

Aplikasi *solar energy harvesting* dalam jaringan sensor nirkabel pemantauan kualitas udara

Maitsa'a Rafasani¹, Sabar Pramono², Paula Santi Rudati^{3*}

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Bandung 40559, Indonesia

¹maitsaorafasani@gmail.com, ²sabar.pramono@polban.ac.id, ^{3*}psrudati@polban.ac.id

ABSTRAK

Jaringan sensor nirkabel merupakan teknologi yang banyak digunakan oleh sistem dengan koneksi jarak jauh. Jaringan sensor nirkabel terdiri dari *sensor node* serta *gateway*. Sesuai dengan tujuan pengembangannya, *sensor node* dari jaringan sensor nirkabel seringkali terletak di daerah yang jauh dari sumber listrik. Selain itu, baterai sebagai sumber daya untuk *sensor node* memiliki kapasitas yang terbatas dan akan berkurang seiring waktu. *Solar energy harvesting* (SEH) adalah suatu metode pembangkitan listrik dari energi sekitar dengan menggunakan sinar matahari sebagai sumber energi. Pada penelitian ini dilakukan realisasi dan investigasi penggunaan SEH pada sistem jaringan sensor nirkabel untuk mendeteksi kualitas udara. SEH dirancang dengan menggunakan panel surya yang mengubah energi foton sinar matahari menjadi daya listrik yang disimpan pada baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan SEH pada sistem pemantauan kualitas udara dapat memberikan tambahan daya pada baterai sehingga masa pakai baterai dua kali lebih lama dari masa pakai baterai pada node sensor tanpa SEH. Pada sistem ini, kualitas udara dan kondisi baterai dari setiap *sensor node* dapat dipantau melalui antarmuka berbasis *web* yang dapat diakses secara lokal maupun luas melalui jaringan internet.

Kata kunci: jaringan sensor nirkabel, SEH, *sensor node*, baterai, daya

ABSTRACT

Wireless sensor network is a technology that is widely used by systems with long-distance connections. The wireless sensor network consists of sensor nodes as well as gateways. In accordance with its development objectives, sensor nodes of wireless sensor networks are often located in areas far from the power source. In addition, the battery as a source of power for the sensor node has a limited capacity and will decrease over time. Solar Energy Harvesting (SEH) is a method to generate electricity from surrounding energy by using the sunlight as an energy source. In this research, the realization and investigation of the use of SEH in a wireless sensor network system is carried out to detect air quality. The SEH is carried out using photovoltaic cell which converts the energy of sunlight photon into electrical power which is stored in the battery. The test results show that the use of SEH in the air quality monitoring system can provide additional power in the battery so that the battery life is twice than the battery life at the sensor node without SEH. In this system, air quality and battery condition from each sensor node can be monitored through a web-based interface that can be accessed locally or widely via internet connection.

Keywords: wireless sensor networks, SEH, sensor nodes, battery, power

1. PENDAHULUAN

Jaringan sensor nirkabel (JSN) merupakan jaringan dari komponen-komponen kecil yang disebut *sensor node*. *Sensor node* dalam jaringan ini terdistribusi dan bekerjasama untuk mengkomunikasikan informasi yang dimonitor secara nirkabel. Data-data yang dikumpulkan oleh *sensor node* dikirimkan ke koordinator yang menggunakan data tersebut secara lokal atau terhubung ke jaringan lain [1]. JSN memiliki aplikasi yang secara garis besar dapat digolongkan ke dalam aplikasi monitoring dan pelacakan [1], [2]. Tantangan yang dihadapi dalam aplikasi JSN adalah kebutuhan terhadap *Quality of Service* (QoS) untuk berbagai aplikasi. Hal ini berkaitan dengan tujuan utama dari aplikasi JSN yaitu melakukan pemantauan terhadap hasil pendeteksian, menganalisa, mengkombinasikan, dan merespon data yang dikumpulkan oleh ratusan atau ribuan sensor yang didistribusikan pada area pendeteksian [3]. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam pemenuhan QoS antara lain keberhasilan pengiriman data dan ketersediaan energi pada *sensor node*. Beberapa penelitian seperti pada [4]-[8]

menginvestigasi algoritma yang efektif agar setiap *sensor node* dapat mengirimkan informasi ke *gateway* dengan konsumsi daya terendah. Pengembangan aplikasinya dilakukan melalui pemodelan algoritma pendeteksian [9], [10].

Dalam aplikasinya, sebagian besar *sensor node* pada JSN menggunakan baterai sebagai catu daya. Hal ini berkaitan dengan lingkungan aplikasi yang sering kali tidak dapat mengakses jaringan listrik, sehingga konsumsi daya pada *sensor node* merupakan isu yang penting. Masa pakai *sensor node* yang terbatas dengan penggunaan baterai merupakan salah satu tantangan utama dalam menerapkan JSN untuk aplikasi pemantauan lingkungan dimana terdapat kesulitan untuk mengganti baterai *sensor node* secara teratur [11], [12]. *Energy harvesting* memungkinkan perancangan sistem yang mampu beroperasi dengan menggunakan sumber energi dari lingkungan di sekitarnya, sehingga dapat mengurangi masalah penggantian baterai namun tidak untuk menggantikan fungsi baterai. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa secara simulasi penggunaan energi matahari sebagai sumber energi *sensor node* nirkabel melalui *solar energy harvesting* (SEH) dapat meningkatkan masa pakai *sensor node* [13], [14]. Keuntungan dalam penggunaan SEH pada *sensor node* antara lain [15]: energi matahari merupakan sumber energi dari luar, tidak menghasilkan polusi yang mengotori atmosfer, memiliki kerapatan daya yang tinggi dibandingkan dengan sumber *energy harvesting* lain yaitu sekitar 15 mW/cm^2 , dan bersifat fleksibel yaitu dapat digunakan untuk aplikasi dengan kebutuhan daya rendah seperti kalkulator dan jam hingga untuk yang berkebutuhan daya tinggi seperti pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).

Pada penelitian ini direalisasikan dan diinvestigasi suatu jaringan nirkabel yang menggunakan SEH sebagai upaya untuk memperpanjang usia baterai. Masalah yang diselesaikan adalah memberikan alternatif peluang untuk memperpanjang usia pakai baterai. Penelitian ini ditekankan untuk menjawab tantangan jaminan ketersediaan catu daya pada suatu *sensor node*, terutama apabila *sensor node* berada pada area yang sulit dijangkau, area yang luas, atau pada aplikasi JSN dengan jumlah *sensor node* yang banyak. Penelitian ini merupakan penelitian yang dilaksanakan secara eksperimen, sementara terdapat penelitian sejenis lainnya dilakukan secara simulasi [15]. Penelitian lain yang pernah dilakukan adalah penghematan penggunaan energi melalui metode transmisi dengan mengirimkan data secara tidak kontinu dengan metode *sleep awake* dan pengaturan level daya transmisi [16].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan merealisasikan sebuah sistem jaringan sensor nirkabel untuk pemantauan kualitas udara. Sistem terdiri dari dua buah *sensor node* dan sebuah *gateway*. Setiap *sensor node* terdiri dari komponen sensor, pemroses, dan transmitter serta dilengkapi dengan baterai kering sekunder sebagai catu daya. Setiap *sensor node* dilengkapi dengan sensor-sensor arus dan tegangan serta sensor-sensor gas CO, CO₂, NH₃, sensor temperatur, dan sensor kelembaban untuk pemantauan kualitas udara. Sensor-sensor tersebut digunakan untuk memperoleh data yang ditransmisikan, sehingga dapat dipastikan bahwa *sensor node* aktif mengirimkan data. Prioritas penelitian adalah pada penggunaan SEH.

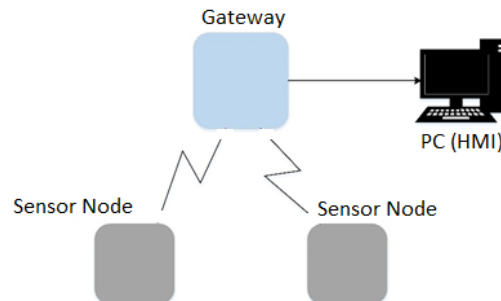
Pada SEH yang digunakan, energi matahari ditangkap oleh panel surya yang memiliki spesifikasi daya maksimum 20 W, tegangan maksimum 17,2 V, dan arus maksimum 1,16 A. Sel surya ini dihubungkan ke salah satu *sensor node*, sehingga terdapat perbedaan dalam konfigurasi catu daya diantara kedua *sensor node* yang digunakan. Pengujian unjuk kerja sistem dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap komponen yang digunakan dan selanjutnya kondisi dari kedua *sensor node* diinvestigasi.

Kedua *sensor node* terhubung dengan *gateway* melalui modul transmitter *long range* (LoRa). Pada modul ini, kekuatan sinyal yang diterima oleh *gateway* dari *sensor node* dinyatakan dalam *Received Signal Strength Indication* (RSSI) yang dinyatakan dalam -dBm. Nilai minus dBm (-dBm) menyatakan *losses* sehingga makin besar *losses*-nya maka makin lemah sinyal yang diterima. Dari pengujian yang dilakukan sebelumnya, data dapat diterima dengan baik pada nilai RSSI sampai dengan -100 dBm [17].

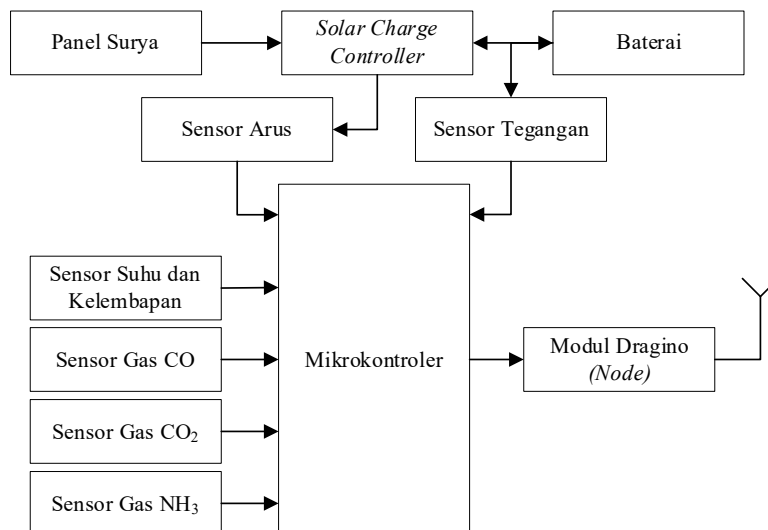
Modul transmitter ini memiliki fasilitas pengaturan level daya (*Tx Power*) yang dinyatakan dengan T_{x5} hingga T_{x23} untuk *range* daya -4 dBm hingga 20 dBm [18]. Dalam penelitian ini digunakan daya maksimum dengan level daya T_{x23} dengan nilai daya 20 dBm atau 100 mW agar penurunan daya

baterai lebih mudah diamati. Penggunaan daya kedua *node* diamati pada *gateway*. Selanjutnya, penggunaan daya dari kedua *sensor node* dianalisa untuk mengetahui pengaruh penggunaan SEH terhadap daya baterai.

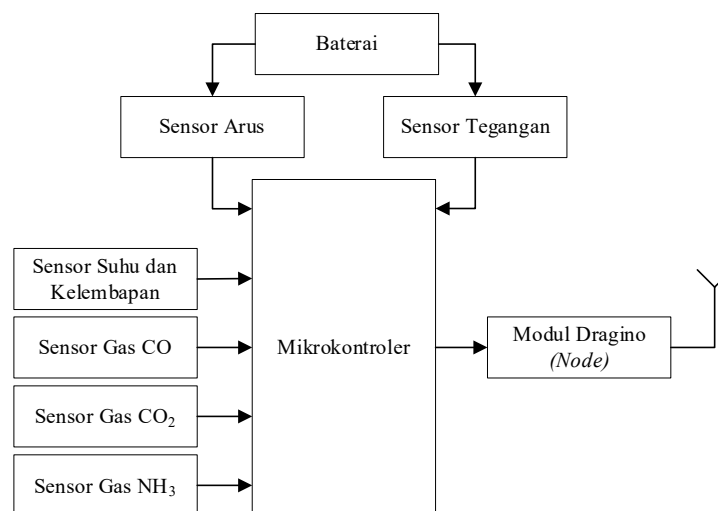
Diagram blok rancangan sistem, *sensor node* dengan SEH (SN1), *sensor node* tanpa SEH (SN2), dan *gateway* ditunjukkan berturut turut pada gambar pada Gambar 1, Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



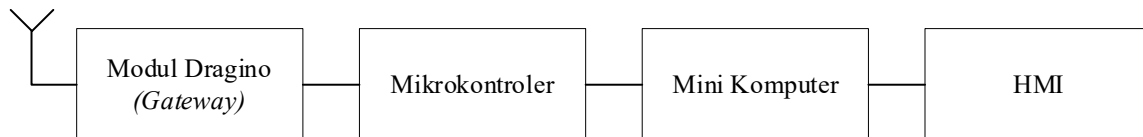
Gambar 1. Rancangan sistem JSN



Gambar 2. Diagram blok *sensor node* dengan SEH (SN1)

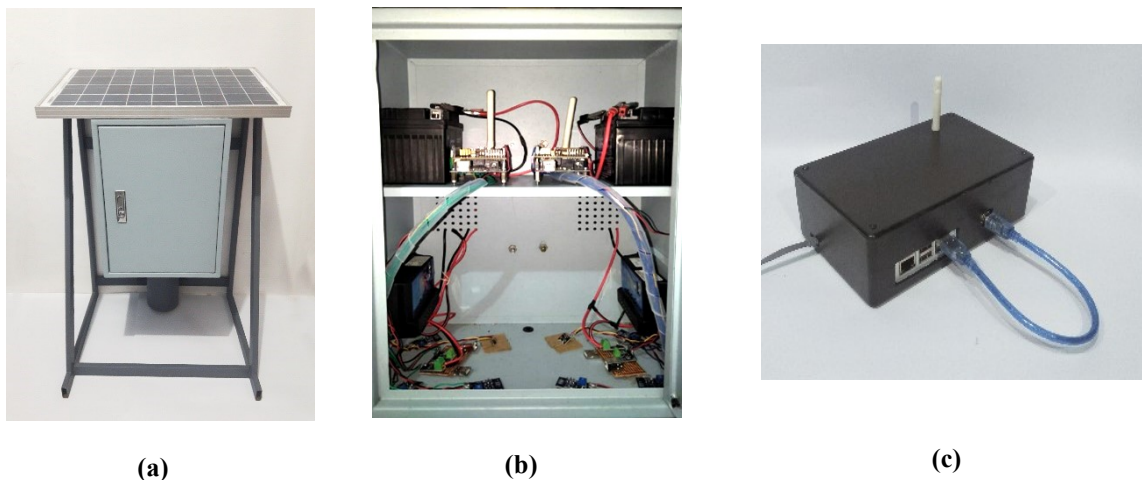


Gambar 3. Diagram blok *sensor node* tanpa SEH (SN2)

Gambar 4. Diagram blok *gateway*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

JSN yang direalisasikan terdiri dari dua buah *sensor node* yaitu *sensor node* dengan SEH (SN1) yang dihubungkan ke panel surya dan *sensor node* tanpa SEH (SN2) dan *gateway*. Untuk kebutuhan investigasi kedua *sensor node* tersebut dipasang dalam satu kotak. Tampilan fisik dari realisasi *sensor node* dan *gateway* diberikan pada Gambar 5(a), pengkabelan *sensor node* ditunjukkan pada Gambar 5(b), dan modul *gateway* ditunjukkan pada Gambar 5(c).

Gambar 5. Realisasi perangkat keras: (a) *sensor node*, (b) pengkabelan *sensor node*, (c) *gateway*

Pengujian dilakukan pada setiap komponen yang digunakan pada sistem agar dapat mengetahui kehandalan dari komponen yang digunakan. Sensor tegangan pada *sensor node* digunakan untuk mendeteksi tegangan baterai. Tabel 1 menunjukkan hasil percobaan dari sensor tegangan.

Tabel 1. Hasil pengujian sensor tegangan

Tegangan sumber (V)	Sensor tegangan pada SN1		Sensor tegangan pada SN2	
	Tegangan (V)	Error (%)	Tegangan (V)	Error (%)
3,31	3,30	0,30	3,33	0,60
4,89	4,89	0,00	4,89	0,00
5,80	5,79	0,17	5,82	0,34
8,08	8,09	0,12	8,09	0,12
9,12	9,14	0,21	9,14	0,21
10,34	10,42	0,77	10,42	0,77
14,91	15,01	0,67	15,01	0,67
17,05	17,14	0,52	17,14	0,52

Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat bahwa kedua sensor tegangan memiliki kesalahan pembacaan maksimum sebesar 0,7%. Pengujian juga dilakukan pada sensor arus yang akan digunakan. Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian sensor arus.

Tabel 2. Hasil pengujian sensor arus

Multimeter			Sensor arus pada SN1		
Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (mW)	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (mW)
5,98	1,44	8,61	5,98	1,60	9,56
8,32	2,46	20,46	8,32	2,60	21,63
10,59	3,50	37,06	10,59	3,80	40,24
12,85	4,50	57,82	12,85	4,90	62,96
15,08	5,55	83,69	15,08	5,90	88,97
Multimeter			Sensor arus pada SN2		
Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (mW)	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (mW)
5,90	1,39	8,20	5,90	1,40	8,26
8,22	2,42	19,89	8,22	2,60	21,37
10,53	3,45	36,32	10,53	3,70	38,96
12,76	4,46	56,90	12,76	4,70	59,97
14,99	5,46	81,84	14,99	5,90	88,44

Berdasarkan Tabel 2, ditunjukkan hasil pengukuran sensor arus yang diverifikasi dengan pengukuran multimeter. Terdapat perbedaan senilai 8% pada SN1 dan senilai $\pm 11\%$ pada SN2. Perbedaan ini masih dapat diterima mempertimbangkan keterbatasan alat ukur yang digunakan. Selain itu pengukuran dengan multimeter dilakukan secara manual dimana *probe* dari multimeter ditempelkan secara manual ke titik pengukuran. Hal ini berbeda dengan pengukuran arus oleh sensor dimana titik pengukuran ke sensor lebih stabil.

Sistem ini dibuat untuk melakukan pendeteksian kualitas udara melalui pendeteksian temperatur dan kelembapan dengan sensor DHT22. Hasil pengujian sensor ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian sensor suhu dan kelembapan

Termometer (°C)	Sensor pada SN1		Sensor pada SN2	
	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)
16	16,6	55,4	16,4	47,8
19	18,5	26,9	18,5	26,0
28	29,3	74,2	29,5	76,0
29	28,8	74,3	29,1	74,6
41	41,1	53,0	40,5	58,0

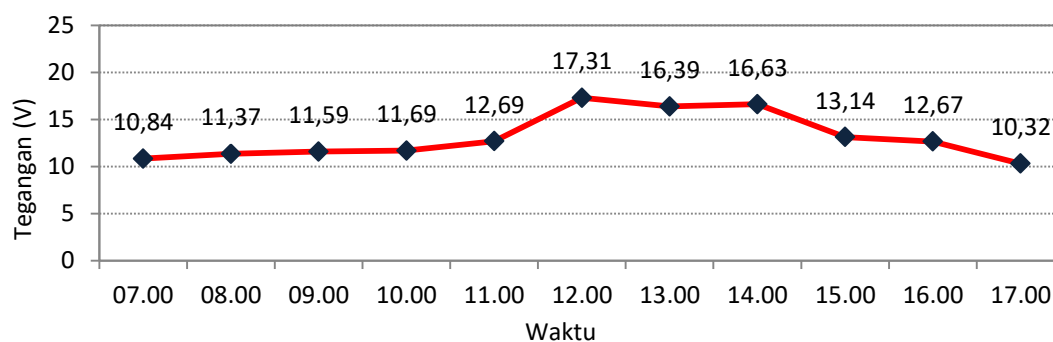
Pendeteksian kualitas udara dilakukan dengan menggunakan buah sensor MQ-135 yang masing-masing mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida (CO) atau gas amonia (NH₃). Penggunaan dua sensor dalam satu sistem ini dilakukan agar jika salah satu sensor mengalami kerusakan, maka tidak akan mempengaruhi pendeteksian sensor lainnya.

Pengujian sensor dilakukan melalui kalibrasi terhadap kurva sensitivitas pada *datasheet* sensor. Pengujian masing-masing sensor ditunjukkan pada Tabel 4 untuk gas karbon monoksida dan gas amonia. Hasil pengujian diberikan dalam nilai Rs (Ohm) dan ppm dimana nilai Rs adalah hasil pengukuran dan nilai ppm diperoleh dari grafik karakteristik fungsi transfer sensor yang ada pada *datasheet* sensor.

Tabel 4. Hasil pengujian sensor MQ-135 untuk karbon monoksida dan gas amonia

Karbon monoksida				Gas amonia			
Sensor pada SN1		Sensor pada SN2		Sensor pada SN1		Sensor pada SN2	
Rs (Ohm)	CO (ppm)	Rs (Ohm)	CO (ppm)	Rs (Ohm)	NH ₃ (ppm)	Rs (Ohm)	NH ₃ (ppm)
5424,60	14,72	5989,45	13,86	7351,60	25,00	51317,37	24,17
5378,09	15,09	5854,22	13,44	7309,09	25,34	51686,75	24,17
5353,97	15,46	5768,76	14,28	7269,97	25,69	50952,38	24,58
5225,23	15,84	5755,78	14,72	7225,23	26,05	50591,71	25,00
5225,28	15,84	5654,39	14,28	7225,23	26,05	50952,38	24,58
5108,86	16,63	5543,45	15,17	7142,86	26,77	50235,29	25,42
5096,56	16,23	5543,45	15,17	7183,86	26,41	50235,29	25,42
5108,86	16,63	5498,66	16,10	7142,86	26,77	49534,88	26,28
5096,56	16,23	5543,45	15,17	7183,86	26,41	50235,29	25,42
5037,08	15,84	5543,45	15,17	7225,23	26,05	50235,29	26,42

Pengujian selanjutnya dilakukan pada panel surya untuk mengetahui kinerja dari panel surya saat menerima sinar matahari. Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian panel surya.

**Gambar 6. Hasil pengujian panel surya**

Berdasarkan data pada Gambar 6, tegangan maksimal didapatkan pada pukul 12 siang yaitu senilai 17,31 V dengan arus 1,2 A. Hasil perhitungan memberikan nilai daya 20,770 W. Dengan demikian, pada saat matahari terik, panel surya dapat memberikan daya sebesar 20,770 W. Pada sistem, baterai yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan 1 V dan arus 5 Ah. Dengan demikian lama pengisian baterai dalam kondisi matahari terik adalah 5 Ah/1,2 A atau 4,17 jam.

Dari analisa sistem, diperoleh beban yang terhubung memiliki tegangan maksimum (V_m) senilai 4,730 V dengan arus maksimum (I_m) senilai 0,530 A sehingga daya yang digunakan (P) untuk mengoperasikan *sensor node* senilai 2,506 W. Selain itu tegangan maksimum baterai (V) adalah 12 V dengan kapasitas arus baterai (I_b) 5 Ah dan defisiensi baterai (def) adalah 10%. Dengan demikian dapat dihitung arus pemakaian (I) dan waktu pemakaian (T) dengan persamaan:

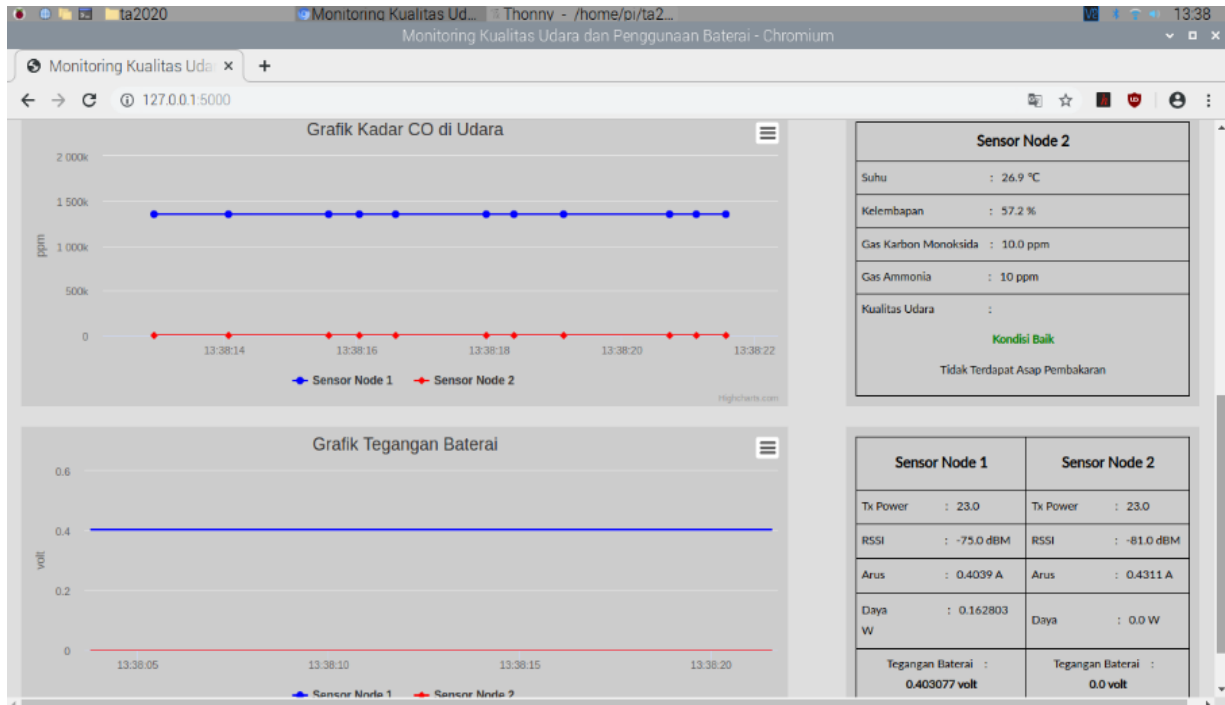
$$I = \frac{P}{V} \quad (1)$$

$$T = \frac{I_b}{I} (100 - def) \quad (2)$$

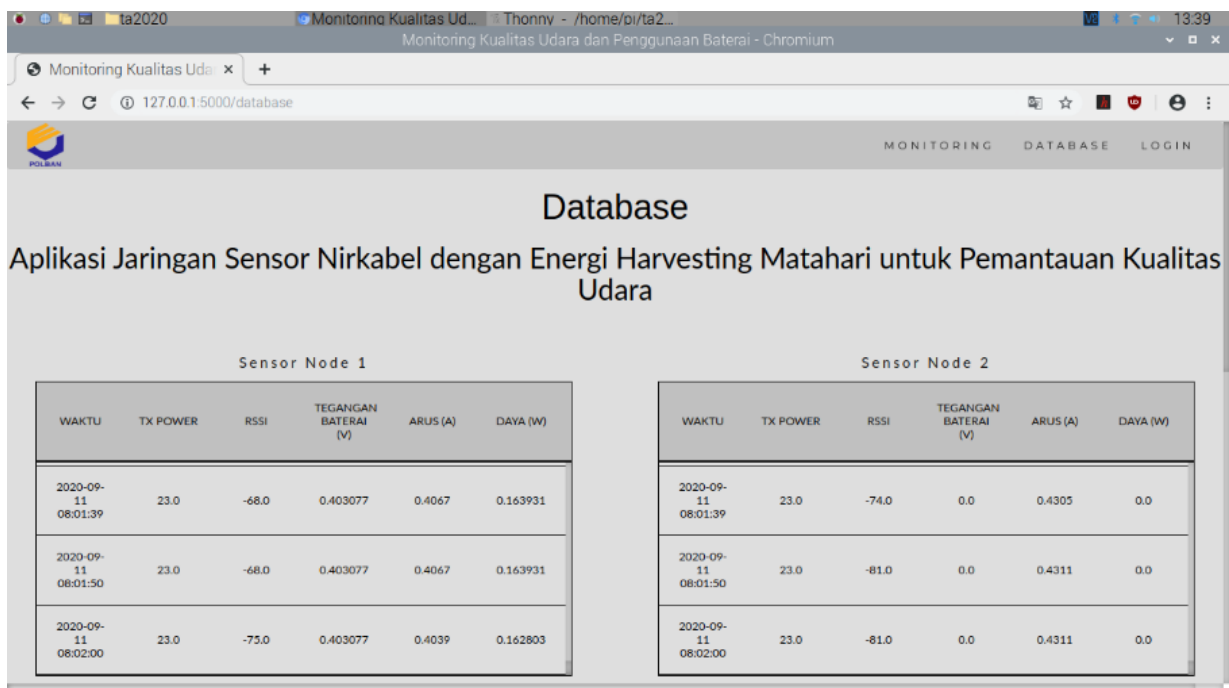
dengan menggunakan persamaan (1) diperoleh nilai arus pemakaian 0,208 A dan dengan menggunakan persamaan (2) diperoleh waktu pemakaian 21,635 jam.

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan untuk mendapatkan perbedaan penggunaan daya pada SN1 dan pada SN2. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan kedua *sensor node* secara bersamaan dan mencatat waktu operasi masing masing *sensor node* dimana *sensor node* berhenti

beroperasi (mati) pada saat tegangan baterai sama dengan 9 V. Pada saat pengujian, *sensor node* diletakan di area terbuka sehingga mendapatkan cahaya matahari secara langsung. Data pendeteksian kualitas udara dikirimkan ke *gateway* dan ditampilkan pada *Human Machine Interface* (HMI). Gambar 7(a) dan Gambar 7(b) menunjukkan tampilan antarmuka hasil pengukuran dan Tabel 5 menunjukkan data hasil pengujian sistem.



(a)



(b)

Gambar 7. Tampilan: (a) antarmuka pemantauan kualitas udara dan penggunaan baterai, (b) menu basis data

Tabel 5. Hasil pengujian sistem

1	Hari pemasangan (H0) pukul 03.00 WIB						
	Sensor node	Tegangan awal (V)	Arus (A)	Tegangan akhir (V)	Waktu mati	Durasi	Rasio SN1:SN2
	Sensor node 1	12,54	0,33	9	H+0 pukul 23.49 WIB	20 Jam 49 Menit	1,82
Sensor node 2	12,58	0,34	9	H+0 pukul 14.28 WIB	11 Jam 28 Menit		
2	Hari pemasangan (H0) pukul 21.00 WIB						
	Sensor node	Tegangan awal (V)	Arus (A)	Tegangan akhir (V)	Waktu mati	Durasi	Rasio SN1:SN2
	Sensor node 1	12,88	0,35	9	H+2 pukul 02.00 WIB	29 Jam 49 Menit	2,98
Sensor node 2	12,71	0,34	9	H+1 pukul 07.00 WIB	10 Jam		
3	Hari pemasangan (H0) pukul 03.30 WIB						
	Sensor node	Tegangan awal (V)	Arus (A)	Tegangan akhir (V)	Waktu mati	Durasi	Rasio SN1:SN2
	Sensor node 1	12,72	0,42	9	H+1 pukul 01.30 WIB	22 Jam	2,00
Sensor node 2	12,55	0,44	9	H+0 pukul 14.28 WIB	10 Jam 58 Menit		
4	Hari pemasangan (H0) pukul 20.00 WIB						
	Sensor node	Tegangan awal (V)	Arus (A)	Tegangan akhir (V)	Waktu mati	Durasi	Rasio SN1:SN2
	Sensor node 1	12,68	0,46	9	H+2 pukul 00.38 WIB	28 Jam 38 Menit	2,52
Sensor node 2	12,56	0,53	9	H+1 pukul 07.23 WIB	11 Jam 23 Menit		

Berdasarkan hasil pengujian sistem yang ditunjukkan pada Tabel 5, terdapat perbedaan durasi waktu operasi dari SN1 dan SN2. SN1 memiliki rata rata durasi waktu operasi senilai 25 jam 19 menit, sedangkan SN2 senilai 10 jam 57 menit. Berdasarkan data tersebut, SN1 memiliki durasi waktu operasi dua kali lebih panjang dibandingkan dengan SN2. Hal ini disebabkan SN1 terhubung dengan panel surya dan mendapatkan energi matahari pada siang hari. Pada saat tersebut terjadi pengisian baterai sesuai dengan pengujian kinerja panel surya yang dilakukan sebelumnya, Bila energi matahari yang diterima maksimum, maka waktu yang diperlukan untuk pengisian baterai hingga penuh adalah 4,17 jam. Penelitian lain yang sejenis [15] mengenai simulasi penggunaan SEH menunjukkan bahwa secara teoritis waktu operasi JSN dapat ditingkatkan sewaktu yang tak terbatas. Dengan demikian hasil-hasil pengujian sistem secara keseluruhan menunjukkan terpenuhinya QoS dalam hal pengiriman data dari *sensor node* ke *gateway*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil-hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan SEH dengan panel surya berserta sensor arus dan tegangan dapat meningkatkan kinerja QoS dari JSN. Kinerja QoS ditunjukkan dengan durasi operasi SN1 yang dua kali lebih lama dibandingkan dengan SN2 dan terkirimnya data dari *sensor node* ke HMI. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dikembangkan algoritma kontrol maupun optimasi penggunaan SEH pada JSN untuk lebih meningkatkan durasi operasinya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Laboratorium Instrumentasi Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung yang telah memfasilitasi peralatan dalam pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] P. Rawat, K. D. Singh, H. Chaouchi, and J. M. Bonnin, "Wireless Sensor Networks: A Survey on Recent Developments and Potential Synergies," *The Journal of Supercomputing*, vol. 68, pp. 1-48, 2014.
- [2] A. A. A. Ari, A. Gueroui, N. Labraoui, and B. O. Yenke, "Concepts And Evolution of Research In The Field of Wireless Sensor Networks," *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, vol. 7, no. 1, pp. 81-98, 2015.
- [3] H. Sharma, A. Haque, and Z. A. Jaffery, "Solar energy harvesting wireless sensor network node: A survey," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 023704, 2018.
- [4] K. Liu and C. Wang, "Improved Optimal Route Evaluation Method for Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensor Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 1747-1754, 2018.
- [5] R. S. Ko, "A load balancing routing algorithm for Wireless Sensor Networks based on domain decomposition," *Ad Hoc Netw*, vol. 30, no. 4, pp. 63-83, 2015.
- [6] M. Hammoudeh and R. Newman, "Adaptive routing in wireless sensor network: QoS optimization for enhanced application performance," *Inf. Fusion*, vol. 22, no. 1, pp. 3-15, 2015.
- [7] K. Wang, H. Gao, X. Xu, J. Jiang, and D. Yue, "An energy efficient reliable data transmission scheme for complex environment monitoring in underwater acoustic sensor networks," *IEEE Sensor Journal*, vol. 16, no. 11, pp. 4051-4061, 2016.
- [8] N. Magaia, N. Horta, R. Neves, P. R. Pereira, and M. Correia, "A multi objective routing algorithm for wireless sensor network," *Appl. Soft Comput*, vol. 30, no. 5, pp. 104-112, 2015.
- [9] A. Kusiak, M. Li, and H. Zheng, "Virtual Models Of Indoor-Air-Quality Sensors," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 2087-2094, 2010.
- [10] T. D. Nguyen, J. Y. Khan, and D. T. Ngo, "An Effective Energy-Harvesting-Aware Routing Algorithm for WSN-based IoT Applications," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, 2017.
- [11] C. W. Hung and W. T. Hsu, "Article Power Consumption and Calculation Requirement Analysis of AES for WSN IoT," *Sensors*, vol. 18, pp. 1675, 2018.
- [12] K. S. Adu-Manu, N. Adam, and C. Tapparello, "Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSNs): A Review," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 14, no. 2, pp. 1-50, 2018.
- [13] L. Zhang, Y. Yu, H. Ma, and Y. Z. Guilin, "Design of Photovoltaic Power Supply MPPT Circuit for WSN Node Based on Current Observation," *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, vol. 14, no. 7, pp. 45-61, 2018.
- [14] A. P. Vadean, P. P. Pop, T. Latinovic, C. Barz, and C. Lung, "Harvesting Energy An Sustainable Power Source, Replace Batteries for Powering WSN and Devices on The Iot," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 200, Innovative Ideas in Science, Baia Mare, Romania, 2016.
- [15] H. Sharma, A. Haque, and Z. A. Jaffery, "Maximization of Wireless Sensor Networks Lifetime using Solar Energy Harvesting for Smart Agriculture Monitoring," *Ad Hoc Networks*, vol. 94, pp. 101966, 2019.
- [16] H. T. Monda, F. Feriyonika, and P. S. Rudati, "Sistem Pengukuran Daya pada Sensor Node Wireless Sensor Network," *9th Industrial Research Workshop and National Seminar*, Bandung, 2018, pp. 28-31.
- [17] M. N. Fauzi, P. S. Rudati, and F. Feriyonika, "Sistem Penjaluran dan Klasterisasi pada Jaringan Sensor Nirkabel Berbasis LoRa," *9th Industrial Research Workshop and National Seminar*, Bandung, 2018, pp. 271-274.
- [18] M. Bor, U. Roedig, and J. M. Alonso, "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?," *MSWiM '16: 19th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Malta, 2016.

