

Tinjauan Penggunaan Jaringan Sensor Nirkabel untuk Pemantauan Gunung Api di Indonesia

Bayu Hendradjaya¹, Elisati Hulu²

¹Teknik Informatika, ²Teknik Elektro

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, ITB, Ganesha 10 Bandung

bayu@informatika.org, elisati.hulu@students.itb.ac.id

Abstrak

Indonesia termasuk yang memiliki gunung api terbanyak di dunia. Sejumlah 127 gunung api dikategorikan aktif dan berpotensi meletus. Aktivitas gunung api ini dipantau dari pos yang berada di sekitar gunung api, dengan alat seismograf dan sistem radio telemetri. Sekitar 70 gunung api ini memiliki stasiun pemantauan, dilengkapi dengan seismometer, namun masih sangat terbatas jumlahnya. Seismometer merekam data gempa di lokasi alat dan diambil secara periodik dengan mengunjungi lokasi peralatan, biaya peralatan mahal karena komponen yang tidak mudah diganti, membutuhkan baterai besar, hanya mendukung jumlah sensor yang terbatas, dan umumnya tidak dapat dimonitor secara *remote*. Pada makalah ini ditinjau secara literatur, peluang penggunaan jaringan sensor nirkabel untuk pemantauan gunung api di Indonesia. Jaringan sensor nirkabel terdiri dari banyak sensor yang dapat disebar secara spasial pada gunung api untuk menangkap data gempa. Jaringan sensor dapat dihubungkan secara nirkabel atau fiber optik dengan jaringan yang berada di stasiun yang jauh dari gunung api. Sensor secara individu murah dan dayanya rendah, membuat penggantian komponen lebih mudah, dapat disebar di gunung api sesuai kebutuhan, mudah dalam pemeliharaan termasuk jika hilang, penggantian sensor tidak mengganggu jaringan sensor sehingga memberikan *fault-tolerance*. Karena itu sangat besar peluang penggunaan jaringan sensor ini untuk pemantauan gunung api di Indonesia.

1. Pendahuluan

Gunung api di Indonesia termasuk yang terbanyak di dunia. Dari 127 gunung api yang aktif, 70 gunung dipantau oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) [2]. Pemantauan dilakukan dengan menempatkan petugas pada setiap gunung api, rata-rata 1 petugas untuk 5 gunung api. Hal ini sangat jauh dari yang ideal, seperti halnya yang dilakukan di Jepang, dimana 1 gunung api dipantau oleh 4-5 petugas yang ahli.

Secara umum pemantauan gunung api di Indonesia dilakukan dengan cara visual, yaitu dengan melihat langsung beberapa tanda yang terjadi di sekitar gunung api. Tanda tersebut antara lain terhadap bau yang menyengat dari sulfur, perubahan warna asap, suara seperti guruh atau guntur, perubahan pada tanaman, dan yang tergolong baru menurut pengamatan periset yaitu perubahan tingkah laku binatang yang berada di lokasi gunung berapi, yang menunjukkan kepanikan.

Pemantauan juga dilakukan dengan menggunakan instrumental untuk mengamati aktifitas seismik dari gunung api. Pemantauan dengan cara instrumental menggunakan peralatan seismometer yang merekam getaran tanah termasuk gelombang seismik yang ditimbulkan oleh gempa bumi, letusan gunung api dan sumber lain. Idealnya stasiun pengamatan juga dilengkapi dengan tiltmeter atau EDM (Electronic Distance Measurement) untuk mengukur perubahan permukaan data (*deformation*) serta GPS.

Seismometer diletakan di beberapa titik di gunung api, misalnya seperti di gunung Tangkuban Perahu, Jawa Barat seismometer ditempatkan pada 4 titik lokasi, pada ketinggian 2000 meter dari permukaan laut [2]. Di gunung Merapi – Jawa Tengah, dimonitor dengan seismograf sistem radio telemetri (RTS) sebanyak 8 (delapan) stasiun. Pemantauan dilengkapi dengan peralatan deformasi seperti tiltmeter, EDM dan GPS, serta peralatan pemantauan geomagnet [3].

Seismograf yang digunakan terdiri dari aki baterai, seismometer, panel solar dan antena yang menonjol, ditanam atau disimpan dalam sebuah bangunan. Alat-alat ini banyak yang sudah tua/lama, kurang lengkap/memadai dan seringkali hilang karena dicuri. Pemantauan dilakukan setiap hari atau secara periodik, dengan mendatangi setiap stasiun seismograf, dimana laporannya digunakan sebagai rekam jejak dan/atau digunakan untuk memprediksi terjadi letusan/erupsi.

Selain itu, peralatan ini juga memiliki beberapa kelemahan antara lain: mahal karena sulit mengganti alat per komponen, sulit untuk disebar karena berat dan mesti menanam sensor dan kabel, membutuhkan baterai yang besar dan solar panel, data hasil rekaman disimpan secara lokal dan harus secara periodik diambil, tidak dapat dimonitor dari jarak jauh (*remotely*), dan pencatat datanya mendukung hanya sedikit sensor.

Seismograf dapat dihubungkan dengan link telepon atau komunikasi radio jarak jauh (sistem telemetri) ke stasiun pengamatan yang terletak beberapa kilometer dari gunung. Namun bandwidth komunikasi dan peralatan telemetri yang mahal seringkali membuat kualitas data yang tinggi dan akuisisi *multi-channel* dari data pada sebuah gunung api sangat terbatas. Selain itu, sistem analog dari komunikasi dapat mengalami degradasi sinyal dan interferensi komunikasi.

Pada makalah ini penulis akan meninjau secara teori peluang penggunaan jaringan sensor nirkabel untuk memantau aktifitas gunung api di Indonesia, kelebihan dan kekurangannya, serta berbagai kemungkinan riset di masa yang datang yang mungkin dilakukan agar pemantauan gunung api di Indonesia dapat lebih baik, dan memberikan keakuratan data baik untuk keperluan deteksi letusan maupun untuk kepentingan penelitian.

Bagian selanjutnya dari makalah ini berturut-turut berupa landasan teori pada bagian 2, bagian 3 yang mengemukakan peluang penggunaan WSN untuk pemantauan gunung api di Indonesia, selanjutnya akan mengangkat berbagai tantangan riset penggunaan WSN pada bagian ke-4 dan terakhir pada bagian ke-5 mengemukakan kesimpulan dan usaha selanjutnya yang harus dilakukan.

2. Landasan Teori

Peralatan pemantauan aktifitas gunung api biasanya terdiri dari sensor-sensor yang disebarkan di beberapa titik lokasi di gunung berapi (terdistribusi secara spasial). Peralatan ini dilengkapi dengan seismometer, akustik, tiltmeter, GPS, instrumen panas, dan pengukuran perubahan gas.

Sensor-sensor ini dapat berdiri sendiri secara tunggal (seperti seismoter atau tilt sensor) maupun dapat dalam membentuk jaringan sensor yang dihubungkan dengan kabel. Jarak antar sensor biasanya dekat, dan dapat saja diintegrasikan dengan jaringan yang besar yang dihubungkan secara *point-to-point*.

Perekaman data seismik dilakukan secara periodik atau dipicu oleh kejadian seismik. Data yang direkam disimpan secara lokal, sehingga harus diambil secara periodik atau dikirimkan melalui saluran telepon atau komunikasi radio jarak jauh ke pos pemantauan. Data ini ditampilkan dalam bentuk seismogram di atas kertas yang kelak akan diinterpretasi untuk kegunaan pemantauan dan dapat saja sekaligus diolah untuk pemrosesan berikutnya.

Tujuan pengamatan gunung api pada dasarnya terdiri dari dua tujuan besar yaitu untuk mempelajari secara saintifik karakteristik dari gunung api dan untuk pemantauan aktifitas gunung api jikalau menimbulkan letusan yang berbahaya. Kegunaan lain adalah untuk membuat gambar dari struktur

internal dari gunung api menggunakan tomografi. Gunung api yang secara seismik aktif memberikan penggambaran 3 dimensi atas struktur kecepatan gunung api.

Sinyal infrasonik dapat digunakan untuk mempelajari aktifitas gunung api. Sinyal ini dapat membantu untuk membedakan aktifitas letusan dengan aktifitas seismik yang lain seperti di penambangan.

Jaringan sensor nirkabel (*wireless sensor network* atau disingkat WSN) adalah terdiri dari node sensor individual yang dapat berinteraksi dengan node lain dan dengan lingkungannya dengan cara *sensing* atau mengendalikan besaran fisik. Komunikasi antar node dilakukan menggunakan frekuensi radio, dimana secara sendiri melakukan setidaknya fungsi komputasi, komunikasi dan *sensing* atau fungsi pengendali.

Beberapa parameter fisis yang dapat ditangkap oleh sensor antara lain: suhu, kelembaban, cahaya visual dan infrared, akustik, vibrasi atau getaran, tekanan, bahan kimia, magnetik, radar, dll. Beberapa contoh sensor dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1: beberapa contoh sensor
(sumber: google image)

Secara individual, node sensor ini memenuhi kebutuhan khusus pada penerapannya yaitu ukurannya kecil, biaya per sensor murah, memberikan efisiensi energi, dapat dilengkapi dengan sensor yang sesuai, memiliki sumber daya komputasi dan memori yang memadai, serta fasilitas komunikasi yang tepat untuk transmisi data.

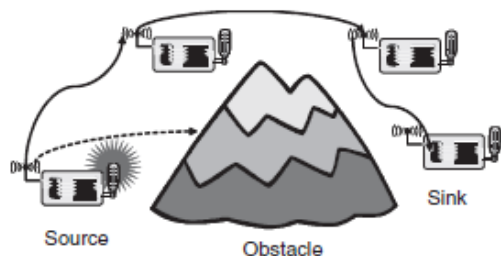
WSN telah banyak diterapkan pada berapa aplikasi seperti [4] *disaster relief operation*, pemetaan keragaman biologi dan pengendalian lingkungan, gedung pintar, fasilitas pengelolaan, agrikultural, *medical* dan *health care*, logistik, *tracking* dan *surveillance*, eksplorasi lingkungan berbahaya dan termasuk perekaman aktifitas seismik dan pemantauan gunung api.

Sebuah WSN biasanya sedikit atau tidak memiliki infrastruktur, terdiri dari sejumlah node sensor (puluhan sampai ribuan) yang bekerja sama untuk memantau suatu area, untuk mendapatkan data akan lingkungannya. Berdasarkan infrastruktur, WSN

dapat dibagi dua[5] yaitu WSN yang tidak berstruktur dan berstruktur. WSN yang tidak berstruktur terdiri dari sekumpulan node sensor disebar secara ad hoc pada sebuah area, dan dibiarkan untuk melakukan pemantauan dan pelaporan. Pada WSN yang berstruktur, semua atau beberapa node sensor disebar dengan cara yang direncanakan sebelumnya, berdasarkan pola penyebaran tertentu.

Node-node pada WSN umumnya dibedakan antara node *source*, yaitu node sensor yang berfungsi sebagai sumber data, yang menangkap besaran fisis, mengolahnya dan mengtransmisikannya ke node lain; node *sink*, yaitu node yang menerima data, dapat berupa sensor atau devais komputasi yang lain seperti handheld, PDC atau gateway ke jaringan lain.

Berdasarkan interaksi antara node *source* dan *sink*, WSN dapat dikategorikan menjadi jaringan single hop dan multihop. Jaringan single hop terdiri dari node yang berkomunikasi dengan node lain secara langsung, tanpa melalui node tertentu atau node relay. Jaringan multi-hop terdiri dari node yang berkomunikasi dengan node yang lain melalui sebuah node tertentu atau node relay. Jaringan multihop diterapkan pada komunikasi antar node tidak memungkinkan secara langsung karena jarak atau kendala komunikasi tertentu. Gambar 2 menunjukkan situasi jaringan WSN multi-hop



Gambar 2: Jaringan WSN multi-hop [4]

Isu-isu utama untuk mendesain dan membangun WSN pada berbagai domain aplikasi dapat diklasifikasikan dalam 3 kelompok besar [5] yaitu kelompok pertama terkait dengan sistem. Setiap node sensor adalah sebuah sistem individual. Untuk mendukung penerapan yang berbeda diperlukan perangkat lunak pada sistem sensor, platform baru, sistem operasi dan skema penyimpanan. Kelompok ke-2 adalah protokol komunikasi, yang memungkinkan komunikasi antar aplikasi dan sensor, juga memungkinkan komunikasi antara node sensor. Kelompok yang terakhir adalah layanan dimana dibangun untuk meningkatkan aplikasi dan memperbaiki performansi sistem dan efisiensi jaringan.

Dari perspektif kebutuhan aplikasi dan manajemen jaringan, penting bahwa node sensor dapat mengatur dirinya sendiri (*self-organizing*) di dalam jaringan,

mengendalikan dan mengelola dirinya sendiri secara efisien. Sebuah node sensor terbatas dalam hal daya, kapasitas pemrosesan, penyimpanan dan komunikasi, karena itu diperlukan komunikasi protokol dan layanan pengelolaan yang baru yang memenuhi kebutuhan ini.

Protokol komunikasi terdiri dari 5 lapisan protokol standar, yaitu lapisan aplikasi, transport, network, data link dan fisik. Berbagai kebutuhan diperlukan untuk dinamika jaringan dan efisiensi energi. Fungsi seperti lokalisasi, cakupan (*coverage*), storage, sinkronisasi, keamanan, agregasi data dan kompresi diperlukan sebagai layanan jaringan.

Implementasi protokol pada setiap lapisan harus dapat memberikan kontribusi yang signifikan pada konsumsi energi, delay end-to-end, efisiensi sistem. Sangat penting untuk meningkatkan performansi komunikasi tetapi meminimalkan penggunaan energi atau daya.

Sebuah sensor beroperasi dengan daya batere yang terbatas, sehingga efisiensi penggunaan energi menjadi isu paling utama pada pengembangan dan penggunaan WSN di berbagai domain aplikasi.

Berdasarkan eksperimental[6], secara umum transmisi data lebih mahal secara konsumsi energi dibandingkan dengan pemrosesan data yang mengkonsumsi energi lebih kecil. Pada umumnya node sensor, energi yang dikonsumsi untuk meng-transmisi 1 (satu) bit informasi hampir sama dengan energi yang dikonsumsi untuk melakukan 1000 operasi pemrosesan. Model berikut menunjukkan energi yang dikonsumsi ketika transmisi sebuah pesan:

$$E_{snd} = E_{elec} * k + E_{amp} * d^2 * k$$

dimana k adalah ukuran message, r : jarak transmisi; E_{elec} adalah energi elektronik, E_{amp} adalah transmitter amplifier. Untuk menerima pesan energi yang dikonsumsi dimodelkan sbb:

$$E_{rcv} = E_{elec} * k$$

Lapisan jaringan pada WSN menangani routing data dari source ke sink. Berbeda dengan jaringan berbasis IP, node sensor tidak memiliki alamat IP, sehingga protokol routing berbasis IP tidak dapat digunakan di WSN. Desain protokol routing pada WSN perlu *scalable*, dapat mengelola komunikasi antara banyak node sekaligus propagasi data sensor ke sink, melalui node sensor yang lain. Protokol harus memenuhi batasan seperti energi node sensor yang terbatas, bandwidth komunikasi, memori dan kapasitas komputasi. Selain itu, protokol juga harus menangani isu-isu terkait efisiensi, fault-tolerance, fairness dan keamanan.

Berbagai strategi desain protokol routing di WSN antara lain protokol routing data-centric dimana routing dilakukan berdasarkan kebutuhan akan data tertentu, protokol routing hierarkhi untuk

memberikan keseimbangan antara skalabilitas dan performansi, protokol routing berbasis lokasi, dan terakhir protokol routing yang berdasarkan *network-flow* dan QoS.

3. Peluang Penggunaan WSN

Jaringan sensor nirkabel (WSN) memberikan sebuah peluang baru untuk pemantauan gunung api di Indonesia. WSN dapat memberikan peningkatan dalam hal skalabilitas, resolusi, peningkatan jumlah gunung api yang dipantau, kemudahan dalam instalasi dan pemeliharaan, kemudahan dalam memantau secara jarak jauh dan pengambilan data yang jauh lebih nyaman.

Penggunaan seismograph dengan sistem radio telemetry seperti yang ditempatkan di Gunung Merapi Jawa Tengah, dapat digunakan untuk transmisi data digital dari stasiun remote ke pos pengamatan. Modem yang terinstal dapat dihubungkan ke jaringan pada pos pengamatan melalui satelit. Namun pendekatan ini masih memberikan keterbatasan pada jumlah kanal (seismik, akustik, dll) yang dapat direkam di setiap stasiun, serta bandwidth komunikasi radio jarak jauh. Jumlah dan penempatan sensor pada setiap stasiun terbatas pada kebutuhan daya, panjang kabel dan kapasitas perekaman (*data logger*).

Penggunaan WSN dengan node sensor yang kecil, dan daya energi yang rendah, dapat memberikan manfaat yang sangat besar bagi pemantauan gunung api-gunung api yang ada di Indonesia. WSN dapat dimanfaatkan sebesar-besarnya dengan penyebaran node sensor sesuai kebutuhan serta memberikan kemungkinan analisis data yang lebih detil, dari sinyal yang diterima. Node sensor WSN dapat diprogram, sehingga memungkinkan percobaan dengan pemrosesan sinyal, kompresi, *over sampling*, dan teknik2 lain untuk meningkatkan kualitas data yang ditangkap.

Sensor node yang relatif murah dan kemudahannya dalam menyebarkan node sensor karena kecil dan nirkabel memungkinkan WSN dapat dimanfaatkan untuk pemantauan seluruh gunung api di Indonesia yang berjumlah sekitar 127. Menurut[2] sudah 70 gunung api di Indonesia yang dapat dipantau oleh PVMBG, dengan peralatan seismograph, namun hanya beberapa gunung api dilengkapi dengan tiltmeter, EDM dan GPS dan lebih sedikit lagi yang dilengkapi dengan sistem telemetry radio.

WSN yang dapat disebar dengan pola sesuai dengan kebutuhan pada gunung api, desain protokol komunikasi yang sesuai, pengembangan layanan aplikasi yang dibutuhkan memungkinkan pemantauan gunung api lebih menarik dan dapat bermanfaat untuk kepentingan riset dan deteksi letusan atau bahaya. WSN dapat dihubungkan dengan jaringan yang terletak di pos pengamatan

yang jauhnya bisa beberapa puluh kilometer dengan menggunakan media nirkabel atau fiber optik. Data yang ditangkap dapat dikirimkan ke pos pengamatan dengan kualitas yang lebih baik, karena setiap node sensor dapat melakukan pemrosesan data untuk agregasi data dan transmisi ke sink yang berada di pos pengamatan yang ada di sekitar gunung atau jauh dari gunung api.

Transmisi data dari node ke node dapat dilakukan dengan protokol routing yang dapat dibangun sesuai dengan kebutuhan pemantauan gunung api, yang memberikan end-to-end delay yang kecil, kualitas layanan dan keamanan data.

Node sensor yang kecil dan murah juga memberikan kemudahan dalam pemeliharaan termasuk ketika node sensor tertentu mati atau kehabisan energi, dengan mudahnya dapat diganti dengan node sensor yang baru tanpa membuat sistem berhenti berjalan. Kemampuan dari protokol dan *self-organizing* memungkinkan penggantian berjalan dengan mulus, tanpa mengganggu sistem secara keseluruhan. Hal ini berarti sekaligus memenuhi kebutuhan *fault-tolerance*. Dan sekaligus dengan mudah dapat menangani dampak dari kasus pencurian peralatan pada beberapa gunung api.

Jika node sensor dilengkapi dengan panel solar atau antar muka sejenis, memungkinkan node sensor dapat menambah daya dari sumber lain selain baterai, misalnya dari matahari, sehingga memperpanjang masa hidup node dan secara keseluruhan WSN. Efisiensi energi dan alternatif sumber energi menjadi isu utama dalam WSN, sehingga diperlukan desain protokol dan aplikasi yang memenuhi kebutuhan ini. Dengan energi yang dapat lebih efisien melalui desain dan sumber lain sehingga memperpanjang masa hidup WSN maka kontinuitas pemantauan gunung api dapat dipertahankan baik untuk peningkatan pelayanan informasi aktifitas gunung api atas bahaya letusan, maupun kebutuhan penelitian.

Laju data individu sensor (antara 433 MHz dan 2.4 GHz [4]) yang jauh lebih tinggi memberikan tantangan baru yaitu bagaimana mengelola bandwidth yang dibutuhkan, karena meskipun berjumlah kecil, sensor dapat menguasai *link* nirkabel. Karena itu memerlukan kompresi, agregasi, korelasi, atau pemrosesan sinyal pada node sensor itu sendiri. Selain itu node sensor juga memerlukan sinkronisasi waktu agar memungkinkan sinyal atau data dari setiap node sensor dapat dibandingkan.

4. Tantangan riset penggunaan WSN

Sebagaimana disebutkan di atas, bahwa ada peluang untuk menerapkan penggunaan WSN untuk pemantauan gunung api-gunung api di Indonesia. Namun tentu menimbulkan berbagai tantangan

penelitian yang harus dilakukan agar dapat memenuhi kebutuhan pemantauan gunung api, yang umumnya aktifitasnya berbeda antara gunung api yang satu dengan gunung api yang lain.

Tantangan penelitian sangat ditentukan oleh tujuan dari penggunaan WSN. Secara umum pemanfaatan WSN untuk pemantauan gunung api adalah untuk riset dan deteksi letusan gunung api. Namun dapat saja dapat ditujukan untuk memahami karakteristik area di sekitar gunung api, termasuk pemetaan habitat untuk tujuan mitigasi gunung api. Dapat juga ditujukan untuk memberikan deteksi dini letusan gunung api dan penyebaran informasi bahaya kepada masyarakat sekitar, sesuai dengan tingkat status gunung api.

Namun tantangan penelitian yang pertama adalah terkait dengan desain arsitektur sistem, yang mencakup topologi atau penyebaran node sensor. Desain ini harus memperhatikan karakteristik permukaan masing-masing gunung api. Penentuan apakah penyebaran diperuntukkan untuk permanen atau ad-hoc. Termasuk juga menentukan kepadatan penyebaran node sensor.

Selain itu, tantangan penelitian berikutnya adalah desain komunikasi protokol yang harus memenuhi kebutuhan *end-to-end delay* yang kecil, efisiensi energi, kualitas layanan data, keamanan serta keakuratan. Protokol routing dan komunikasi memberikan dukungan yang sangat besar pada pengiriman data dari node sensor ke stasiun pada pos pemantauan.

Tantangan berikutnya adalah pembangunan layanan jaringan untuk mendukung kehandalan WSN memberikan data yang akurat dan pembangunan layanan informasi yang diperlukan bagi riset maupun petugas, masyarakat sekitar gunung api atau masyarakat yang membutuhkannya.

Belajar dari riset di gunung Reventador, Ecuador[6], penggunaan WSN untuk pemantauan gunung api, secara khusus memberikan tantangan terkait dengan deteksi kejadian yang handal, efisiensi pengumpulan data, laju data yang tinggi, penyebaran kepadatan node sensor.

5. Kesimpulan dan Saran

Jaringan sensor nirkabel (WSN) memiliki peluang yang sangat besar untuk diterapkan pada pemantauan gunung api di Indonesia. Dapat dilihat peluang ini didukung dengan banyaknya kendala yang dihadapi oleh PVMBG, baik dari jumlah gunung api yang aktif dan harus dipantau, keterbatasan jumlah stasiun disebabkan oleh ketersediaan peralatan karena mahal serta petugas yang ahli di bidang gunung api. Kendala non teknis lain yang harus dihadapi adalah pencurian peralatan yang terjadi pada beberapa gunung api, yang membuat efektifitas pemantauan menurun.

Pemanfaatan WSN untuk pemantauan gunung api memberikan peningkatan jumlah gunung api yang akan dipantau, kemudahan instalasi dan pemeliharaan, kemudahan mendapatkan data serta pengolahannya untuk keperluan riset maupun deteksi letusan.

Namun pemanfaatan WSN ini memberikan tantangan-tantangan baru dalam pemantauan gunung api. Baik terhadap penggunaannya terlebih pada desain dan pengembangan WSN nya sendiri.

Selanjutnya yang harus dikerjakan adalah menentukan kebutuhan signifikan WSN dan perbandingannya dengan peralatan pemantauan yang sekarang sedang digunakan di beberapa gunung api di Indonesia; menyelidiki dan menentukan kebutuhan akan desain arsitektur yang sesuai dengan gunung api di Indonesia, secara khusus gunung Tangkuban Perahu; selanjutnya mendesain protokol routing dan komunikasi untuk keperluan pemanfaatan WSN dalam pemantauan gunung api.

Berikutnya membangun sistem pengumpulan data yang handal dan delivery data baik untuk kebutuhan riset maupun deteksi, serta diseminasi informasi letusan gunung api yang sangat akurat dan real-time.

6. Referensi

- [1] G.Werner-Allen et al., "Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network," *Proc. 2nd European Workshop Wireless Sensor Networks (EWSN 05)*, IEEE Press, 2005; www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/volcano-ewsn05.pdf.
- [2] Ichi, "Kisah Pemantau Gunung Api", 29 Mei 2012, <http://kabar.asia/kisah-pemantau-gunung-api/>, diakses tgl 22 Desember 2012
- [3] Syamsul Rizal W, Atje Purbawinata, Asnawir Nasution, "Gunung Api Indonesia – Merapi", 28 Oktober 2010, <http://volcanoindonesia.blogspot.com/2010/10/merapi.html>, diakses tgl 26 Desember 2012
- [4] Karl, H., Willig, A., "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", John Wiley & Sons, 2005
- [5] Yick, J. et al., "Wireless Sensor Network Survey", *Computer Networks*, Elsevier, 2008
- [6] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H., *Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks*, 2000
- [7] G.Werner-Allen et al., "Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano", *IEEE Internet Computing* 10, 2006