

PEREKAYASAAN PERANGKAT PEMANTAU RADIASI LINGKUNGAN INSTALASI NUKLIR

Istofa, Leli Yuniarsari, I Putu Susila
PRFN-BATAN, Kawasan Puspiptek Gd 71, Tangerang Selatan - 15310

ABSTRAK

PEREKAYASAAN PERANGKAT PEMANTAU RADIASI LINGKUNGAN INSTALASI NUKLIR. Dalam suatu kawasan instalasi nuklir, bahan radioaktif seperti sejumlah kecil limbah gas dan partikulat yang mengandung radioaktif dapat terlepas dari setiap fasilitas melalui cerobong ke udara. Pelepasan bahan radioaktif akan meningkatkan risiko paparan radiasi di lingkungan. Untuk memantau paparan radiasi lingkungan dan untuk membangun sistem peringatan dini, sistem pemantauan radiasi dan cuaca yang berkelanjutan sangat diperlukan. Pada kegiatan ini telah dilakukan Perekayasaan Perangkat Pemantau Radiasi Lingkungan Instalasi Nuklir. Sistem utama terdiri dari Sistem Monitor Radiasi Gamma dan Sistem Pemantau Cuaca. Radiasi gross gamma diukur menggunakan detektor GM dan NaI(Tl), sedangkan untuk cuaca yang dipantau berupa arah dan kecepatan angin, temperatur udara, kelembaban relatif dan curah hujan. Prototip perangkat sudah dibuat dan dilakukan uji fungsi. Hasil pengujian pembangkit tegangan tinggi, pengolah sinyal radiasi, timer dan counter, ADC, serta modul komunikasi menunjukkan bahwa perangkat dapat berfungsi sesuai persyaratan. Berdasarkan hasil uji perbandingan dengan perangkat monitoring radiasi komersial, diperoleh hasil bahwa prototip yang dibuat mempunyai kinerja yang sebanding. Pengujian sensor cuaca juga menghasilkan unjuk kerja yang sesuai. Untuk selanjutnya, terhadap perangkat yang dikembangkan perlu dilakukan kalibrasi di laboratorium yang terakreditasi dan untuk selanjutnya data akan dikembangkan untuk dapat ditampilkan secara online di web.

Kata Kunci : Perekayasaan, Pemantauan Radiasi, Lingkungan, Instalasi Nuklir

ABSTRACT

AN ENGINEERING DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTAL RADIATION MONITORING EQUIPMENT FOR NUCLEAR INSTALLATION. In a nuclear installation area, such small amount of radioactive material and waste gases containing radioactive particulates could be released from each facility through the chimney into the air. The radioactive release will increase the risk of radiation exposure in the environment. To monitor environmental radiation exposure and to establish early warning systems, weather and continuous radiation monitoring systems are needed. Engineering development of Environmental Radiation Monitoring Equipment for Nuclear Installations has been constructed in this activity. The main system consists of Gamma Radiation Monitor System and Weather Monitoring System. Gross gamma radiation is measured using a GM detector and NaI (Tl), while the weather such as wind speed, direction, air temperature, relative humidity and rainfall are also monitored. A prototype of device has been created and the functions have also been tested. The results of high voltage generator testing showed that the radiation signal processing, timers and counters, ADC, and the communication module indicate that these devices are working properly. The constructed prototype obtained a good performance comparing to the commercial one. The testing on weather sensors devices also shows a good performance. Henceforth, these devices need to be calibrated using an accredited laboratory calibrator and furthermore the data will be developed to be displayed and accessed online on the web.

Keywords : Engineering, Radiation Monitoring, Environmental , Nuclear Installation

1. PENDAHULUAN

Setiap pengoperasian reaktor nuklir diwajibkan untuk melakukan pemantauan keselamatan radiasi dan radioaktivitas lingkungan sebagai salah satu upaya untuk mendeteksi secara dini dan mengendalikan dampak radiologi pengoperasian reaktor nuklir terhadap masyarakat dan kualitas lingkungan hidup. Pemantauan lingkungan dilakukan baik di dalam maupun di luar instalasi yang kemungkinan dapat terkena paparan radiasi. Program pemantauan meliputi pengukuran radiasi secara langsung dan pemantauan konsentrasi aktivitas radionuklida dalam sampel lingkungan di sekitar instalasi^[1].

Pada umumnya instalasi nuklir terdiri dari beberapa komponen yaitu: reaktor nuklir, fasilitas yang digunakan untuk pemurnian, konversi, pengayaan bahan bakar nuklir dan/atau pengolahan ulang bakar nuklir bekas dan fasilitas yang digunakan untuk menyimpan bahan bakar nuklir dan bahan bakar nuklir bekas. Fasilitas pendukung antara lain: pengelolaan limbah dan laboratorium-laboratorium penelitian. Instalasi nuklir dan fasilitas pendukungnya mempunyai potensi untuk mengakibatkan kontaminasi/pencemaran terhadap lingkungan apabila tidak dikendalikan dengan baik. Reaktor nuklir pada kondisi normal seharusnya tidak mengeluarkan produk fisi yang dihasilkan, akan tetapi pada kenyataannya terdapat produksi fisi dapat dilepaskan selama poses aliran air pendingin dan kebocoran berhingga dari fluida atau uap air terkontaminasi. Produksi fisi yang paling mungkin dilepaskan ke lingkungan adalah I-131, Sr-90 dan Cs-137. Fasilitas pengelolaan limbah dan laboratorium penelitian beresiko memberikan dampak terhadap lingkungan melalui kontaminasi terhadap komponen lingkungan hidup apabila tidak dikendalikan dengan baik. Pada Fasilitas tersebut tentunya terdapat bahan-bahan padat, cair dan *airborne* yang bersifat radioaktif dengan berbagai karakteristik^[2,3].

Indonesia memiliki tiga Instalasi Nuklir beserta fasilitas pendukung yang terletak di Yogyakarta, Bandung dan Serpong. Mengingat statusnya sebagai teknologi beresiko tinggi, maka proteksi terhadap lingkungan merupakan unsur penting dalam tinjauan keselamatan instalasi tersebut. Masing-masing instalasi sudah memiliki sistem pemantau yang berdiri sendiri. Untuk Kawasan Nuklir Serpong bahkan sudah *real time* dan *online* di web Batan.

BATAN sudah memiliki perangkat pemantau radiasi lingkungan Kawasan Nuklir Serpong (KNS) yang saat ini dikelola oleh Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir (PPIKSN). Sistem ini memantau secara *real time* dan langsung ditampilkan dalam situs <http://www.batan.go.id/> dengan IP <http://183.91.85.130:1169/radmon/> atau <http://192.168.16.9/radmon/>. Kegiatan ini akan mengembangkan Sistem Perangkat yang berdiri sendiri tidak mengganggu pelayanan pemantauan yang dilakukan oleh PPIKSN. Sistem pengambilan data dari sensor menyesuaikan dengan spesifikasinya. Data yang didapat diolah menjadi standar melalui media kabel *RS232*, *USB*, *ZigBee*, atau *WiFi* ke *Active Gateway*. Data yang sudah dibuat standar melalui modul *TCP/IP* dapat langsung ke jaringan tanpa melalui *Active Gateway*. Server akan mengambil data dari *TCP/IP Connection* dan menampilkannya di situs yang dibuat. Sistem ini diharapkan dapat memenuhi kekurangan yang ada dan mengembangkannya sesuai perkembangan teknologi. Dengan sistem ini diharapkan tidak ada lagi kendala keterbatasan tempat dan waktu dalam proses pemantauan radiasi lingkungan di seluruh Indonesia.

2. TATA KERJA

Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN) telah mengembangkan Perangkat Pemantau Radiasi Lingkungan Instalasi Nuklir. Sistem utama terdiri dari Sistem Monitor Radiasi Gamma dan Sistem Pemantau Cuaca. Parameter meteorologi yang dipantau

berupa arah dan kecepatan angin, suhu udara, kelembaban relatif, tekanan udara, radiasi matahari dan curah hujan.

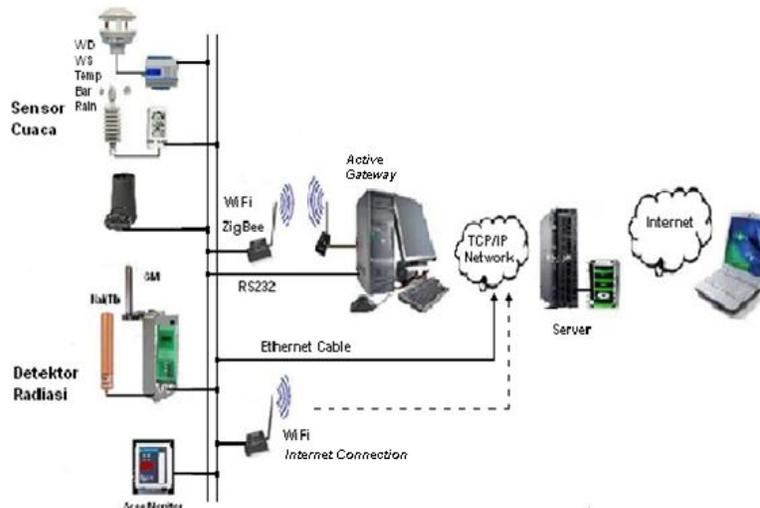
Metode yang ditempuh dalam kegiatan ini meliputi perancangan, pembuatan dan pengujian prototip perangkat pemantau radiasi lingkungan instalasi nuklir. Perancangan dan pembuatan modul dilakukan mengikuti kaidah baku kerekeyasaan yang meliputi pembuatan desain dasar, desain rinci, konstruksi, dan pengujian.

Sistem Monitor Radiasi Gamma dirancang menggunakan detektor yang peka terhadap aktivitas rendah untuk kondisi normal dan detektor yang handal menangkap radiasi aktivitas tinggi untuk kondisi adanya kasus kecelakaan radiasi. Sistem Pemantau Cuaca dirancang menggunakan peralatan dan sensor yang dapat memberikan data meteorologi yang diperlukan. Data yang didapat diolah menjadi standar melalui media kabel *RS232*, *ZigBee*, atau *WiFi* ke *Active Gateway*. Data yang sudah dibuat standar melalui modul *TCP/IP* dapat langsung ke jaringan tanpa melalui *Active Gateway*^[4]. Server akan mengambil data dari *TCP/IP Connection* dan menampilkannya di situs yang dibuat. Hasil pemantauan ditampilkan secara *online* dalam web sehingga bisa dipantau dari jaringan internet di seluruh dunia.

Sistem yang dirancang terdiri dari dua kelompok sensor (Gambar 1), yaitu :

- Detektor radiasi gamma. Data dari sensor/detektor akan dikirim melalui bermacam standar media komunikasi
 - Detektor GM *outdoor* Ludlum model 133-2-1
 - Detektor NaI(Tl) Ludlum model 44-2
 - Area Monitor Ludlum model 375
- Sensor cuaca (meteorologi)
 - Pengukur arah dan kecepatan angin, curah hujan, temperatur dan kelembaban udara

Masing-masing sensor atau detektor memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga memerlukan modul pengolah data yang berbeda. Keluaran dari sensor dapat berupa sinyal analog atau digital, bahkan ada yang sudah mengikuti standar serial *RS232* atau standar *Ethernet LAN*. Data awal yang didapat diolah menjadi standar melalui media kabel *RS232*, *ZigBee*, *USB* atau *WiFi* ke *Active Gateway*. Data yang sudah sesuai standar melalui modul *TCP/IP* dapat langsung dikoneksikan ke jaringan tanpa melalui *Active Gateway*. Sensor/detektor yang posisinya jauh dari stasiun pemantau dapat menggunakan model remote *DAQ*. Server akan menerima data dari *TCP/IP Connection* dan menampilkannya di situs yang dibuat. Gambar 1 menunjukkan Desain Arsitektural Perangkat Pemantau Radiasi Lingkungan Instalasi Nuklir yang dibuat^[5].



Gambar 1. Desain Arsitektural Perangkat Pemantau Radiasi Lingkungan Instalasi Nuklir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Sistem Deteksi Radiasi

Sistem deteksi radiasi yang digunakan terdiri dari :

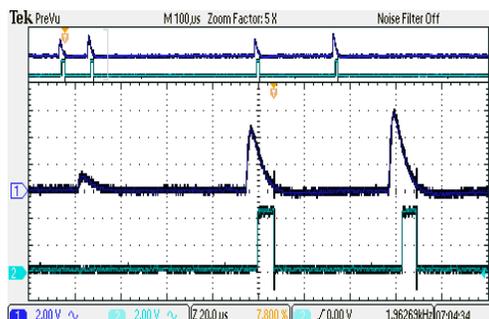
- o Detektor GM *outdoor* Ludlum model 133-2-1 menggunakan *amplifier* dan Sumber Tegangan Tinggi tersendiri. Output *amplifier* dihubungkan ke mikrokontroler Arduino untuk dicacah. Media komunikasi menggunakan kabel *USB*.
- o Detektor *Nal(Tl)* Ludlum model 44-2 menggunakan *preamplifier* dan Sumber Tegangan Tinggi tersendiri. Output *amplifier* dihubungkan ke mikrokontroler Arduino untuk dicacah. Media komunikasi menggunakan *Ethernet LAN*.
- o Area Monitor Ludlum model 375. Data langsung dapat dibaca. Komunikasi melalui *RS232*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan sumber standar Cs-137 dan simulasi menggunakan *function generator* (Gambar 2). Hasil pengujian *amplifier* dan *SCA* yang merupakan bagian dari pengolah sinyal radiasi ditunjukkan pada Gambar 3. Dari Gambar 3a terlihat sinyal radiasi keluaran *amplifier* (atas) beserta sinyal *TTL* keluaran *SCA* (bawah) yang berbentuk kotak, dimana sumbu x menunjukkan waktu (detik) dan sumbu y menunjukkan tegangan (volt). Pada pengujian ini, tegangan yang diberikan ke detektor sebesar 800V. Keluaran dari pembangkit tegangan tinggi juga diukur dengan *oscilloscope*, dimana dari hasil pengukuran diperoleh variasi dari tegangan tinggi sebesar 800 mV. Nilai variasi yang kecil tersebut (0,1 %), menunjukkan bahwa rangkaian pembangkit tegangan tinggi sangat stabil sehingga layak digunakan pada perangkat pemantau radiasi yang dikembangkan^[6].

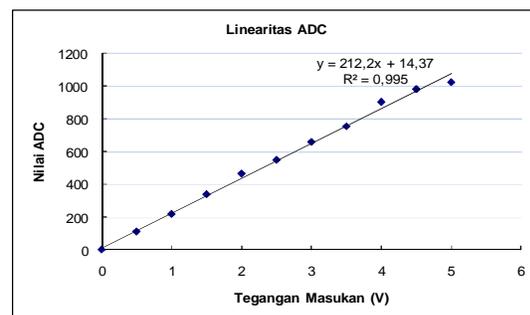


Gambar 2. Detektor Radiasi dan Peralatan Pengujian

Hasil pengujian linearitas *ADC* pada board mikrokontroler ditunjukkan pada Gambar 3b. Sumbu X merupakan nilai tegangan masukan dalam V, sedangkan sumbu Y merupakan nilai konversi digital dari sinyal masukan. Dari segi linearitas, pada masukan dengan tegangan mendekati maksimum (sekitar 4V), terlihat hasil konversi kurang linear, akan tetapi secara keseluruhan linearitasnya cukup baik.



(a)

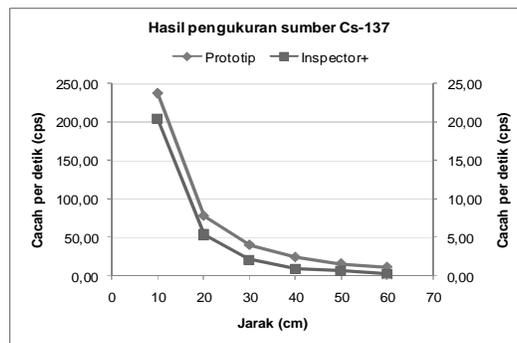


(b)

Gambar 3. Hasil Pengujian Pre Amp (a) dan Grafik Linearitas ADC Mikrokontroler (b)

Pengujian selanjutnya adalah pengujian bagian pendeteksi radiasi. Pada pengujian ini, hasil dari prototip dengan detektor *NaI(Tl)* dibandingkan dengan hasil dari surveimeter Inspector+ yang menggunakan detektor GM. Gambar 4 merupakan grafik perbandingan hasil dari masing-masing perangkat. Sumbu X merupakan jarak antara detektor dengan sumber radiasi Cs-137, sumbu Y menunjukkan nilai cacah per detik (cps). Hasil pengukuran prototip maupun surveimeter terukur dalam satuan cps.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4, terlihat bahwa semakin jauh sumber radiasi, maka radiasinya semakin menurun. Selanjutnya, jika dilihat dari perbandingan nilai pada tiap-tiap jarak, nilainya menunjukkan kecenderungan yang sama, sehingga dapat disimpulkan bahwa kinerja dari prototip yang dikembangkan hampir sama dengan kinerja dari dua perangkat komersial lainnya.

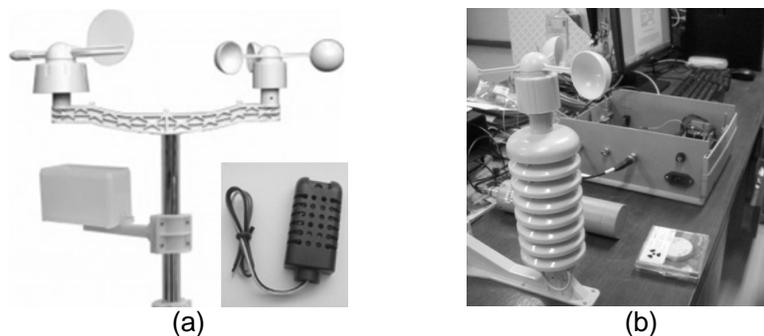


Gambar 4. Komparasi Hasil Pengukuran Radiasi Prototip dengan Surveymeter Inspector+

B. Hasil Pengujian Sistem Deteksi Cuaca

Sistem deteksi cuaca yang digunakan terdiri dari :

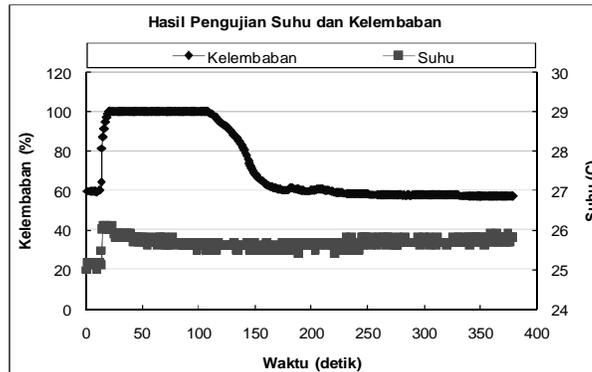
- *weather sensor assembly p/n 80422* untuk mengukur arah angin, kecepatan angin dan curah hujan
- sensor suhu dan kelembaban udara DHT21 (AM2301)



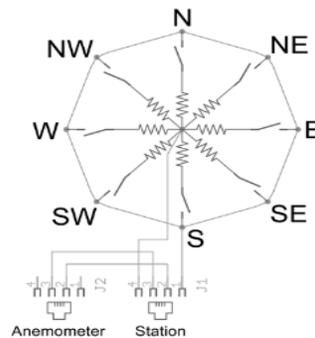
Gambar 5. (a) Sensor Cuaca dan (b) Perangkat Pengujian

Gambar 5 menunjukkan sensor radiasi cuaca, sensor DHT21 dan foto perangkat pengujian yang dilakukan. Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian terhadap bagian sensor kelembaban maupun suhu (DHT-21). Pengujian dilakukan di ruangan laboratorium dengan fasilitas *air conditioner* (AC) terpusat. Sumbu X adalah waktu pengukuran dalam detik, sumbu Y1 menunjukkan nilai kelembaban relatif (%), sedangkan sumbu Y2 menunjukkan nilai suhu dalam derajat celcius. Dari grafik terlihat bahwa kelembaban pada ruangan sebesar 60%, sedangkan suhu ruangan sebesar 25,2°C. Ketika sensor ditiup (detik ke-15), terlihat peningkatan kelembaban sampai mencapai nilai 100% dan suhu mencapai nilai 26,1°C. Hal ini disebabkan oleh adanya kandungan uap air dalam

nafas dan suhunya pun lebih tinggi dari suhu ruangan. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor kelembaban dan suhu bekerja dengan baik.



Gambar 6. Grafik Hasil Pengukuran Suhu dan Kelembaban Udara



Gambar 7. Rangkaian Sensor Arah Angin^[7].

Gambar 7 menunjukkan rangkaian resistor yang ada dalam sensor arah angin. Untuk pengukuran arah angin, sensor berbentuk baling-baling, di dalam rangkaianannya terdapat 8 saklar yang masing-masing terhubung ke resistor yang berbeda nilai tahanannya^[7]. Dalam kondisi arah angin tertentu, baling-baling ini akan menutup dua saklar sekaligus, sehingga dari 8 nilai resistor yang ada dapat menghasilkan 16 nilai resistor yang berbeda, dimana ke-16 resistor ini membentuk pembagi tegangan menghasilkan tegangan output yang dapat diukur, nilai tegangan output inilah yang akan diinterpretasikan menjadi arah angin.

Hasil pengukuran arah angin ditunjukkan pada Tabel 1. Dari hasil pengukuran dan *data sheet* dari alat penentu arah angin ini, besarnya tegangan hampir mendekati dengan yang ada di *data sheet*. Dari *data sheet* hanya muncul satu nilai tegangan sedangkan dari hasil pengukuran nilai tegangan ada dalam range tertentu, contoh untuk arah utara nilai tegangan ada diantara 3.827 - 3.840 artinya arah utara sudut yang ditunjukkan 0° - 22.5°, jadi jika dalam posisi diantara sudut tersebut masih dikategorikan arah utara. Untuk menghitung presentasi hasil pengukuran dan *data sheet* diambil dari nilai yang terjauh maka hasil pengukuran rata-rata 98 % sama dengan *datasheet*.

Tabel 1. Hasil Pengujian Pengukuran Arah Angin

No	Besaran Derajat	Arah Angin	Tegangan <i>Data sheet</i>	Tegangan Terukur (Volt)	Selisih
1	0 ^o atau 360 ^o	North	3.84	3.827 - 3.840	0.013 - 0
2	022.5 ^o	North Northeast	1.98	1.96 - 1,980	0.002 - 0
3	45 ^o	Northeast	2.25	2.243 - 2.248	0.007 - 0.002
4	67.5 ^o	East Northeast	0.41	0.391 - 0.420	0.019 - 0.01
5	90 ^o	East	0.45	0.435 - 0.450	0.015 - 0

6	112.5 ⁰	East Southeast	0.32	0.303 - 0.330	0.019 - 0.01
7	135 ⁰	Southeast	0.90	0.885 - 0.900	0.015 - 0
8	157.5 ⁰	South Southeast	0.62	0.592 - 0.602	0.028 - 0.018
9	180 ⁰	South	1.4	1.374 - 1.400	0.026 - 0
10	202.5 ⁰	South Southwest	1.19	1.173 - 1.190	0.017 - 0
11	225 ⁰	Southwest	3.08	3.025 - 3.080	0.055 - 0
12	247.5 ⁰	West Southwest	2.93	2.913 - 2.930	0.017 - 0
13	270 ⁰	West	4.62	4.609 - 4.623	0.011 - 0.003
14	292.5 ⁰	West Northwest	4.04	4.032 - 4.042	0.008 - 0.002
15	315 ⁰	Northwest	4.78	4.325 - 4.780	0.455 - 0.
16	337.5 ⁰	North Northwest	3.43	3.421 - 3.431	0.009 - 0.001

Gambar 8 menunjukkan hasil pengukuran kecepatan angin dan curah hujan. Metode pengukuran kecepatan angin dengan cara memutar baling-baling dan melihat hasil pengukuran melalui *running program* dengan Arduino. Konversi putaran ke kecepatan berdasarkan *data sheet* adalah apabila selama 1 detik baling-baling memutar setengah putaran artinya kecepatan angin sebesar 2,4 km/jam^[7]. Pengamatan kecepatan angin diprogram untuk ditampilkan setiap 2 detik.

Curah hujan diukur dengan cara menghitung jumlah pulsa yang keluar dari modul penampungan air saat hujan berlangsung. Pulsa ini akan dihitung oleh mikroprosesor dan ditampilkan di program dalam satuan inchi. Dari hasil pengujian untuk mendapatkan 1 pulsa diperlukan curah hujan sebanyak 0,22 mm, sedangkan dalam *data sheet* untuk menghasilkan 1 pulsa, curah hujan yang diperlukan sebanyak 0,2794 mm, terdapat selisih sebesar 0,0594 atau sekitar 21,26 %. Hal inilah yang mengharuskan dilakukannya kalibrasi modul terlebih dahulu agar hasil yang didapat akurat.

```

wind_speed
#define SKETCH_NAME "wind_speed"
#define USE_WIND_DEVICES
#include <Wire.h>
#include <WireGarden.h>

#define WIND_SPEED_PIN 3
WindSpeedDevice windSpeed( WIND_SPEED_PIN );
float windSpeedValue = 0; // wind speed in mph

//This will keep track of the unsigned long lastUpdate = 0;

// This will allow us to respond to serial commands
boolean executeCommand( const char* command ) {
  if ( strcmp( command, "ver" ) == 0 ) {
    return false;
  }
  // handle all commands other than "ver"
  return true;
}

void setup() {
  // initialize serial connection
  Serial.begin( 9600 );

  // initialize WireGarden communication
  initCommands( executeCommand );
}

void loop() {
  checkSerialCommands();

  // Check the last time we updated values.
  if ( lastUpdate == 0 ) {
    windSpeedValue = windSpeed.read();
    lastUpdate = millis();
  }

  Serial.print( "Kecepatan angin (mph) = " );
  Serial.println( windSpeedValue );

  Serial.print( "curah hujan (inch) = " );
  Serial.println( rain );
}

```

Gambar 8. Hasil Pengukuran Kecepatan Angin dan Curah Hujan

4. KESIMPULAN

Telah dirancang bangun perangkat pemantau radiasi lingkungan instalasi nuklir. Sistem utama terdiri dari Sistem Monitor Radiasi Gamma dan Sistem Pemantau Cuaca. Radiasi *gross gamma* diukur menggunakan detektor GM dan *Nal(Tl)*. Parameter

meteorologi yang dipantau berupa arah dan kecepatan angin, suhu udara, kelembaban relatif, dan curah hujan.

Prototip perangkat sudah dibuat dan dilakukan uji fungsi. Hasil pengujian pembangkit tegangan tinggi, pengolah sinyal radiasi, *timer* dan *counter*, ADC, serta modul komunikasi menunjukkan bahwa perangkat dapat berfungsi sesuai persyaratan. Berdasarkan hasil uji perbandingan dengan perangkat monitoring radiasi komersial, diperoleh hasil bahwa prototip yang dibuat mempunyai kinerja yang sebanding. Pengujian sensor cuaca juga menghasilkan unjuk kerja yang sesuai. Untuk selanjutnya, terhadap perangkat yang dikembangkan perlu dilakukan kalibrasi di laboratorium yang terakreditasi dan untuk selanjutnya data akan dikembangkan untuk dapat ditampilkan secara *online* di web.

ηφφκσ,φδσδσδδ±

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih ditujukan untuk seluruh tim perekayasa perangkat pemantau radioaktivitas lingkungan instalasi nuklir, tetap kompak dan penuh inovasi.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] IAEA Safety Standards, 2005, *Safety Guide No. RS-G-1.8 : Environmental Source and Monitoring for Purpose of Radiation Protection*, Vienna.
- [2] Alfian Muhamad dan Yus RA, 2010, *Perangkat Lunak Resrad-Biota Sebagai Alat Bantu Dalam Pemantauan Lingkungan (Studi Kasus: Estimasi Radiologik Biota Di Sekitar Instalasi Nuklir Serpong)*, Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir PTRKN - BATAN 353 – 360.
- [3] Komisi Proteksi Radiasi Kawasan Nuklir Serpong, 2011, *Pedoman Keselamatan dan Proteksi Radiasi Kawasan Nuklir Serpong*, Revisi 1.
- [4] Anonymous, diakses tanggal 21 Oktober 2013, *Internet Protocol Suite*, http://id.wikipedia.org/wiki/Internet_protocol_suite.
- [5] Istofa, 2013, *Desain Rinci Perangkat Pemantau Radioaktivitas Lingkungan Instalasi Nuklir*, No: DR- IL13.1.0.0.01.00-R, PRFN.
- [6] I Putu Susila, Istofa dan Sukandar, 2014, *Pengembangan Prototip Perangkat Pemantau Radiasi Gamma, Suhu dan Kelembaban Secara Kontinyu pada Fasilitas Penyimpanan Limbah Radioaktif*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XII, PTLR.
- [7] *Argent Data Systems*, diakses September 2014, www.environdata.com.