

PERANCANGAN PERANGKAT KERAS PENGUKUR KETINGGIAN MUKA AIR BERBASIS *WIRELESS SENSOR NETWORK* MENGGUNAKAN PROTOKOL KOMUNIKASI ZIGBEE DAN GPRS (*GENERAL PACKET RADIO SERVICE*) DENGAN TOPOLOGI STAR

Hafidz Muslim^{*)}

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: muslim.hafidz92@gmail.com

Abstrak

Wireless Sensor Network (WSN) adalah jaringan nirkabel yang terdiri dari beberapa node berfungsi untuk melakukan pengukuran suatu besaran. Setiap Wireless Sensor Network memiliki Gateway yang berfungsi sebagai konsentrator dan menghubungkan dengan jaringan lain seperti internet. Pada penelitian ini, dirancang perangkat pengukuran ketinggian muka air berbasis WSN. Perangkat keras yang digunakan yaitu, mikrokontroler Atmega328P berbasis Arduino Uno dan Xbee Pro S2B yang merupakan modul komunikasi yang menggunakan protokol komunikasi Zigbee. Sensor yang digunakan adalah Sensor Ultrasonik SR04. Setiap end device dilengkapi RTC DS3231 dan baterai Li-Ion. Pada Coordinator ditambahkan modul komunikasi GSM dan GPRS berbasis SIM900. Topologi jaringan yang digunakan adalah star yang terdiri dari 2 End Device dan 1 Coordinator. Dari hasil pengujian, didapat nilai throughput maksimum 11,94 kbps, delay maksimum 69,04 ms, PDR 100% dan nilai RSSI sebesar -74 dBm untuk jarak 450 meter dalam kondisi LOS. Hasil pengujian untuk mengukur ketinggian muka air menggunakan perangkat yang dibuat menunjukkan selisih nilai 1-3cm dengan hasil dari pengukuran langsung. Dari hasil pengukuran tegangan dan arus didapat perangkat dapat bertahan selama 7 hari 15 jam dan 33 detik pada kondisi skema pengambilan data tiap 20 menit sekali.

Kata kunci : Wireless Sensor Network, Zigbee, Arduino Uno, Xbee Pro S2B, Water Level

Abstract

Wireless Sensor Network (WSN) is a wireless network consisting of multiple nodes to perform measurements. Each WSN has a Coordinator that serves as a concentrator and a device that connects to other networks such as the Internet. In this research will be designed water level measurement device based on the WSN. Hardware used for this device is ATmega328P microcontroller-based Arduino Uno and XBee Pro S2B, Sensors SR04 Ultrasonic Sensor, RTC DS3231 and Li-Ion battery. In Coordinator added GSM and GPRS communication module SIM900. This research will use star topology network where the network consists of 2 End Device and 1 Coordinator. From the test results, maximum throughput of 11.94 kbps, maximum delay of 69.04 ms, 100% PDR and RSSI value of -74 dBm for a distance of 450 meters in LOS condition, Results of testing to measure the water level using devices made shows the difference in value of 1-3cm with the results of direct measurements. From the results obtained voltage and current measurement device can last for 7 days 15 hours and 33 seconds on the conditions of data collection scheme every 20 minutes.

Keywords: Wireless Sensor Network, Zigbee, water level gauges, Arduino Uno, XBee Pro S2B

1. Pendahuluan

Banjir merupakan salah satu persoalan yang ada di hampir seluruh wilayah di Indonesia. Persoalan ini bahkan menjadi agenda tiap tahun yang belum terselesaikan. Banyak hal yang menyebabkan banjir dapat terjadi seperti, tingginya curah hujan yang terjadi, daerah resapan yang beralih fungsi hingga buruknya sistem drainase dan

tata kota. Dampak yang ditimbulkan dari bencana banjir ini tidaklah sedikit, Pemprov DKI Jakarta memperkirakan kerugian yang timbul akibat banjir di Jakarta pada tahun 2013 mencapai Rp 20 triliun^[1]. Berdasarkan permasalahan tersebut akan dirancang perangkat keras untuk mengukur ketinggian muka air berbasis *Wireless Sensor Network*. Implementasi dari perangkat tersebut dapat digunakan sebagai bagian dari

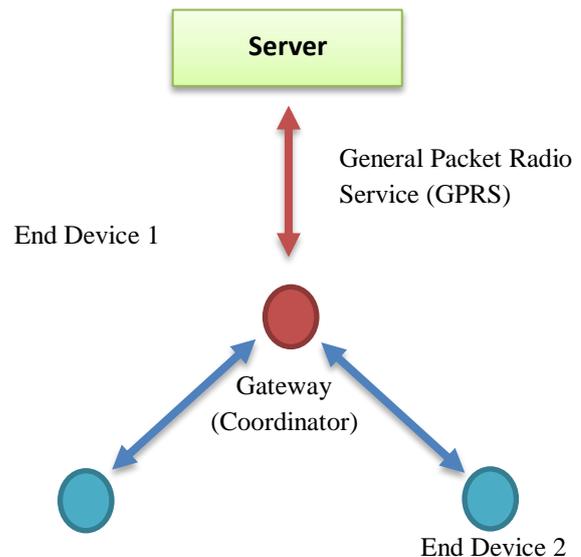
Sistem Monitoring Ketinggian Muka Air yang dapat diletakkan didaerah aliran sungai.

Pada penelitian sebelumnya^[2], telah dilakukan simulasi penggunaan *wireless sensor network* untuk penanggulangan banjir di India. Namun, pada penelitian tersebut pembahasan yang dilakukan terbatas pada topologi jaringan. Kemudian, penelitian lainnya^[3], telah dilakukan perancangan perangkat keras untuk melakukan *monitoring* pada sungai. Namun, pada penelitian tersebut belum dibahas mengenai performa dari komunikasi perangkat tersebut. Pada penelitian lainnya^[4], telah dilakukan evaluasi dari kinerja Xbee ZB. Namun, pada penelitian tersebut perangkat yang digunakan merupakan versi standar.

Berdasarkan hal tersebut, maka dirancang perangkat untuk mengukur ketinggian muka air berbasis *Wireless Sensor Network* ini menggunakan perangkat keras yaitu, mikrokontroler Atmega328P berbasis Arduino Uno dan Xbee Pro S2B merupakan modul komunikasi yang menggunakan protokol komunikasi Zigbee. Sensor yang digunakan adalah Sensor Ultrasonik SR04. Setiap *end device* dilengkapi dengan modul *Real Time Clock* (RTC) DS3231 dan baterai *Lithium Ion* sebagai sumber dayanya. Sedangkan untuk *coordinator*, perangkat yang digunakan sama dengan *end device* namun ditambahkan modul komunikasi GPRS dan GSM berbasis SIM900 yang digunakan untuk mengirim data hasil pengukuran ke server. Pada penelitian ini akan digunakan topologi jaringan *star* yang terdiri dari 2 *end device* dan 1 *coordinator*.

2. Metode

Perangkat keras pada sistem pengukur ketinggian muka air berbasis *wireless sensor network* ini secara umum dibagi menjadi dua bagian, yaitu *coordinator* dan *end device*. *Coordinator* berfungsi sebagai pusat dalam sistem jaringan dengan protokol zigbee serta sebagai *gateway* yang menghubungkan jaringan zigbee tersebut dengan jaringan internet menggunakan GPRS (*General Packet Radio Service*). *End device* memiliki fungsi sebagai perangkat untuk akuisisi data dengan kemampuan untuk menghemat daya dengan *sleep mode*. Topologi yang digunakan adalah topologi *star*.



Gambar 1 Topologi Jaringan

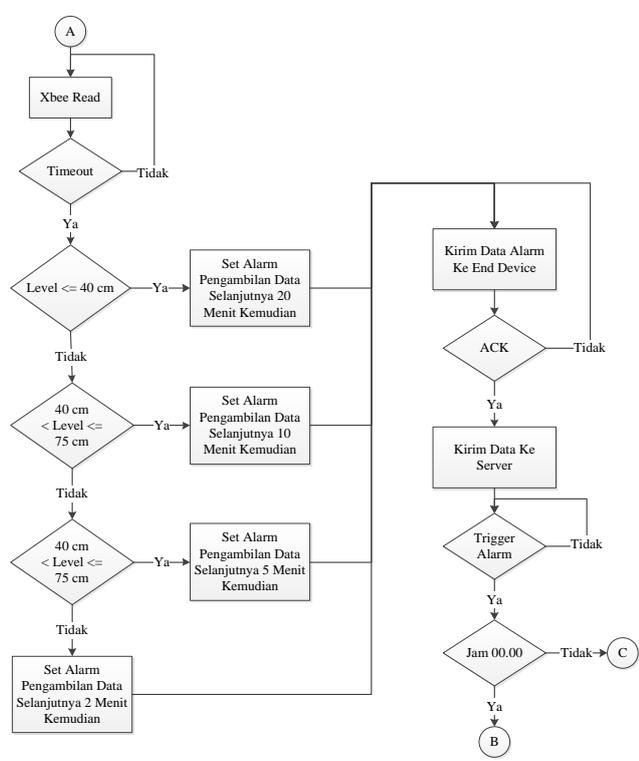
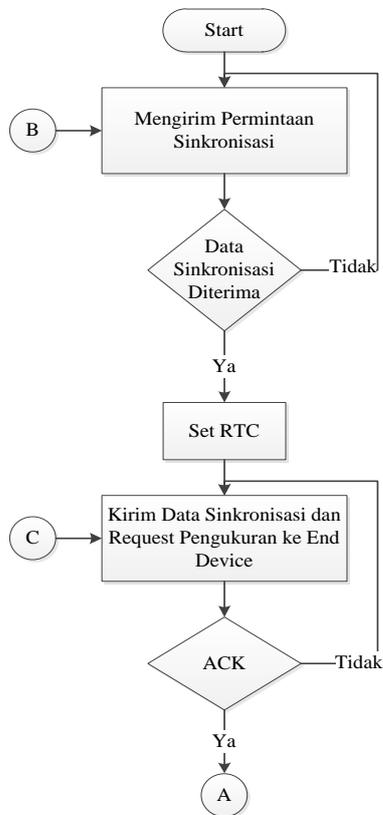
Sistem yang dibuat memiliki beberapa karakteristik, antara lain:

1. Mampu mengukur ketinggian muka air hingga 2 meter
2. Mampu melakukan mode penghematan daya untuk *end device*
3. Terdapat beberapa kondisi waktu pengukuran, yaitu:
 - a. Kondisi 1, ketinggian muka air 0 – 40 cm pengukuran dilakukan 20 menit sekali
 - b. Kondisi 2, ketinggian muka air 41 – 75 cm pengukuran dilakukan 10 menit sekali
 - c. Kondisi 3, ketinggian muka air 76 – 100 cm pengukuran dilakukan 5 menit sekali
 - d. Kondisi 4, ketinggian muka air lebih tinggi dari 100 cm pengukuran dilakukan 2 menit sekali

2.1 Perancangan *Coordinator*

Coordinator berfungsi sebagai konsentrator data dan pengatur alarm pengambilan data. Data dari semua *end device* akan dikirim menuju server oleh *coordinator*. Perangkat keras yang digunakan pada *coordinator* yaitu Arduino Uno, modul komunikasi Xbee Pro S2B, RTC DS3231 dan Modul GPRS.

Gambar 2 menunjukan diagram alir program pada coordinator:



Gambar 2 Diagram Alir Coordinator

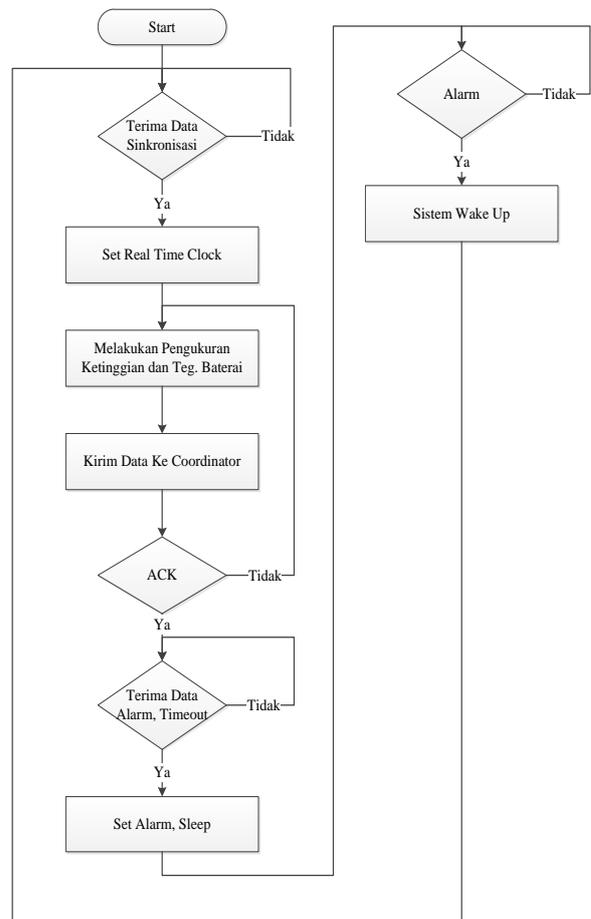
2.2 Perancangan End Device

End device memiliki fungsi sebagai perangkat yang melakukan fungsi *sensing* dan memiliki kemampuan untuk *sleep*. Perangkat keras yang digunakan pada coordinator yaitu ATmega328P, modul komunikasi Xbee Pro S2B, RTC DS3231 dan Sensor SR04.



Gambar 3 Perangkat Keras End Device

Gambar 4 menunjukan diagram alir program pada end device.



Gambar 4 Diagram Alir End Device

3. Hasil dan Analisa

Pada penelitian ini, pengujian dibagi menjadi 2 bagian, yaitu pengujian subsistem dan sistem secara keseluruhan. Pengujian subsistem dibagi menjadi pengujian sensor dan komunikasi radio. Sedangkan pengujian sistem secara keseluruhan meliputi pengukuran tegangan dan arus, skema pengambilan data dan implementasi langsung di sungai.

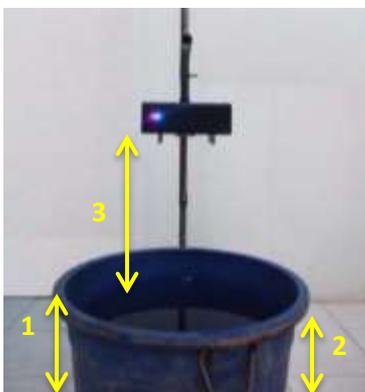
3.1. Pengujian Sensor SR04

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari sensor yang digunakan untuk mengukur ketinggian muka air. Gambar 5 menunjukkan gambar pengujian ketinggian muka air di laboratorium. Tiang yang digunakan dilengkapi dengan meteran sebagai data acuan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian ketinggian. Dari tabel tersebut dapat dilihat hasil pengukuran menunjukkan nilai yang cukup akurat. Selisih antara pengukuran langsung dan menggunakan perangkat yang dibuat ketika terjadi *error* sebesar +/- 1 cm. Pada pengujian di laboratorium suhu yang digunakan sebagai acuan adalah suhu ruangan sebesar 25°C.

Tabel 1 Pengujian Ketinggian

Ketinggian (cm)	Hasil Pengukuran (cm)
15	15
20	20
35	35
40	40
45	46
50	50
55	55
60	61
65	66
70	70



Keterangan gambar:
 1. Ketinggian Ember 40 cm
 2. Ketinggian Air 35 cm

3. Hasil Pengukuran (Jarak Sensor dan Air)

Gambar 5 Pengujian di Laboratorium



Gambar 6 Meteran Pada Tiang

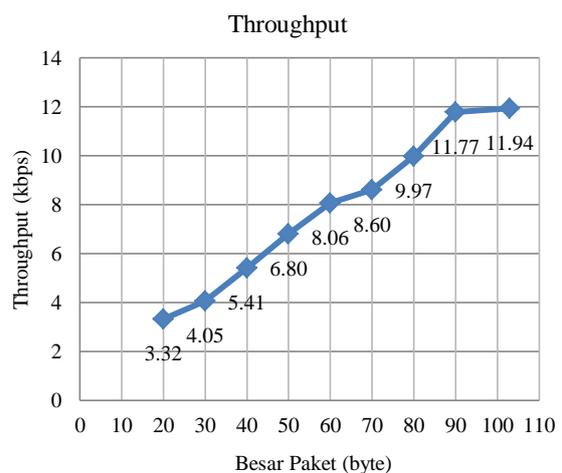
3.2. Pengujian Komunikasi Radio

3.2.1 Throughput

Pengujian *throughput* dilakukan dengan mengirimkan data dari *coordinator* menuju *end device* dengan besar paket yang divariasikan dari minimal *payload* sebesar 20 byte hingga maksimal *payload* sebesar 103 byte.

Dari

Gambar 7 dapat dilihat bahwa besar *throughput* terendah terjadi pada pengiriman paket dengan besar 20 byte yaitu sebesar 3,32 kbps sedangkan *throughput* tertinggi terjadi pada pengiriman paket dengan besar 103 byte yaitu sebesar 11,94 kbps. Grafik diatas juga menunjukkan semakin besar paket data yang dikirim maka semakin besar pula *throughput* nya.



Gambar 7 Grafik Pengujian Throughput

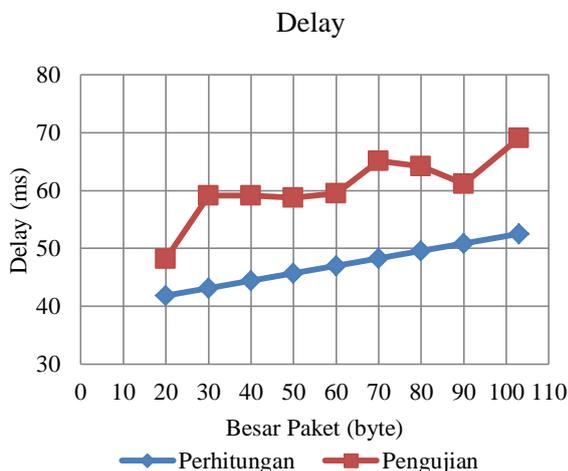
3.2.2. Delay

Seperti pada pengujian *throughput*, pengujian *delay* dilakukan dengan mengirimkan paket dari *coordinator* menuju *end device* dengan variasi besar paket. Untuk menghitung *delay* digunakan persamaan 3.

Tabel 2 Data Perbandingan Hasil Perhitungan dan Pengujian Delay

No	Besar Paket (byte)	Perhitungan Delay (ms)	Rata-rata Pengujian Delay (ms)
1	20	41,86	48,22
2	30	43,14	59,19
3	40	44,42	59,19
4	50	45,7	58,81
5	60	46,98	59,54
6	70	48,26	65,12
7	80	49,54	64,19
8	90	50,82	61,18
9	103	52,484	69,04

Tabel 2 menunjukkan data hasil dari perhitungan dan pengujian untuk parameter kerja *delay*. *Delay* minium terjadi pada variasi besar paket sebesar 20 byte yaitu sebesar 55,62 ms dan *delay* maksimum terjadi pada variasi besar paket 103 byte sebesar 67,5 ms. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai *delay* pada pengujian lebih besar dari perhitungan. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa faktor dalam perhitungan *delay* yang tidak dimasukkan seperti *delay* antrian dan *delay* proses pada perangkat tersebut.



Gambar 8 Grafik Perbandingan Hasil Perhitungan dan Pengujian Delay

3.2.3. Packet Delivery Ratio

Packet Delivery Ratio (PDR) adalah rasio keberhasilan dalam pengiriman paket. Pada pengujian ini dilakukan pengiriman paket sebanyak 100 paket dengan besar paket yang divariasikan dari minimal *payload* sebesar 20 byte sampai maksimal *payload* sebesar 103 byte.

Tabel 3 Data Hasil Pengujian Packet Delivery Ratio (PDR)

No	Packet Size (byte)	Packet Delivery Ratio (%)
1	20	100
2	30	100
3	40	100
4	50	100
5	60	100
6	70	100
7	80	100
8	90	100
9	103	100

Tabel 3 menunjukkan data hasil pengujian *packet delivery ratio*. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa semua variasi menunjukkan nilai PDR 100%. Hal ini menunjukkan sistem komunikasi radio ini sudah cukup baik. Nilai 100% pada seluruh variasi pengujian didapatkan karena pengujian dilakukan pada rentang pengiriman besar paket maksimum sesuai *datasheet* dan pada kondisi daya yang diterima diatas *receive sensitivity* perangkat.

3.2.4. RSSI

Receive Signal Strength Indicator merupakan nilai yang menunjukkan kuat signal yang diterima pada *receiver*. RSSI memiliki satuan -dBm. Pada Xbee Pro S2B, nilai RSSI dari paket terakhir yang diterima dapat diketahui dengan mengirimkan AT Command. Pada Penelitian ini, pengujian RSSI dilakukan pada kondisi *Line Of Sight* (LOS) dengan jarak bervariasi mulai dari 100m sampai 500m. Tinggi antena penerima dan pengirim yang digunakan pada pengujian ini adalah 2 m.

Pengujian dilakukan didepan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Diponegoro seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Kondisi lokasi pengujian merupakan jalan beraspal lurus dengan pohon disebelah kanan-kirinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.



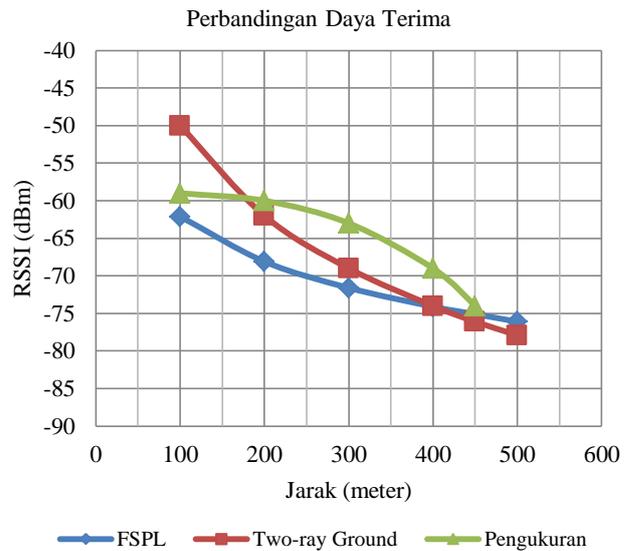
Gambar 9 Lokasi Pengujian (<https://www.google.com/maps>, 2015)



Gambar 10 Kondisi Lokasi Pengujian

Dengan persamaan 5, 6 dan 7 dapat dihitung nilai path loss masing-masing model sehingga didapat nilai daya yang diterima. Berikut tabel perbandingan antara nilai hasil perhitungan dan pengukuran.

Gambar 11 menunjukkan grafik perbandingan nilai daya yang diterima antara perhitungan dan pengukuran. Dari grafik diatas diketahui nilai daya yang diterima terbesar berada pada jarak 100 meter dengan nilai hasil perhitungan Model FSPL sebesar -62,1 dBm, Model *Two-ray Ground* sebesar -50 dBm dan nilai hasil pengukuran sebesar -59 dBm. Nilai daya yang diterima terkecil berada pada jarak 500 meter dengan nilai -76,1 dBm untuk model FSPL dan -77,9 dBm untuk model *Two-ray Ground*. Sedangkan untuk hasil pengukuran tidak dapat diukur nilainya karena pada jarak tersebut perangkat sudah tidak dapat berkomunikasi. Pada jarak 500 meter perangkat tidak dapat berkomunikasi karena pada jarak tersebut kondisi jalan agak sedikit menurun sehingga mempengaruhi tinggi antena.



Gambar 11 Grafik Perbandingan Nilai RSSI
Tabel 4 Data Perbandingan Nilai RSSI

No	Jarak (meter)	Model FSPL (dBm)	Model 2-ray Ground (dBm)	Pengukuran (dBm)
1	100	-62.1	-50	-59
2	200	-68.1	-62	-60
3	300	-71.6	-69	-63
4	400	-74.1	-74	-69
5	450	-75.1	-76.1	-74
6	500	-76.1	-77.9	0

Dari grafik diatas dapat dilihat terdapat beberapa nilai RSSI hasil pengukuran yang lebih besar dari pada hasil perhitungan. Sinyal yang diterima pada komunikasi radio sering kali melebihi dari hasil prediksi dengan model pemantulan maupun difraksi. Hal ini dikarenakan adanya penyebaran sinyal tersebut. (Rappaport, 1998, hal. 100)^[4]. Objek seperti pohon dan lampu jalan yang ada pada lokasi pengujian memungkinkan terjadinya penyebaran tersebut sehingga terdapat selisih antara nilai hasil perhitungan dan pengukuran. Selain itu, nilai penguatan antena tidak dimasukkan dalam perhitungan karena pada *datasheet* perangkat yang digunakan tidak tertera nilai penguatan antena.

3.3. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja dari sistem secara keseluruhan. Pengujian dilakukan di 2 tempat yaitu laboratorium dan sungai. Pada laboratorium dilakukan pengujian skema pengambilan data dari sistem dan pengukuran tegangan dan arus. Pada sungai dilakukan pengujian implementasi dari perangkat sesuai keadaan sebenarnya. Pada pengujian di sungai, dilakukan pengukuran muka air sungai secara langsung dan pengukuran tegangan baterai menggunakan *analog to digital converter* mikrokontroler yang digunakan.

3.3.1. Pengujian Skema Pengambilan Data

Tabel 5 Pengujian Skema Pengambilan Data

No	End Device A (cm)	End Device B (cm)	Pengambilan Data	Alarm Sistem	Hasil Pengujian
1	18	20	01.50	02.00	02.00
2	18	50	02.10	02.10	02.10
3	18	70	02.20	02.20	02.20
4	18	80	02.25	02.25	02.25
5	20	110	02.27	02.27	02.27
6	20	0	02.40	02.40	02.40
7	24	21	03.00	03.00	03.00
8	50	20	03.10	03.10	03.10
9	80	20	03.15	03.15	03.15
10	110	20	03.17	03.17	03.17

Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian skema pengambilan data. Pengujian dimulai pada pukul 01.50, pengujian pertama kondisi kedua *end device* dibuat pada kondisi 1. Pada kondisi 1, waktu pengambilan data setiap 20 menit sekali dan dilakukan sesuai kelipatan 20 sehingga pada pengujian nomor 1 alarm sistem menunjukkan pukul 02.00 bukan 02.10. Pengukuran mengacu pada waktu kelipatan digunakan pada kondisi 1 dan 2. Untuk kondisi 3 dan 4 digunakan waktu pengambilan data selanjutnya adalah waktu saat ini ditambah 5 atau 2 menit sesuai kondisi tersebut.

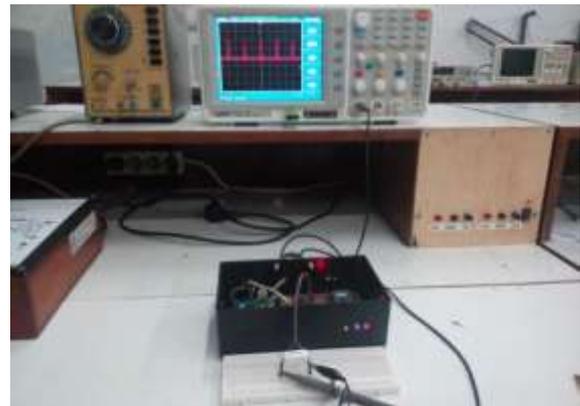
Alarm sistem ditentukan oleh *coordinator* mengacu kepada nilai tertinggi dari *end device*. Dari tabel dapat dilihat waktu pengambilan data telah sesuai dengan waktu alarm sistem yang seharusnya.

3.3.2. Pengukuran Tegangan dan Arus

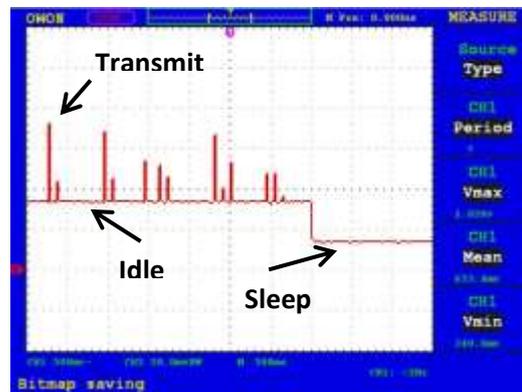
Pengukuran tegangan dan arus yang mengalir pada perangkat dilakukan dengan menggunakan osiloskop seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12. Perangkat dihubungkan seri dengan sebuah resistor dengan besar hambatan sebesar 1 ohm lalu diukur tegangan pada resistor tersebut.

$$V = I \times R \tag{7}$$

Dengan persamaan 7 maka didapat arus yang mengalir pada perangkat tersebut.



Gambar 12 Pengukuran Tegangan dan Arus



Gambar 13 Hasil Pengukuran Tegangan

Tabel 6 Data Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus

Transmit		
Tegangan (mV)	Arus (mA)	Waktu (ms)
83,6	83,6	2 ms
Idle		
37,2	37,2	98 ms
Sleep		
15,6	15,6	

Dengan menghitung waktu dari masing kondisi dan arus yang mengalir pada perangkat, maka dapat dihitung estimasi daya tahan baterai.

Tabel 7 Hasil Perhitungan Estimasi Waktu Hidup Baterai

No	Skema Pengambilan Data	Estimasi Waktu Hidup Baterai
1	Kondisi 1	8 Hari 3 Jam 47 Detik
2	Kondisi 2	7 Hari 19 Jam 10 Detik
3	Kondisi 3	7 Hari 2 Jam 2 Detik
4	Kondisi 4	5 Hari 18 Jam 22 Detik

3.3.3. Pengujian Langsung di Sungai

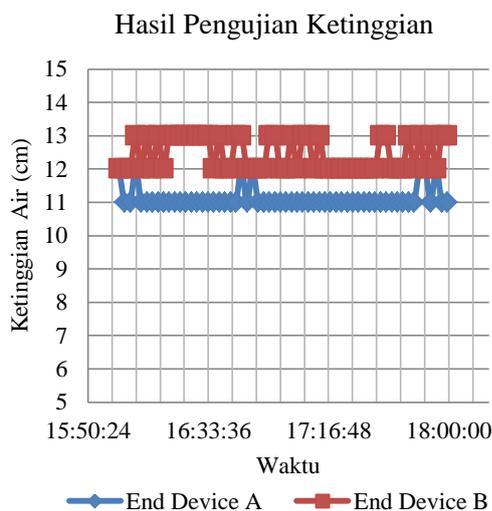
Pengujian langsung pada sungai dilakukan didaerah Universitas Diponegoro seperti yang ditunjukkan Gambar 14.



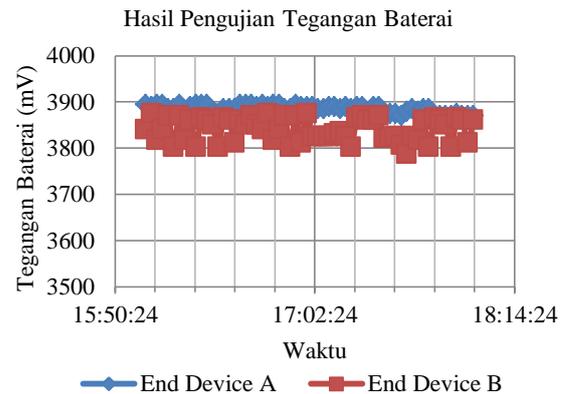
Gambar 14 Lokasi Pengujian Perangkat
(<https://www.google.com/maps>, 2015)



Gambar 15 Lokasi Peletakan End Device A



Gambar 16 Grafik Pengujian Ketinggian



Gambar 17 Grafik Pengukuran Tegangan Baterai

Gambar 16 menunjukkan grafik hasil pengujian *End Device*. Dari grafik dapat dilihat nilai pada *End Device A* cenderung lebih stabil dibandingkan dengan *End Device B*. Namun perubahan yang terjadi pada *End Device B* dapat dikatakan juga cukup stabil. Selisih yang terjadi antara hasil pengukuran langsung dengan hasil pengukuran menggunakan perangkat yang dibuat sekitar 2 – 3 cm. Hal ini dikarenakan pengaruh suhu pada saat pengujian dilakukan.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan perangkat yang dibuat telah mampu melakukan pengukuran ketinggian muka air dengan cukup baik. Komunikasi radio antar perangkat juga memiliki kinerja yang baik. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengembangan dengan menggunakan jumlah node yang lebih banyak serta melakukan pengujian parameter QoS yang lain.

Referensi

Journal:

- [1]. Muslimah, Salmah. 2013. *Kerugian Akibat Banjir Jakarta Rp 20 Triliun*. (<http://news.detik.com/read/2013/01/22/182253/2149936/10/jokowi-kerugian-akibat-banjir-jakarta-rp-20-triliun>). September 2014.
- [2]. Mukherjee, Mayumi. 2013. *Early Warning System Deploying Wireless Sensor Network For Flood Management*. *International Journal of Innovative Technology & Adaptive Management (IJITAM)*. ISSN: 2347-3622, Volume-1, Issue-3.
- [3]. Sunkpho, Jirapon. Chaiwat O. 2011. *Real-time Flood Monitoring and Warning System*. *Sonklanakarin Journal of Science And Technology*.
- [4]. Piyare, Rajeev. Seong-ro L. *Performance Analysis of XBee ZB Module Based Wireless Sensor Networks*. *International Journal of Scientific & Engineering*

Research. ISSN 2229-5518 Volume 4, Issue 4, April-2013.

- [5]. Udo, Edward N, Etebong B. Isong. 2013. Flood Monitoring and Detection System using Wireless Sensor Network. Asian Journal of Computer and Information Systems.
- [6]. Sohraby, Kazem. Daniel M. Taieb Z. 2007. Wireless Sensor Network : Technology, Protocols and Applications. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.

Datasheet:

- [7]. Digi International. 2014. XBee/XBee-PRO ZB RF Modules Datasheet. Digi International Inc, Minnetonka.
- [8]. “_____”, Calculation of the Speed of Sound in Air and the effective Temperature. (<http://www.sengpielaudio.com/calculator-speedsound.htm>). Juni 2015.
- [9]. Itead Studio. 2010. Ultrasonic Ranging Module: HC-SR04 Datasheet. Itead Studio.
- [10]. Arduino.cc. 2014. Arduino Uno. (<http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>). September 2014.
- [11]. Maxim Integrated. 2013. DS3231 Datasheet. Maxim Integrated Inc, California.

Texbooks:

- [12]. Rappaport, Theodore S. 1998. Wireless Communications Principles & Practice. 2nd Ed., Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- [13]. Seybold, John S. 2005. Introduction to RF Propagation. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.
- [14]. Firdaus. 2014. Wireless Sensor Network Teori dan Aplikasi. Graha Ilmu, Jakarta.
- [15]. Faludi, Robert. 2011. Bulding Wireless Sensor Network: A Practical Guide To The Zigbee Mesh Networking Protocol. O'Reilly Media, California.

Standards

- [16]. IEEE. 2011. IEEE Std 802.15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPANs). IEEE, New York.
- [17]. PRISM. 2015. IEEE 802.15.4 CSMA-CA Protocol (ZigBee). (<http://www.prismmodelchecker.org/casestudies/zigbee.php#protocol>). 1 Juni 2015.