang lalu lintas berdasarkan kondisi atau lokasi tertentu



is bertekanan
ndisi vakum atau
ure discharge

Sistem pada lampu jalan terbagi menjadi dua yaitu otonom dan interkoneksi. Alat penerangan jalan otonom berdiri sendiri dengan pengaturan kuat pencahayaan dan penyediaan kebutuhan arus listrik diatur dan disediakan oleh alat penerangan jalan secara mandiri. Alat penerangan jalan interkoneksi adalah alat penerangan jalan dengan pengaturan kuat pencahayaan dan penyediaan kebutuhan arus listrik terkoordinasi dan terkoneksi dengan alat penerangan jalan yang dipasang pada lokasi lain. Alat penerangan jalan yang interkoneksi memiliki sistem komunikasi yang dapat diatur secara tersentralisasi dengan aplikasi perangkat lunak cerdas atau *smart lighting system* menggunakan koneksi peralatan kontrol nirkabel yang berbasis:

- a. gelombang radio atau *wireless fidelity* (WiFi) yang dilengkapi dengan fasilitas *uplink* dan *downlink* komunikasi sebagai sarana pengiriman dan penerimaan data; atau
- b. gelombang cahaya atau *light fidelity* (LiFi).

Aplikasi perangkat lunak cerdas atau *smart lighting system* paling sedikit dilengkapi dengan kemampuan untuk melakukan kontrol terhadap status alat penerangan jalan, meliputi:

- a. pengaturan kuat pencahayaan;
- b. pencatatan konsumsi daya listrik atau *kilo Watt hour* (kWh) meter;
- c. pemantauan unjuk kerja perangkat elektronik;
- d. melakukan kontrol jarak jauh secara tersentralisasi;
- e. sensor dan pencatatan data kondisi lingkungan; dan
- f. kerusakan atau kegagalan alat penerangan jalan.

Selain itu, perangkat lunak tersebut wajib bersumber dari aplikasi *open source* dan dapat diakses tanpa melalui *software* khusus tertentu sehingga mudah apabila akan diintegrasikan (Kementerian Perhubungan, 2018).

2.3 Besaran Pencahayaan

Untuk memahami teknik pencahayaan, maka perlu penjelasan terhadap ukuran dasar dari teknik pencahayaan. Berikut beberapa hal penting yang diperhatikan dalam teknik pencahayaan (Tambunan *et al.*, 2010; Putranto, eto and Pradana, 2021).



2.3.1. Intensitas Cahaya

Simbol: i

Satuan dasar: candela

Intensitas cahaya adalah kuat cahaya sumber cahaya dan diukur dengan candela. Pada sistem internasional (sistem di negara Amerika disebut candlepower). Intensitas cahaya fluks cahaya per-satuan sudut ruang yang dipancarkan ke suatu arah tertentu. Bentuk persamaan intensitas cahaya dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$i = \frac{\Phi}{\omega} \quad (1)$$

Keterangan:

i = Intensitas cahaya (cd)

Φ = Fluks cahaya (lm)

ω = Sudut ruangan (Steradian)

2.3.2. Fluks Cahaya (*Luminous Flux*)

Simbol: F atau Φ

Satuan dasar: lumen

Ukuran yang paling mendasar dari radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh sumber adalah pancaran fluksnya. Laju aliran energi yang dipancarkan ini diukur dalam watt. Kuantitas yang paling mendasar yang digunakan untuk mengukur cahaya adalah fluks cahaya. Menurut Romadhon, fluks cahaya yang dipancarkan oleh sumber cahaya ialah seluruh cahaya yang dipancarkan dalam setiap detik. Lumen (lm) merupakan besaran fluks cahaya.

$$\Phi = \frac{Q}{t} \quad (2)$$

Keterangan:

Φ = Fluks cahaya (lm)

Q : Energi cahaya (lm/dt)

Waktu (s)



2.3.3. Iluminasi

Simbol: E

Satuan dasar: Lux atau Lx atau Lumen/m²

Untuk satuan dalam British standar/Amerika

$E = \text{Ft.cd}$ (*foot candle*)

Iluminasi atau kuat pencahayaan adalah fluks cahaya yang jatuh pada suatu bidang permukaan. Satuan intensitas pencahayaan ini adalah lumen/m² atau lux. Sehingga nilai 1 lux sama dengan 1 lumen per meter persegi. Intensitas pencahayaan atau iluminasi ini disimbolkan dengan huruf E. Untuk menghitung nilai iluminasi rata-rata pada suatu ruangan dapat menggunakan persamaan berikut.

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

Keterangan:

E = Iluminasi atau Intensitas Pencahayaan (lux atau Lumen/meter²)

Φ = Fluks cahaya (lm)

A = Luas Permukaan Kerja (m²)

2.3.4. Luminansi

Simbol: L atau B

Satuan dasar: Candela/m²

Luminansi disebut juga kecemerlangan cahaya (*brightness*). Luminansi adalah ukuran untuk terang suatu permukaan benda. Luminansi yang terlalu terang atau berlebihan menyebabkan silau pada mata, misalnya sebuah lampu pijar tanpa armatur. Luminansi dilambangkan dengan huruf L, dengan satuannya candela per cm² atau besar intensitas cahaya dibagi dengan luas semua permukaannya. Persamaan luminansi dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$L = \frac{i}{A_s} \quad (4)$$

Keterangan:

L = Luminansi (candela/cm²)

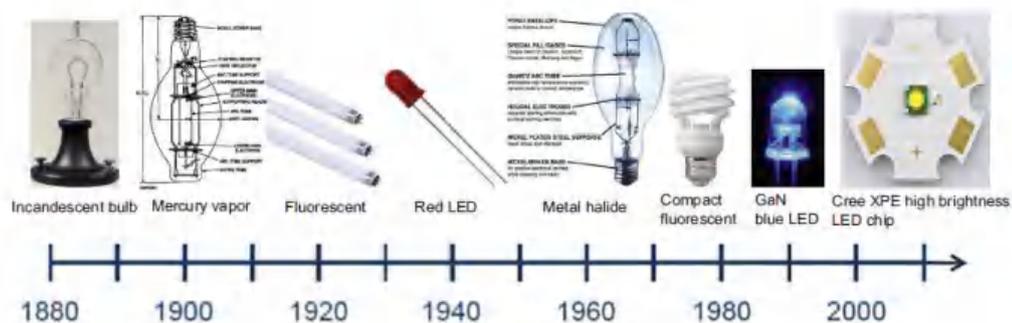
i = Intensitas cahaya (candela)

A_s = Luas Permukaan Kerja (m²)



2.4 Jenis-jenis Lampu

Pencahayaan telah berevolusi melalui banyak inkarnasi selama sekitar 100 tahun terakhir. Sebagian besar inkarnasi tersebut melibatkan pemanasan filamen dari beberapa jenis (tungsten, keramik) atau pembakaran gas (lampu neon dan lampu halida logam). Namun selama beberapa tahun terakhir, sebuah teknologi baru yang menggunakan fisika yang sama sekali berbeda telah muncul sebagai pemenang dalam kategori pencahayaan berkualitas tinggi dan hemat energi. Teknologi baru ini adalah *Solid State Lighting* (SSL) dan mengandalkan emisi cahaya dari semikonduktor atau *Light Emitting Diode* (LED). Perkembangan pencahayaan ditunjukkan pada gambar di bawah ini (El-Zein, 2013).



Gambar 1 Perkembangan teknologi pencahayaan selama lebih dari 130 tahun terakhir (El-Zein, 2013)

Berbagai jenis lampu di atas memiliki efisiensi dalam kisaran 5-10 lm/W hingga lebih dari 150 lm/W. Kisaran efikasi yang umum adalah sebagai berikut, tetapi beberapa produk mungkin memiliki nilai lebih tinggi atau lebih rendah (satuan lm/W) (Smith and Parmenter, 2016):

- Lampu pijar/ *incandescent*, 5-20.
- Lampu uap merkuri/ *mercury vapor*, 20-50.
- Lampu flouresen:
 - Compact fluorescent*, 55-70.
 - Conventional fluorescent*, 30-70.
 - High efficiency fluorescent*, 85-100.
- Lampu LED, 60-100.
 - metal halide*, 45-95.
 - igh pressure sodium*, 45-110.
 - ow pressure sodium*, 100-150.



Berikut ini merupakan penjelasan mengenai beberapa jenis lampu yang digunakan sebelum teknologi LED semakin berkembang dan memberikan banyak keuntungan pada penggunaannya (Tambunan *et al.*, 2010; El-Zein, 2013; Smith and Parmenter, 2016; Putranto, Wibawanto and Pradana, 2021).

2.4.1. Lampu Pijar

Lampu listrik paling awal adalah lampu pijar, di mana arus listrik memanaskan filamen karbon dalam ruang hampa dan filamen panas menghasilkan cahaya yang ditingkatkan dengan menggunakan filamen tungsten dalam bola kaca yang dievakuasi yang mengandung sedikit gas lembam. Dalam lampu pijar tipikal, sekitar 5% energi diubah menjadi cahaya dalam spektrum tampak, sedangkan sisanya dipancarkan kembali sebagai energi inframerah dan panas. Bohlam kaca lampu pijar 100 W dapat mencapai suhu 200-250°C selama pengoperasian normal. Selama periode waktu tertentu, filamen lampu secara bertahap menguap, mengurangi diameternya dan karenanya meningkatkan daya tahannya. Hal ini juga mengurangi keluaran cahaya menjadi sekitar 80% dari lumen pengenal pada akhir masa pemakaian.

2.4.2. Lampu Fluoresen

Lampu ini tidak sama bekerjanya seperti lampu pijar. Lampu ini bekerja berdasarkan pelepasan elektron secara menerus di dalam uap yang diionisasi. Kadang dikombinasikan dengan fosfor yang dapat berpendar. Pada umumnya lampu ini tidak dapat bekerja tanpa *ballast* sebagai pembatas arus pada sirkuit lampu. Lampu tabung fluoresen disebut juga lampu *Tube Lamp* (TL) adalah lampu luah tekanan rendah, gas yang dipakai adalah merkuri. oleh bubuk fluoresen pada dinding bola lampu yang diaktifkan oleh energi ultraviolet dari pelepasan energi elektron. Umumnya lampu ini berbentuk panjang yang mempunyai elektroda pada kedua ujungnya, berisi uap merkuri dengan gas inert untuk penyalanya. Lampu ini mempunyai diameter antara 5 mm, 26 mm, dan 38 mm, mempunyai bermacam-macam warna. Lampu fluoresen mempunyai dua sistem penyalan yaitu memakai *starter* dan tanpa *starter*. Lampu fluoresen tanpa *starter* antara lain TL-RS, TL-X, dan TLM.



2.4.3. Lampu Uap Merkuri/ *Mercury Vapor*

Lampu pelepasan intensitas tinggi *high intensity discharge* (HID) meliputi uap merkuri, halida logam, dan lampu natrium. Cahaya dihasilkan oleh aliran arus listrik melalui uap logam. Dalam lampu uap merkuri, biasanya ada dua elektroda utama dan satu elektroda *starter*. Ketika tegangan diterapkan ke elektroda *starter*, gas argon terionisasi, dan busur terbentuk. Busur ini menguapkan merkuri dan akhirnya terjadi busur melalui merkuri. Setelah busur dipadamkan, busur tidak dapat dinyalakan kembali sampai tekanan uap diturunkan ke titik yang sesuai untuk tegangan yang diberikan. Ini biasanya memakan waktu 3 hingga 8 menit. Dalam pemberat uap merkuri, induktor memberikan "*inductive kick*" untuk membantu memulai pelepasan dan juga membatasi arus melalui lampu. Kapasitor digunakan untuk mengoreksi faktor daya induktor.

2.4.4. Lampu *Metal Halide*

Lampu halida logam mirip dengan lampu uap merkuri kecuali mengandung berbagai halida logam. Ketika lampu mencapai suhu operasi, halida logam terurai menjadi logam plus halogen. Ini memiliki beberapa keuntungan. Pertama, efisiensi lampu halida logam adalah 1,5-2,0 kali lebih besar dari lampu uap merkuri. Juga, logam memungkinkan "cahaya putih" diproduksi dengan rendisi warna yang lebih baik. Meskipun detail konstruksi dan *ballast* yang digunakan untuk lampu metal halide berbeda dengan lampu uap merkuri, konsep dasarnya sama.

2.4.5. Lampu Sodium (Natrium)

Lampu natrium beroperasi berdasarkan prinsip arus listrik yang mengalir melalui uap natrium. Dalam lampu natrium bertekanan tinggi, energi dipancarkan melalui pita panjang gelombang. Pada lampu bertekanan rendah, cahayanya hampir monokromatik, terdiri dari dua garis pada 589 dan 589,5 nm. Efikasi yang tinggi dari lampu natrium bertekanan rendah telah menyebabkan penggunaannya secara luas untuk penerangan jalan dan area. Lampu natrium membutuhkan pemberat khusus, yang mampu memberikan tegangan tinggi untuk menyalakan busur.



2.4.6. Lampu LED (*Light Emitting Diode*)

Light Emitting Diode menyerupai dioda konvensional, yang dirancang untuk memungkinkan arus mengalir dalam satu arah dan bukan dalam arah yang berlawanan. Dalam dioda, elektron bebas digerakkan melintasi antarmuka dioda (dari sisi negatif ke sisi positif persimpangan) oleh beda potensial. Ketika sebuah elektron mengisi kekosongan (disebut "*hole*") di sisi positif, ia turun ke keadaan energi yang lebih rendah dengan memancarkan foton. Dioda konvensional, perubahan energinya kecil dan tidak ada cahaya tampak yang dihasilkan. Dalam LED, penurunan energi lebih besar dan foton energi yang lebih tinggi dipancarkan. Dengan memilih bahan yang digunakan, foton frekuensi yang berbeda (dan dengan demikian warna cahaya yang berbeda) dapat diproduksi.

Keunggulan pertama adalah LED memiliki *output* cahaya yang lebih tinggi dalam lumen dibandingkan dengan lampu pijar atau lampu neon kompak dan mereka mulai menyaingi kemandirian teknologi pencahayaan HID. Proyeksi menunjukkan mereka akan segera melampaui semua teknologi pencahayaan dalam hal efisiensi. Misalnya, bergantung pada keluaran cahaya, LED akan menghasilkan jumlah cahaya yang sama dengan lampu pijar, tetapi hanya menggunakan 1/5 hingga 1/10 jumlah daya yang dibutuhkan oleh lampu pijar. Fluoresen, untuk *output* cahaya tertentu, menggunakan 1,5 hingga 3 kali jumlah daya sebagai LED. Keuntungan lainnya adalah LED sangat tahan lama, memancarkan sedikit panas, dapat *on-off* berulang kali tanpa efek, dan *lifespan* sekitar 25.000-50.000 jam. Selain membutuhkan lebih sedikit daya, lampu LED memiliki masa pakai lebih lama dan lebih jarang membutuhkan perawatan dan penggantian.

2.5 Manajemen Energi Listrik untuk Pencahayaan

Berikut empat prinsip umum untuk manajemen energi listrik pada sistem pencahayaan (Smith and Parmenter, 2016).



5.1. Mengoptimalkan Kapasitas

Prinsip umum pertama adalah mengoptimalkan kapasitas. kelebihan kapasitas, yang dapat berupa pencahayaan yang berlebihan atau

perlengkapan pencahayaan yang tidak efisien, dapat menyebabkan penggunaan listrik yang berlebihan dan beban penyejuk udara yang lebih besar, karena pembuangan panas dari sistem pencahayaan. Dalam beberapa dekade terakhir, langkah besar telah dibuat dalam meningkatkan efisiensi sumber cahaya. Saat ini, perancang sistem iluminasi memiliki beragam jenis lampu untuk dipertimbangkan dalam proyek desain pencahayaan.

2.5.2. Mengoptimalkan Kontrol

Salah satu alasan pesatnya pertumbuhan penggunaan listrik adalah kenyamanan dan kemudahan kontrol. Oleh karena itu, kontrol optimal dipertimbangkan sebagai area kedua untuk dieksplorasi dalam program manajemen energi beban listrik. Pengatur waktu, sensor hunian, fotosel, atau sakelar untuk menyalakan lampu hanya saat dan di mana diperlukan adalah contohnya.

2.5.3. Menggunakan Konsep Pasif

Prinsip umum ketiga adalah menghilangkan penerangan listrik yang tidak perlu dan memanfaatkan pencahayaan alami; strategi ini sangat efektif dalam kombinasi dengan kontrol pencahayaan alami (fotosel). Pendekatan pasif lainnya termasuk menggunakan cat berwarna terang pada dinding dan langit-langit untuk meningkatkan pantulan cahaya.

2.5.4. Tingkat Operasi dan Pemeliharaan

Prinsip umum keempat adalah peningkatan operasi dan pemeliharaan. Selain kontrol yang lebih baik, cara lain untuk meningkatkan efisiensi pengoperasian penerangan adalah dengan meningkatkan kesadaran akan pentingnya efisiensi energi. Dalam hal pemeliharaan, menjaga perlengkapan lampu tetap bersih sangat penting untuk menjaga tingkat pencahayaan.

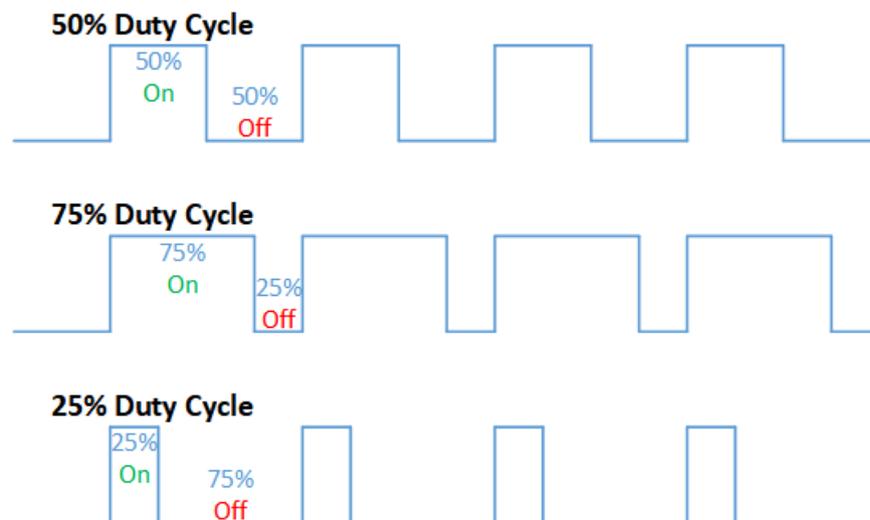
2.6 *Pulse Width Modulation (PWM)*



Pulse Width Modulation atau Modulasi Lebar Pulsa adalah teknik modulasi dilakukan dengan memvariasikan lebar pulsa pada nilai frekuensi dan amplitudo yang tetap untuk mendapatkan nilai tegangan rata-rata yang berbeda. Teknik ini digunakan untuk menghasilkan tegangan *output* yang bervariasi dari 0 volt

hingga tegangan maksimum dengan kenaikan tegangan yang linier, menambah atau mengurangi lebar pulsa. *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk mengendalikan daya (*power*) biasanya mengatur berapa besar tegangan yang akan digunakan dengan mengirim isyarat atau pulsa dalam bentuk sinyal. PWM pada biasanya digunakan untuk mengendalikan *duty cycle* pada sinyal yang akan digunakan (Suhendra *et al.*, 2018).

Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi antara 0% hingga 100%. Satu siklus pulsa merupakan kondisi *high* kemudian berada di zona transisi ke kondisi *low*. *Duty cycle* merupakan representasi dari kondisi logika *high* dalam suatu periode sinyal dan dinyatakan dalam bentuk (%) dengan *range* 0% sampai 100%, sebagai contoh jika sinyal berada dalam kondisi *high* terus menerus artinya memiliki *duty cycle* sebesar 100%. Jika waktu sinyal keadaan *high* sama dengan keadaan *low* maka sinyal mempunyai *duty cycle* sebesar 50%. Perubahan *duty cycle* akan merubah tegangan keluaran atau tegangan rata-rata dari PWM (Syed *et al.*, 2004; Badarov and Manoev, 2017).



Gambar 2 Pulsa PWM berdasarkan *duty cycle* (Gadgetronicx Team, 2021)



Rumus untuk menghitung siklus kerja atau *duty cycle* dapat ditunjukkan seperti persamaan di bawah ini (Setiawan, 2017).

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{(t_{on}+t_{off})} \quad (5)$$

Atau

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{t_{total}} \quad (6)$$

Dimana:

t_{on} = waktu *on* atau waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi tinggi (*high* atau 1)

t_{off} = waktu *off* atau waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi rendah (*low* atau 0)

t_{total} = waktu satu siklus atau penjumlahan antara t_{on} dengan t_{off} atau disebut juga dengan “periode satu gelombang”.

1. Fungsi dan Aplikasi PWM

Ketika periode *on* dan *off* saklar digeser relatif satu sama lain, jumlah listrik yang dialirkan ke beban meningkat. Seperti yang diharapkan, jenis kontrol ini menawarkan banyak keuntungan. PWM dipasangkan dengan pelacakan titik daya maksimum, atau MPPT, adalah salah satu cara utama untuk mengurangi keluaran panel surya agar baterai lebih mudah menggunakannya.

PWM, di sisi lain, sangat ideal untuk memberi daya pada peralatan inersia, seperti motor, karena peralihan unik ini tidak terlalu berpengaruh pada peralatan tersebut. Karena hubungan linier antara fungsi LED dan tegangan input, ini juga berlaku untuk LED. Selain itu, frekuensi *switching* PWM tidak boleh berpengaruh pada beban, dan bentuk gelombang yang dihasilkan harus cukup halus agar beban dapat dikenali. Bergantung pada perangkat dan fungsinya, frekuensi peralihan catu daya biasanya akan sangat bervariasi. Rentang listrik, catu daya komputer, dan *amplifier audio* semuanya memerlukan kecepatan peralihan dalam kisaran puluhan atau ratusan kilohertz.

Keuntungan utama lain dari mengadopsi PWM adalah kehilangan daya sangat rendah dalam perangkat *switching*. Ketika saklar *off*, tidak ada arus



yang mengalir melaluinya. Selain itu, ketika saklar *on* dan mengirimkan listrik ke bebannya, ada penurunan tegangan yang dapat diabaikan.

2. Mengubah Siklus Kecerahan dengan PWM

Saat suplai *on-off* dengan sangat cepat menggunakan *output* modulasi lebar pulsa, LED tidak berkedip. *Duty cycle* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan pengukuran kecerahan PWM. Siklus tugas adalah proporsi *runtime* sirkuit yang aktif. Siklus tugas dinyatakan sebagai persentase, dengan 100 persen mewakili kondisi layak paling terang dan persentase yang lebih rendah menghasilkan *output* lampu LED yang redup.

Sinyal PWM memiliki siklus tugas 50% jika menyala 50% dari waktu dan mati 50% dari waktu. Sinyal muncul sebagai gelombang persegi, dan kecerahan lampu harus rata-rata. Ketika persentasenya lebih besar dari 50%, sinyal menghabiskan lebih banyak waktu dalam keadaan *on* daripada dalam keadaan *off*, dan sebaliknya ketika *duty cycle* kurang dari 50%.

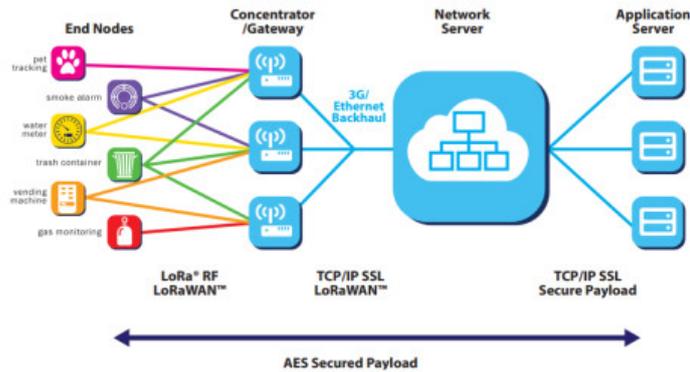
2.7 Long-Range (LoRa)

LoRa adalah protokol jaringan *point-to-multipoint* dan menggunakan hukum Semtech untuk modulasi LoRa, tidak hanya komunikasi gelombang radio dengan *gateway* tetapi juga melibatkan enkripsi data atau teks (Song *et al.*, 2017). LoRa menggunakan metode transmisi sinyal radio berdasarkan teknik modulasi *spread spectrum* yang berasal dari teknologi *Chirp Spread Spectrum* (CSS). CSS adalah teknik *spread spectrum* yang menggunakan pulsa *chirp* termodulasi frekuensi linier pita lebar untuk mengkodekan informasi. Kemudahan penggunaan modul LoRa menangani konversi frekuensi radio ke bit tanpa menghitung kode untuk mengimplementasikan sistem radio. LoRa juga dapat digunakan dalam proses komputasi awan (Niles *et al.*, 2021). Seperti yang dikatakan sebelumnya tidak hanya menggunakan teknologi radio frekuensi tetapi juga untuk aplikasi IoT untuk jarak jauh dan mengamankan data selama transmisi. LoRa dapat dihubungkan ke banyak perangkat seperti *gateway*, dan sensor untuk memantau lingkungan, hewan,

usia secara nirkabel saat mengirim data ke *cloud* (Song *et al.*, 2017; Niles 21).

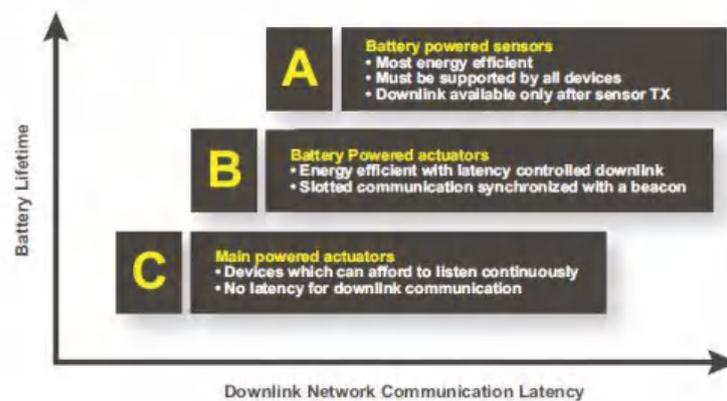


LoRaWAN adalah protokol jaringan *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) yang dirancang untuk menghubungkan 'sesuatu' yang dioperasikan dengan baterai secara nirkabel ke internet di jaringan regional, nasional, atau global, dan menargetkan persyaratan utama *internet of things* (IoT) seperti komunikasi *bi-directional*, keamanan *end-to-end*, mobilitas dan *localization services* (LoRa Alliance®, 2015).



Gambar 3 Arsitektur LoRaWAN (LoRa Alliance®, 2015)

LoRaWAN merupakan teknologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) yang dibangun di atas modulasi LoRa. Teknologi ini memungkinkan sejumlah besar perangkat untuk berkomunikasi secara nirkabel jarak jauh (dalam urutan 5-15 km, tergantung pada lingkungan propagasi) pada tingkat data yang rendah. Skenario di mana teknologi ini dapat digunakan adalah jaringan IoT, di mana perangkat perlu berkomunikasi dan hanya membutuhkan jarak pendek untuk mengirimkan beberapa informasi yang berasal dari sebuah sensor (Adelantado *et al.*, 2017).

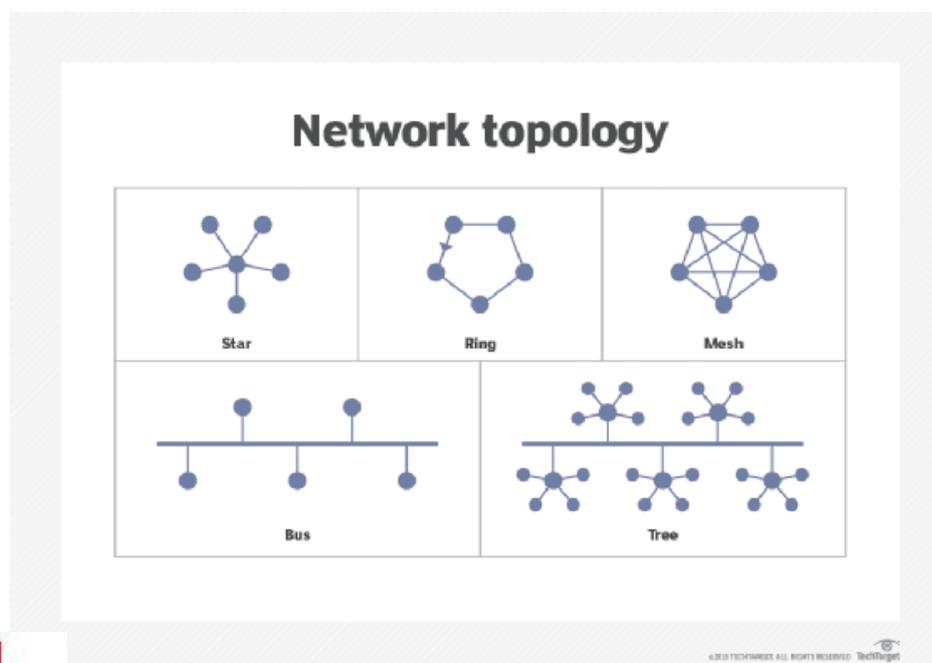


Gambar 4 Kapasitas jaringan LoRaWAN™ (LoRa Alliance®, 2015)



2.8 Topologi Jaringan

Dua atau lebih perangkat komputasi dengan berbagai jenis *host* (juga disebut *node*) seperti *server*, desktop, laptop, telepon seluler dapat saling terhubung untuk berbagi data dan sumber daya satu sama lain dengan menggunakan jaringan komputer dengan menggunakan kabel atau pun nirkabel (tanpa kabel). Jaringan komputer memiliki ukuran yang bervariasi mulai dari ukuran kecil hingga besar. Hal ini bergantung pada jumlah komputer yang terhubung. Setiap jaringan terdiri dari *node* yang berbeda dan *node-node* tersebut terhubung satu sama lain dengan susunan jalur penghubungnya atau *link* dengan cara yang berbeda menghasilkan berbagai jenis topologi jaringan. Jenis topologi jaringan ini dapat didefinisikan secara topologi fisik maupun logis (sinyal). Fungsi topologi jaringan komputer adalah untuk mengetahui bagaimana perangkat komputasi dalam jaringan komputer dapat terhubung (*connect*) serta saling berkomunikasi satu sama lain. Topologi digunakan untuk menggambarkan koneksi antara komputer (atau *host*) dalam jaringan, antara *router* dalam jaringan, atau bahkan antara koneksi jaringan area luas. Materi topologi jaringan komputer yang akan dibahas antara lain merancang topologi fisik dan merancang topologi logis. (Lelisa Army *et al.*, 2022).



Gambar 5 Jenis-jenis topologi jaringan (Gillis, 2021)



2.8.1. Topologi Bus

Topologi *bus* merupakan salah satu jenis topologi yang paling awal dicetuskan. Topologi *bus*, jenis topologi jaringan di mana *node* (perangkat di jaringan, seperti komputer, *printer*, atau *server*) terhubung satu sama lain dengan menggunakan kabel dalam garis lurus. Kabel akan mentransmisikan data dari satu ujung ke ujung lainnya dalam satu arah, tidak dua arah dalam topologi *bus*.

Seperti Gambar 5 di atas, setiap kabel dari ujung ke ujung atau *backbone cable*, harus memiliki konektor khusus yang disebut *terminator* untuk mencegah sinyal yang mencapai ujung kabel dipantulkan atau disebarkan kembali ke arah yang berlawanan. *Terminator* menghentikan sinyal dan mencegah adanya tabrakan antar sinyal. *Terminator* memiliki fungsi sebagai penyerap sinyal serta pencegah sinyal agar tidak terpantul kembali. Jika sinyal tersebut terpantul kembali hal ini akan menimbulkan latar belakang sinyal dan akan mengganggu jaringan.

Data dapat dikirim dari komputer yang satu ke komputer yang lain berdasarkan alamat *Hardware* yang ada pada setiap *Ethernet Card*, yaitu *MAC Address* atau *Physical Address*. Ketika satu komputer mengirim sinyal menggunakan kabel, semua komputer di jaringan menerima informasi, tetapi hanya satu (penerima) yang menerimanya. Sisanya mengabaikan pesan.

2.8.2. Topologi Star

Meskipun mungkin tidak dikenali karena implementasinya, topologi *star* adalah topologi yang paling umum digunakan dalam jaringan saat ini. Semua perangkat terhubung ke perangkat pusat dan berkomunikasi melalui perangkat pusat. Perangkat ini dapat berupa *hub/server/host*. Setiap komputer di jaringan *star* berkomunikasi dengan pusat. *hub* yang mengirim ulang pesan komputer yang sesuai. *Hub* bisa aktif atau pasif. *Hub* aktif meregenerasi sinyal listrik dan mengirimkannya ke semua komputer yang terhubung dengannya.



2.8.3. Topologi Ring

Sesuai dengan namanya topologi *ring* akan berbentuk seperti *ring* (cincin). Perangkat komputer akan terhubung satu sama lain seperti dalam topologi *bus*, namun kabel melingkar dan membentuk lingkaran tertutup. Setiap komputer atau perangkat terhubung secara langsung satu dengan yang lainnya dalam satu jaringan. Pada penerapannya menggunakan jenis kabel UTP ataupun *Patch Cable* dan setiap titik dihubungkan secara seri pada kabel dengan membentuk jaringan yang menyerupai lingkaran.

Ketika komputer mentransmisikan pada jaringan cincin, transmisi biasanya dikirim hanya dalam satu arah dari tempat komputer diposisikan di *bus*. Transmisi menempatkan komputer tujuan dengan alamat IP atau MAC. Setiap perangkat pada *ring* memeriksa sinyal, tetapi semua kecuali komputer yang menjadi tujuan paket akan mengabaikannya. Karakteristik topologi *ring* ini dapat dilihat dimana *token* akan melewati titik-titik atau *node* kemudian memeriksa apakah informasi dari sumber digunakan pada titik yang akan dilewati, maka jika iya *token* akan memberikan data dari sumber tersebut dan kembali berjalan

2.8.4. Topologi Mesh

Dalam topologi *mesh*, setiap komputer memiliki koneksi individual ke setiap komputer lain, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Topologi ini sulit dan mahal untuk diimplementasikan tetapi menawarkan toleransi kesalahan paling besar dari semua desain yang dibahas sejauh ini. Topologi *mesh* mengharuskan setiap komputer memiliki perangkat keras untuk mendukung beberapa koneksi jaringan. Dalam contoh di Gambar 5, berarti empat kartu jaringan untuk setiap komputer. Topologi ini membutuhkan kabel untuk berjalan di antara setiap komputer juga. Keuntungan yang diberikan ini adalah jika ada koneksi yang gagal, hanya dua komputer yang menggunakan koneksi tersebut yang terpengaruh dan mereka masih dapat menggunakan salah satu jalur lain untuk berkomunikasi.



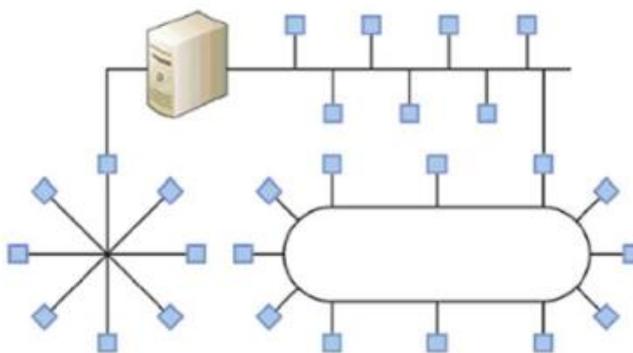
2.8.5. Topologi *Tree*

Salah satu topologi yang menggabungkan beberapa topologi yaitu topologi *tree*. Topologi *tree* atau topologi jaringan bertingkat merupakan gabungan dari topologi *bus* dan topologi *star* dengan berpusat pada sebuah *switch*. Topologi *tree* sangat baik digunakan ketika kita akan membangun jaringan komputer dalam skala besar. Pada topologi *tree* bentuknya juga memiliki suatu tingkatan yang bercabang, misalkan dari komputer *server* ke komputer *client* lalu dihubungkan lagi ke *switch* dan dihubungkan ke komputer *client* lagi, pada topologi ini dimana jaringan yang lebih tinggi dapat mempengaruhi dan mengontrol jaringan yang lain dan topologi *tree* juga cocok untuk komputer dengan skala yang besar.

Terdapat beberapa karakteristik topologi *tree* diantaranya topologi *tree* mempunyai tingkatan atau hierarki dalam jaringan dan terdapat *backbone* yang berfungsi sebagai suatu simpul utama yang menyambungkan jaringan. Topologi *tree* memiliki *hub* sebagai pusat pengendali data di dalam suatu jaringan.

2.8.6. Topologi *Hybrid*

Sebuah topologi *hybrid* adalah satu di mana dua atau lebih dari topologi tersebut digunakan dalam kombinasi. Salah satu kombinasi ini ditunjukkan pada Gambar 6. Dalam contoh ini, tulang punggung jaringan *bus* terhubung ke jaringan *ring copy* dan jaringan bintang. Biasanya topologi yang berbeda terhubung ke komputer pusat yang menjadi tuan rumah koneksi topologi satu sama lain.



Gambar 6 Topologi *hybrid* (Lelisa Army et al., 2022)

