

Rancang Bangun Sistem Lampu Jalan Pintar Nirkabel Berbasis Teknologi Zigbee

Harry Sudibyo S¹, Amelinda Arum W¹, Gde Dharma Nugraha¹ dan Gunawan Wibisono¹

Abstract: This paper describes the designed of a wireless smart street lighting system based on ZigBee (Smart Wireless Street Lighting, SWSL) which uses solar power source and the power grid state electricity company as a backup power. SWSL used embedded system controller with a light and motion sensor to activate the lights based on the surrounding environment. SWSL operates automatically so that it requires monitoring system in order to know the conditions and failure based on data current and voltage sensors. To facilitate supervisors, there are remote control features and energy consumption calculation. ZigBee is an IEEE 802.15.4 wireless protocol technology that is open at the frequency of 2.4 GHz. Its application allows process monitoring and control, so it can be combined with sensors and controllers. The test results showed that ZigBee can be integrated with SWSL and monitoring applications so the data can be transmitted as far as 60 m with the percentage of packets sent intact by 21.4% in the LOS environment on the RSSI of -89 dBm. The maximum size for a single data packet transmission is 150 characters or 9.6 kilo bytes. In NLOS conditions delivery are only up to a maximum distance of 10 meters with a maximum at -89 dBm RSSI. The capacity of the battery has a durability of up to 3 days and errors in the system parameters can be detected by automatic email deliveries and by changes in indicators on the application.

Keywords: Smart street-lighting, microcontroller, motion detector, light sensor, solar power

Abstrak: Pada penelitian ini dirancang sistem lampu jalan pintar nirkabel berbasis ZigBee (Smart Wireless Street Lighting, SWSL) yang menggunakan sumber tenaga surya dan jaringan listrik Perusahaan Listrik Negara sebagai sumber daya cadangan. SWSL menggunakan sistem embedded dengan kontroler yang dilengkapi sensor cahaya dan gerak untuk mengaktifkan lampu sesuai kondisi lingkungan. SWSL beroperasi secara otomatis sehingga memerlukan sistem monitoring agar diketahui kondisi dan kerusakan lampu berdasarkan data sensor arus dan tegangan. Untuk memudahkan pengawas, terdapat fitur pengendalian jarak jauh dan penghitungan konsumsi energi SWSL. ZigBee merupakan protokol teknologi nirkabel IEEE 802.15.4 yang bersifat terbuka pada frekuensi 2.4 GHz. Aplikasinya memungkinkan untuk proses monitoring dan kontrol, sehingga dapat dikombinasikan dengan sensor dan kontroler. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa ZigBee dapat terintegrasi dengan SWSL dan aplikasi monitoring sehingga data dapat dikirimkan sejauh 60 m dengan persentase paket terkirim utuh sebesar 21,4% pada kondisi lingkungan LOS pada RSSI sebesar -89 dBm. Ukuran maksimum paket data untuk sekali transmisi adalah 150 karakter atau 9,6 kilo byte. Pada kondisi NLOS jarak maksimum pengiriman hanya sampai pada 10 meter dengan maksimum RSSI -89 dBm. Kapasitas baterai memiliki daya tahan hingga 3 hari dan kesalahan pada sistem dapat terdeteksi dengan parameter terkirimnya email otomatis dan berubahnya indikator pada aplikasi.

Kata kunci: lampu jalan pintar, PJU, mikrokontroler, sensor gerak, sensor cahaya, tenaga surya

PENDAHULUAN

Penerangan jalan hemat energi merupakan salah satu cara suatu institusi untuk bertindak sebagai pionir terkait dengan aksi yang ramah terhadap lingkungan. Implementasi penerangan jalan hemat energi memiliki tujuan untuk mengurangi konsumsi energi dan dengan demikian berkontribusi kepada tujuan mitigasi bencana akibat perubahan iklim [1]. Untuk tingkat kota, pembiayaan listrik dari lampu-lampu jalan berkisar antara 5% hingga 60% dari pengeluaran kota, tergantung pada beberapa variabel, seperti ukuran kota jenis pelayanan perkotaan, serta seberapa efisien lampu-lampu jalan yang ada. Saat ini, sebagian besar jalan-jalan masih menggunakan lampu penerangan jalan umum (PJU) yang konvensional dan tidak menggunakan teknologi terkini yang sudah tersedia. Pada dini hari, terjadi penurunan beban pada jaringan listrik (Perusahaan Listrik Negara) akibat penurunan aktivitas manusia sehingga menyebabkan lampu jalan menyala lebih terang dari yang seharusnya, sehingga ada kecenderungan penggunaan listrik penerangan jalan umum (PJU) menjadi boros dan menghabiskan biaya.

Penggunaan lampu jalan pintar tenaga surya dengan menggunakan LED (*Light Emitting Diode*) yang hemat energi dapat menjadi solusi yang dapat menyelesaikan permasalahan tagihan listrik yang terus bertambah seiring kenaikan tarif dasar listrik dan kebutuhan pemasangan PJU bagi daerah-daerah yang memiliki tingkat urbanisasi penduduk tinggi. Lampu jalan pintar dengan sistem *embedded* telah dilengkapi dengan *energy meter*, pengatur sistem penerangan (*dimmer system*), dan kontroler untuk menyalakan juga mematikan sistem secara otomatis berdasarkan intensitas cahaya dan aktivitas disekitarnya, sehingga aliran listrik dapat disesuaikan dengan kebutuhan penerangan jalan. Namun, penggunaan kontroler sebagai otomatisasi kerja PJU terkadang menimbulkan kesalahan yang menyebabkan lampu menyala saat siang dan mati saat malam akibat kesalahan kerja kontroler atau kesalahan pembacaan sensor cahaya dan manusia. Hal ini tentunya akan membuang energi yang terpakai, mengganggu aktivitas masyarakat, serta membahayakan kendaraan dan pengguna jalan lainnya yang nantinya berakibat ketidakpuasan masyarakat akan sistem otomatisasi yang diterapkan. Untuk mengantisipasi masalah tersebut, tim perawatan lampu jalan harus terus mengawasi selama 24 jam di semua titik atau jalan pemasangan lampu. Hal ini tentunya akan menambah biaya untuk perawatan dan manajemennya. Oleh karena tidak tercapainya tujuan utama dari penggunaan lampu jalan pintar yang dalam hal ini adalah efisiensi biaya maka, diperlukan sebuah sistem yang dapat mengawasi dan mengendalikan kerja lampu jalan yang terpasang secara terpusat dan dapat dilakukan dari tempat yang berjauhan. [2]

Lecesse [3] telah mengembangkan sebuah sistem kendali jarak jauh untuk lampu penerangan jalan yang telah dilengkapi kontroler dan menggunakan tenaga surya sehingga memiliki efisiensi tinggi. Kontroler tersebut juga memiliki kemampuan untuk mengirimkan informasi kepada pusat pengendalian dengan menggunakan

¹ Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia Jakarta

jaringan ZigBee. ZigBee merupakan protokol teknologi nirkabel yang bersifat terbuka sesuai dengan spesifikasi radio IEEE 802.15.4. Sistem yang diinginkan dengan adanya ZigBee ini adalah agar jaringan bersifat fleksibel dan mudah dalam penginstalasian. Sehingga nantinya fungsi pengawasan dapat memiliki jarak jangkauan yang cukup jauh, mudah dikembangkan, memiliki fungsi kontrol, dan dapat dipantau secara terpusat.

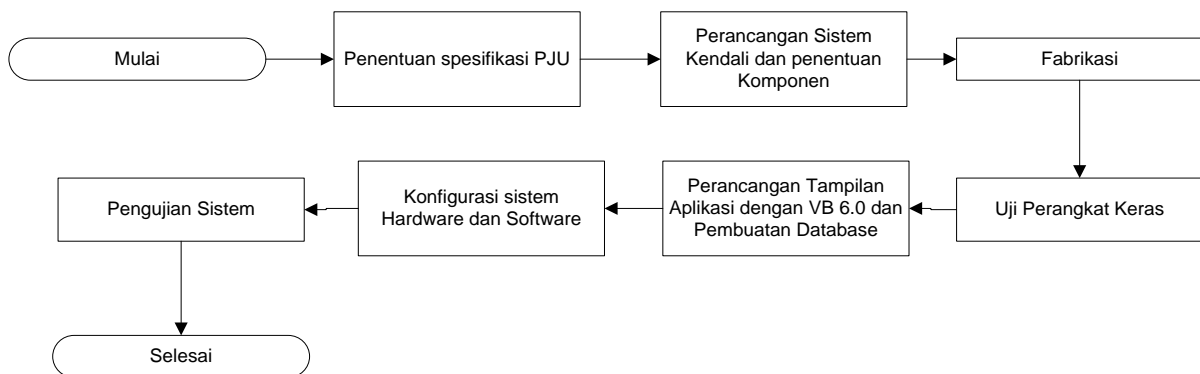
LiLong Chu Xiumin, dkk [4] telah mengembangkan pengendalian lampu jalan yang berbasis Wireless *Network Control*. Menggunakan GPRS, mikroprosesor, dan komputer *server*, sistem yang diajukan mampu mengontrol, memonitoring, dan memiliki fungsi manajemen informasi untuk setiap lampu jalan yang terpasang. Lampu jalan pintar yang Lilong dkk kembangkan memiliki karakteristik pengontrolan pintar yang disesuaikan dengan waktu, tempat, dan kondisi sekitar. Chunguo Jing, dkk. [5] telah mengembangkan pula sistem monitoring dan kontrol untuk lampu jalan pintar yang berbasis *Wireless Sensor Networks*. Sistemnya terdiri dari sensor node, remote terminal unit, dan pusat kontrol. Sensor node terpasang pada setiap lampu dan digunakan sebagai detektor dan pengendalian kerja lampu. Sedangkan *remote* terminal unit berfungsi sebagai perantara antara pusat kontrol dan sensor node. Untuk komunikasi antar-node digunakan gelombang radio sedangkan teknologi GPRS digunakan untuk menghubungkannya dengan pusat kontrol.

Penelitian ini bermaksud menggabungkan pencapaian-pencapaian penelitian sebelumnya dan menambahkannya lagi dengan suatu fitur untuk membuat sistem lampu jalan pintar semakin handal. Sebagai permulaan, penelitian ini membangun sebuah sistem monitoring *point-to point* dengan pusat kontrol yang mampu berintegrasi dengan lampu jalan pintar tenaga surya dengan menggunakan modul ZigBee (komunikasi nirkabel). Frekuensi kerja yang akan dipakai adalah pada kisaran 2,4 GHz. Data dan informasi dari titik lampu berisi data arus listrik, status pengisian baterai dari panel surya, status operasi lampu, serta informasi kesalahan yang didapatkan secara *real time* - disimpan dalam tabel-tabel pada sebuah *database* pada komputer pusat kontrol. Lampu jalan pintar yang digunakan, memiliki fitur yang dapat beradaptasi dengan lingkungan, waktu, dan kondisi sehingga ia bekerja secara otomatis dan efisien. Dikarenakan lampu jalan pintar yang digunakan bersifat *on-grid* (terhubung dengan jaringan Perusahaan Listrik Negara (PLN)), maka sistem monitoring memiliki fungsi untuk mengetahui sumber daya yang digunakan lampu untuk beroperasi dan juga dapat menyesuaikan tegangan operasi dengan fluktuasi tegangan jaringan PLN. Sistem monitoring ini juga dapat digunakan untuk mengaktifkan atau menon-aktifkan lampu secara terpusat dan dapat digunakan untuk memantau penggunaan energi yang telah terpakai oleh lampu berdasarkan data penggunaan arus yang tersimpan pada *database*. Sistem monitoring ini diharapkan dapat mendukung sistem lampu jalan pintar dan dapat menjadikannya lebih handal, efisien, serta mudah dalam perawatan dan manajemennya.

PERANCANGAN

Gambaran umum mengenai sistem ini yaitu lampu jalan akan menyala secara otomatis dengan intensitas cahaya lampu sedikit terang pada malam hari atau keadaan gelap. Apabila di sekitar lampu terdeteksi terdapat gerakan manusia maka lampu akan menyala dengan terang (penuh). Sumber daya utama dari sistem ini memanfaatkan teknologi panel surya dimana sinar matahari diubah ke energi listrik dan kemudian disimpan dalam baterai. Apabila kapasitas baterai yang digunakan untuk menyuplai sistem sudah hampir kosong, maka sistem secara otomatis akan menggunakan sumber daya dari PLN.

Berikut merupakan tahapan penelitian yang dilakukan. Gambar 1. menjelaskan alur perancangan dari sistem PJU pintar dan aplikasi pengawasan (monitoring) dengan Zigbee sebagai modul komunikasi nirkabel antar keduanya.



■ Gambar 1. Diagram alir perancangan sistem monitoring PJU pintar

Alat-alat (baik perangkat keras maupun perangkat lunak) yang digunakan pada penelitian perancangan monitoring penerangan jalan umum (PJU) Pintar dengan komunikasi nirkabel Zigbee adalah sebagai berikut:

1. Arduino UNO, berfungsi sebagai pengendali perangkat keras

2. Solar Panel, berfungsi sebagai pengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek *photovoltaic*.
3. Baterai, berfungsi untuk menyimpan energi listrik dari solar panel
4. BCU (Battery Control Unit), berfungsi sebagai regulator tegangan dan arus yang mengalir dari solar panel ke baterai agar tidak *overvoltage* atau *overcharging*.
5. Listrik PLN, berfungsi sebagai sumber daya cadangan saat tegangan baterai jatuh pada ambang batas yang ditetapkan pada program
6. AC/DC Converter, berfungsi untuk mengubah sumber arus AC ke DC 12 V dikarenakan lampu LED yang dipakai memiliki spesifikasi kerja demikian.
7. Baterai *Deep Cycle*, berfungsi sebagai penyimpan energi listrik. Dipilih jenis *deep cycle* dikarenakan baterai jenis ini lebih stabil pengeluaran dan lebih “*slow*” dalam penyimpanan arus listrik. Baterai jenis ini dapat digunakan arus listriknya sampai habis dan kemudian baru diisi lagi.
8. Relay, penggunaan dua buah relay berfungsi sebagai sakelar pemilih sumber daya dan pengendali hidup-matinya lampu.
9. Sensor PIR (*Passive Infra Red*), berfungsi sebagai detektor adanya kegiatan manusia di sekitar titik pemasangan atau Bergeraknya kendaraan. Sensor ini dipasang 1.5 m dari tanah.
10. Sensor LDR (*Light Dependent Resistor*), berfungsi sebagai detektor cahaya yang digunakan untuk mengamati kecerahan pada lingkungan titik pemasangan. Tingkat kecerahan lingkungan akan menjadi parameter bagi hidup-matinya lampu disaat waktu belum menunjukkan pukul 18.00 WIB saat sore menjelang malam. Jika output LDR sudah menunjukkan indikasi gelap dengan parameter yang telah ditetapkan sebelumnya, maka lampu akan menyala.
11. RTC (*Real Time Clock*) berfungsi sebagai *master clock* pada pencuplikan data monitoring.
12. LED Driver, rangkaian ini berfungsi untuk mengatur keluaran tegangan sumber daya lampu yang akan mempengaruhi kecerahan nyala lampu.
13. Sensor arus, modul ini berfungsi untuk mengetahui arus yang mengalir pada lampu LED yang jika terdeteksi nilai arus lebih besar dari 0,01 mA, maka lampu dalam kondisi menyala.
14. Sensor tegangan, penggunaan dua buah rangkaian ini berfungsi untuk mengetahui besarnya tegangan yang mengalir (terdapat) pada baterai dan pada lampu LED. Hal ini digunakan sebagai parameter kondisi lampu dan baterai.
15. Lampu LED, berfungsi sebagai sumber penerangan pada PJU. Jenis LED dipilih karena lebih hemat energi dan karena tingkat kecerahannya yang dapat diatur.
16. Sepasang modul Zigbee Series 2 (koordinasi dan *router*), berfungsi sebagai *gateway* komunikasi nirkabel antara titik lampu (*node*) dan *server*.
17. Laptop, digunakan sebagai *server* dan pusat penyimpanan data
18. Visual Basic sebagai *interface* antara pusat data dengan perangkat keras menggunakan komunikasi serial.
19. Microsoft Acces sebagai pusat data (*database*).

Gambar 2. menunjukkan diagram blok sistem penerangan jalan umum (PJU) pintar secara keseluruhan beserta peralatan yang digunakan.

PENGUJIAN

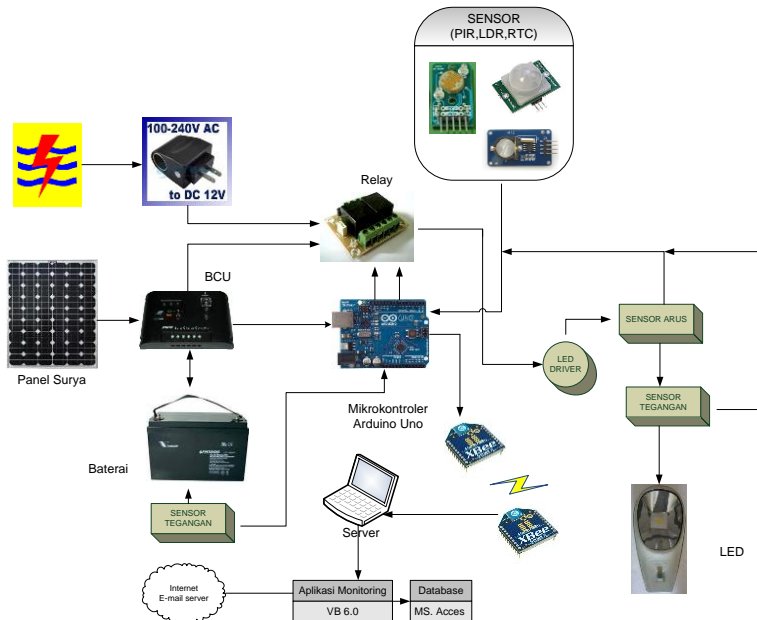
Sistem ini diuji menggunakan prototipe lampu jalan pintar dengan kurun waktu satu hari. Hal ini dilakukan untuk membandingkan energi yang digunakan pada sistem dengan perhitungan menggunakan besaran-besaran estimasi. Selain fungsi integrasi beberapa pengukuran lain juga dilakukan secara terpisah untuk mengetahui performansi maksimum dari alat-alat yang digunakan.

A. Hasil Penelitian dan Pengujian Komunikasi Zigbee Series 2

Pemodelan pengukuran berbasis kuat sinyal yang diterima pada suatu titik permukaan diberikan sebagai pemodelan penerimaan sinyal dari antena di ruang bebas (*free-space*) pada luasan tertentu. **Formula Friss** menyatakan bahwa perbandingan daya kirim sebuah antena dan daya terima sinyal antena yang lain merupakan *gain* dari antena-antena tersebut dikalikan dengan koefisien yang berhubungan dengan panjang gelombang dan jarak. Untuk perhitungan jarak pancar radio dalam propagasi untuk bidang pantul datar digunakan persamaan

$$d = \sqrt[4]{\frac{Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot ht^2 \cdot hr^2}{Pr}} \quad (1)$$

Dimana: Pt (daya pancar) = 0,0005 watt, Pr (respon sensitivitas) = 10^{-12} watt, Ht (ketinggian antena pemancar) = 4 meter, Hr (ketinggian antena penerima) = 2 meter, Gt (gain antena pemancar) = 1, Gr (gain antena penerima) = 1. Dengan menggunakan persamaan (1), maka jarak jangkauan dari perangkat komunikasi Zigbee adalah:



■ Gambar 2. Blok sistem pencahayaan jalan umum (PJU) pintar secara keseluruhan

$$d = \sqrt[4]{\frac{0,0005 \cdot 1.1 \cdot 4^2 \cdot 2^2}{10^{-12}}}, \quad d = 422,94 \text{ m} = 423 \text{ m}$$

Hasil perhitungan tersebut akan dibandingkan dengan hasil pengujian menggunakan perangkat lunak X-CTU yang akan mengukur level RSSI seiring dengan perubahan jarak. RSSI adalah Indikasi kekuatan sinyal yang di terima (Received Signal Strength Indication). Dalam metode ini, model teoritis atau empiris yang digunakan untuk menerjemahkan kekuatan sinyal ke dalam perkiraan jarak [6] dalam transmisi sinyal nirkabel diberikan oleh

$$[Pr(d)] = [Pr(do)]dBm - 10n \frac{d}{do} + XdBm \quad (2)$$

Dengan d , adalah jarak dari pemancar dan penerima dengan satuan meter, do adalah jarak referensi yang biasa bernilai sama dengan 1 meter, $Pr(d)$ adalah kekuatan sinyal yang diterima oleh penerima (dBm), $XdBm$ adalah variabel acak Gaussian yang nilai rata-ratanya adalah 0, nilai ini menggambarkan perubahan kekuatan sinyal yang diterima dalam jarak tertentu, dan n adalah indeks *path loss*.

Pengujian RSSI dilakukan dalam kondisi NLOS (*Non Line of Sight*) dan LOS (*Line of Sight*). Pengujian LOS dilakukan di luar ruangan dalam satu garis lurus namun dikelilingi oleh pepohonan, gedung, dan mobil. Sementara pengujian NLOS dilakukan dalam ruangan pada satu garis lurus dengan penghalang pintu kaca. Hasil pengujian terlihat seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2 dimana jarak maksimum Zigbee S2 atau dalam hal ini respon sensitivitas minimum Zigbee S2 yaitu -89 dBm didapat pada jarak 60 meter untuk LOS dan 10 meter untuk LOS, dengan persentase data sampai dalam satu kali pengiriman yaitu 21,4 %. Hal ini berarti Zigbee S2 harus mengirim data setidaknya tiga kali untuk memastikan data sampai pada penerima. Zigbee memiliki metode ACK untuk memastikan data telah sampai pada penerima.

■ Tabel 1. Hasil pengujian RSSI terhadap jarak antar modul Zigbee pada kondisi NLOS

Jarak (m)	RSSI (dBm)	Pengiriman Data
1	-71	Terkirim
2	-64	Terkirim
3	-72	Terkirim
4	-77	Terkirim
5	-68	Terkirim
6	-79	Terkirim
7	-81	Terpotong
8	-79	Terpotong
9	-86	Tidak Terkirim
10	-89	Tidak Terkirim

■ **Tabel 2.** Hasil pengujian RSSI terhadap jarak antar modul Zigbee pada kondisi LOS

Jarak (m)	RSSI (dBm)	% Data Terkirim	Pengiriman Data
0	-52	100	Terkirim
10	-84	90	Terkirim
20	-75	97,1	Terkirim
30	-82	95,5	Terkirim
40	-88	56,6	Terkirim
50	-88	25,8	Terkirim
60	-89	21,4	Terpotong
70	-90	19,6	Tidak Terkirim

Selain pengukuran RSSI untuk menentukan jarak maksimum Zigbee S2, dilakukan pula pengujian untuk mengetahui kapasitas payload maksimum untuk satu paket dalam satu kali pengiriman dari transmitter ke receiver. Dari pengujian tersebut, seperti tertera pada Tabel 3 maksimum data yang dapat dibawa adalah 1200 bit/paket. Nilai ini didapatkan dengan menghitung jumlah karakter yang dikirimkan dengan satu karakter atau satu byte terdiri dari 8 bit. Maka jika payload dapat mengirim maksimum 150 karakter berarti paket tersebut memiliki ukuran total 1200 bit/paket. Meskipun data maksimum dalam perencanaan hanya 376 bit/paket hal ini perlu untuk diketahui mengingat kemungkinan perluasan jaringan yang mengharuskan Zigbee membawa informasi atau data dari satu node ke node yang lain sebelum menuju *sink/ coordinator*.

■ **Tabel 3.** Hasil pengukuran besar payload Zigbee *single peer (point to point)*

Ukuran Payload	Keterangan
50 karakter = 400 bit	Terkirim
100 karakter = 800 bit	Terkirim
150 karakter = 1200 bit	Terkirim
200 karakter = 1600 bit	Terpotong

B. Pengukuran Konsumsi Energi Lampu

Lampu jalan pintar didesain untuk mengirimkan hasil pengukuran sensornya kepada server setiap tiga detik yang didalamnya terdapat tiga kali hasil pengukuran data. Data ini kemudian akan diolah oleh aplikasi untuk dianalisa penggunaan energinya. Untuk itu dilakukan pengujian pengambilan data hasil pengukuran sensor untuk tiga mode lampu, yaitu saat menyala sepenuhnya, redup, dan mati. Setelah diuji selama satu hari, terukur bahwa lampu menggunakan energi secara konstan tiap mode operasinya dengan toleransi $\pm 10\%$ untuk arus dan $\pm 2\%$ untuk tegangan yang terukur. Sehingga jika diambil nilai rata-ratanya maka tegangan dan arus untuk masing-masing mode akan terlihat seperti Tabel 4. Untuk mikrokontroler dan seluruh modul sensor dan relay, tegangan yang terpakai adalah 12 v dan memakai arus sebesar 0.2 mA.

■ **Tabel 4.** Hasil pengukuran tegangan dan arus lampu untuk tiap mode operasi

Mode Lampu	Tegangan (V)	Arus (mA)
Terang, Malam Hari – PIR (mendeteksi=1)	12,27	0,66
Redup, Malam Hari – PIR (mendeteksi = 0)	10,36	0,13
Mati, Siang Hari	0,04	0

C. Perhitungan Daya Tahan Baterai

Lampu jalan pintar menggunakan panel surya dan baterai sebagai sumber daya utama. Hal ini tentu akan memangkas biaya tagihan listrik pemerintah daerah, apalagi jika ditambah penggunaan lampu yang hemat energi. Namun, sumber daya ini sangat bergantung akan ketersediaan cahaya matahari. Semakin panas dan terang cuaca, maka akan semakin baik bagi kelajuan pengisian baterai. Sebaliknya saat mendung ataupun saat cuaca berawan, maka panel surya akan sedikit sekali menghasilkan listrik yang berakibat tidak terisinya baterai secara maksimal. Untuk itu, dilakukan pengujian daya tahan baterai terhadap beban dengan menggunakan parameter seperti yang tertera pada Tabel 4, Tabel 5, dan spesifikasi alat yang digunakan.

- Baterai 12 V 100 Ah
- Total Beban 347,328 W/hari atau 14.472 W/jam
- $12\text{ V} \times 100\text{ Ah} = 1200\text{ W/jam} \rightarrow 1200/14,472 = 82,918\text{ jam} \approx 3,5\text{ hari}$

Sementara listrik yang dihasilkan adalah :

- 1 unit baterai \times 100 WP (tipe panel surya) = 100 W/ jam untuk pemanasan pada puncak pemanasan (peak).

Dalam sehari kurang lebih bisa menghasilkan energi listrik sebesar $100\text{WP} \times 5 \text{ jam} = 500 \text{ W}$. Adapun kapasitas baterai yang diperlukan adalah:

$$\text{Kapasitas yang diperlukan (DoD 80\%)} = \frac{\text{Total Beban (hari)} * \text{Days of autonomy (tanpa matahari)}}{\text{DoD (Depth Of Discharge)} * \text{Voltase yang diperlukan}} \quad (3)$$

$$= (347,328 \times 2 \text{ hari}) / (80\% \times 12\text{V}) = 72,36 \text{ Ah}$$

Dengan skenario DoD 50%, $= (347,328 \times 2 \text{ hari}) / (50\% \times 12\text{V}) = 115,776 \text{ Ah}$

Hasil perhitungan memperkirakan bahwa sistem tetap dapat disuplai baterai 100 Ah selama dua hari untuk batas DoD 80%. Batas DoD tersebut adalah batas yang dianjurkan oleh pabrik. Namun, pada kenyataannya lampu pintar membutuhkan batas DoD yang lebih rendah yaitu 50 %. Hal itu disebabkan kebutuhan mikrokontroler, modul sensor, relay, dan Zigbee S2 untuk terus beroperasi selama 7 hari @ 24 jam. Untuk itu disarankan penggunaan kapasitas baterai yang lebih besar agar bisa menyimpan lebih banyak daya.

Namun, jika menimbang dari kepentingan keberadaan lampu jalan pada kegiatan dan keamanan masyarakat sesungguhnya dibutuhkan sistem pencatuan yang lebih handal dari sekedar panel surya. Maka dari itu, pemasangan sistem on-grid digunakan pada sistem lampu jalan pintar ini. Sistem akan mengubah sumber catuan dengan menggerakkan relay yang dikendalikan mikrokontroler saat dirasa tegangan yang terukur sudah mencapai ambang batas bawah. Sehingga diharapkan lampu akan tetap menyala saat malam hari meskipun baterai tidak terisi.

D. Perbandingan Sistem Lampu Jalan Pintar dengan Sistem Konvensional

Untuk melihat seberapa besar efisiensi yang didapatkan dari hasil penerapan lampu jalan pintar dan monitoring ini, dilakukan perhitungan dan perbandingan antara lampu jalan pintar yang diajukan, lampu jalan tenaga surya konvensional, dan lampu jalan yang masih menggunakan listrik PLN dan lampu pijar. Perhitungan ini menggunakan asumsi dan nilai-nilai sesuai pada hasil pengukuran sebelumnya pada Tabel 4. Asumsi yang digunakan adalah bahwa lampu menyala selama 12 jam. Sedangkan untuk lampu pintar, akan diasumsikan lampu menyala terang selama total 6 jam dan menyala redup selama total 6 jam. Hasil perhitungan, pada Tabel 5. membuktikan bahwa lampu untuk jalan pintar menggunakan energi yang jauh lebih kecil dibandingkan lampu jalan biasa. Total daya yang digunakan pertahun lampu jalan pintar adalah sepertujuh dari total penggunaan daya lampu pijar. Ditambah dengan penghilangan tagihan listrik dengan pemakaian panel surya maka, penghematan yang tercapai sangatlah besar meskipun untuk investasi awal akan memakan biaya yang cukup besar. Namun, dikarenakan umur masing-masing komponen hardware yang panjang maka nilai investasi awal dapat tertutup. Tabel 5 menunjukkan hasil perbandingan penggunaan energi antara PJU pijar, PJU + LED, dan PJU pintar + LED.

■ **Tabel 5.** Data Hasil Perbandingan Konsumsi Energi Antar Sistem

Asumsi Pemakaian dan Biaya Operasi	Lampu Jalan Surya Pintar + LED	Lampu Jalan Surya + LED	Lampu Jalan Pijar
Daya lampu (watt)	terang (35,424)	35	200
	redup (12,96)		
	mati (4,752)		
Lama operasi/hari (jam)	6 jam terang + 6 jam gelap + 12 jam mati	12	12
Daya per hari (watt Hour)	347,328	420	2400
Pemakaian pertahun (hari)	365	365	365
Total daya per tahun (kWh)	126,77472	153,3	876
Harga listrik per kwh (Rp)	Tidak ada	Tidak ada	900
Biaya listrik per tahun (Rp)	Tidak ada	Tidak ada	788.400
Umur dan harga modul	Panel Surya - 20 tahun (Rp 2.500.000/100WP)	Panel Surya - 20 tahun (Rp 2.500.000/100WP)	Lampu Pijar - 6 bulan (Rp 500.000/200 W)
	Baterai - 3 tahun (Rp 3.000.000/100 Ah)	Baterai - 3 tahun (Rp 3.000.000/100 Ah)	
	LED -20 tahun (Rp 2.500.000/35 W)	LED -20 tahun (Rp 2.500.000/35 W)	
	Kontroler - tahun (Rp 100.000)		
Biaya Perawatan per Tahun (Rp)	Rp 1.250.000	Rp 1.050.000	Rp 1.000.000

Terlihat pada Tabel 5, bahwa PJU pintar memberikan penggunaan energi yang lebih efisien/sedikit dibanding dengan PJU lampu pijar maupun PJU + LED. Dengan demikian, penggunaan PJU pintar + LED akan sangat mendukung terciptanya green city.

Dari Tabel 5 terlihat bahwa pengukuran dari sensor tegangan terhadap multimeter yang digunakan, memiliki kesalahan $0,036 \pm 0,047$ atau $4,73 \pm 11,62$ %. Kesalahan ini terjadi karena perbedaan skala ketelitian pada alat ukur dan sensor serta resistor yang digunakan untuk mengukur tegangan memiliki toleransi yang dipengaruhi oleh suhu sehingga dapat mempengaruhi pembacaan tegangan. Besar nilai kesalahan tersebut masih dapat ditoleransi sehingga sensor ini masih dapat digunakan pada sistem.

KESIMPULAN

- a. Level RSSI maksimum atau sensitivitas minimum modul Zigbee Series 2 baik untuk keadaan LOS dan NLOS adalah sebesar -89 dBm atau $12,5 \times 10^{10}$ mW. Pada level ini, sinyal masih dapat diterima dengan baik oleh receiver dengan node terjauh berada pada 60 m (jarak efektif). Hal ini berbeda dengan yang disampaikan pada *datasheet* modul Zigbee s2 dan juga dari hasil hitungan yang didapatkan yaitu 423 meter. Perbedaan ini disebabkan karena perbedaan kondisi tempat pengukuran serta kondisi cuaca.
- b. Pengiriman data serial dari node ke *server* menggunakan komunikasi nirkabel memiliki panjang paket 376 bit/paket. Dengan kapasitas kanal ZigBee Wireless adalah sebesar 250 kbps panjang paket maksimum yang dapat dikirimkan per paket adalah 1200 bit / paket.
- c. Aplikasi yang dibuat dapat memunculkan dan menghitung total daya dan energi yang telah digunakan oleh lampu, berikut grafik penggunaan per hari.
- d. Kapasitas baterai 100 Ah dan panel surya 100 WP yang digunakan oleh sistem lampu jalan pintar mampu menyuplai sistem selama 3 hari (tanpa matahari) dengan DoD 80%.
- e. Dengan menggunakan asumsi bahwa daya yang digunakan oleh sistem lampu jalan pintar adalah tetap dan mempertimbangkan lama jam kerja yang juga tetap yaitu 12 jam lampu mati dan 12 jam lampu hidup maka, didapatkan total daya penggunaan per tahun adalah 126,8 kWh untuk lampu jalan pintar. Sedangkan lampu jalan tenaga surya konvensional dengan LED mengkonsumsi 153,3 kWh dan lampu jalan dengan lampu pijar mengkonsumsi 876 kWh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. OSRAM, Penggantian Penerangan Jalan Konvensional Dengan LED (Suatu pendekatan untuk aksi mitigasi RAD-GRK (NAMA)). Indonesia: PAKLIM – Policy Advice for Environment and Climate Change (Project), 2012.
- [2]. BKF: Ramadhan Harisman, dkk GIZ: Muhammad Handry Imansyah, Phillip Munzinger dkk, "Desain Mekanisme Pembiayaan Lampu Penerangan Jalan Umum Hemat Energi LED Untuk Pemerintah Daerah," Kementrian Keuangan Republik Indonesia, Badan Kebijakan Fiskal, Pusat Kebijakan Pembiayaan Perubahan Iklim dan Multilateral, Jakarta, Melalui Proyek: Policy Advice for Environment and Climate Change 2013.
- [3]. Fabio Leccese, "Remote-Control System of High Efficiency and Intelligent Street Lighting Using a Zigbee Network of Devices and Sensors," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28 No.1, January, pp. 21-28, 2013.
- [4]. Wu Yong WuQing LiLong Chu Xiumin, "The Development of Road Lighting Intelligent Control System Based On Wireless Network Control," 2009 International Conference on Electronic Computer Technology, vol. 10, no. 1109, pp. 353-357, September 2009.
- [5]. DongmeiShu, and Deying Gu Chunguo Jing, "Design of Streetlight Monitoring and Control System Based on Wireless Sensor Network," 2007 Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, vol. 1-4244-0737-0, pp. 57-62, July 2007.
- [6]. Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol For RF Module Part Numbers: XB24-A...-001, XBP24-A...-001. Digi International
- [7]. IEEE802.15.4 <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>
- [8]. S. Farahani, "Zigbee Wireless Networks and Transceivers", ebook, Elsevier, 2008.
- [9]. Zhang Jieying, Sun Maonhang .2007. "Dynamic distance estimation method based on RSSI and LQI", Journal of ELECTRONIC MEASUREMENT TECHNOLOGY, vol 30 No.2 halaman 142-145.