



SISTEM PERINGATAN DINI

BANJIR LAHAR

BERBASIS PRAKIRAAN
WAKTU TIBA BANJIR



C. Bambang Sukatja

Buku ini tidak diperjualbelikan

SISTEM PERINGATAN DINI

BANJIR LAHAR

BERBASIS PRAKIRAAN
WAKTU TIBA BANJIR



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Rights Reserved

Buku ini tidak diperjualbelikan.

SISTEM PERINGATAN DINI

BANJIR LAHAR

BERBASIS PRAKIRAAN
WAKTU TIBA BANJIR



C. Bambang Sukatja

LIPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2019 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Waktu Tiba Banjir/C. Bambang Sukatja. Jakarta:
LIPI Press, 2019.

xiv + 104 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-602-496-076-6 (cetak)
978-602-496-077-3 (e-book)

1. Gunung Api
2. Banjir Lahar
3. Bencana

363.349 5

Copy editor : Tantrina Dwi A. dan Fadly Suhendra
Proofreader : Martinus Helmiawan
Penata Isi : Rahma Hilma Taslima dan Erna Rumbiati
Desainer Sampul : D.E.I.R. Mahelingga

Cetakan Pertama : Oktober 2019



Diterbitkan oleh:
LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710
Telp.: (021) 573 3465
e-mail: press@mail.lipi.go.id
website: lipipress.lipi.go.id

 LIPI Press
 @lipi_press



Bekerja sama dengan:
Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. Ir. H. Juanda No.193, Dago, Kecamatan Coblong,
Kota Bandung, Jawa Barat 40135

Buku ini merupakan karya buku yang terpilih dalam Program Akuisisi
Pengetahuan Lokal Tahun 2021 Balai Media dan Reproduksi (LIPI Press),
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.



Karya ini dilisensikan di bawah Lisensi
Internasional Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Isi



Daftar Gambar.....	vii
Pengantar Penerbit.....	ix
Kata Pengantar	xi
Prakata	xiii
Bab 1 Mengenal Gunung Api dan Bahayanya	1
A. Gunung Api di Indonesia	1
B. Erupsi Gunung Api.....	3
C. Bahaya Lahar.....	6
D. Pengendalian Banjir Lahar	8
Bab 2 Sistem Peringatan Dini Bencana	11
A. Penanggulangan Bencana	11
B. Sistem Peringatan Dini	14
C. Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Internet <i>Broadband</i>	16
Bab 3 Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar	21
A. Metode Konvensional.....	21
B. Metode Garis Kritis	22

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab 4 Pengembangan Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir	27
A. Modul <i>Earthworm</i>	28
B. Kajian Kritis Modul <i>Earthworm</i>	31
C. Aplikasi <i>Earthworm</i> dalam Peringatan Dini Banjir Lahar	33
D. Perencanaan Sistem.....	35
E. Aplikasi di Lapangan	39
F. Data yang Digunakan untuk Informasi Status Bahaya	53
G. Informasi status bahaya.....	54
Bab 5 Analisis Data Visual untuk Prakiraan Waktu Tiba Banjir	57
A. Aplikasi Pengolah Data Visual	58
B. Diagram Rancangan Sistem	58
C. Pengolah Data Visual	60
D. Instalasi Pengembangan Perangkat Lunak	62
E. Persyaratan Pendukung Aplikasi Pengolah Data Visual.....	64
F. Aplikasi Pembacaan Kecepatan dan Tinggi Muka Aliran	64
G. Rancangan Antarmuka Pengguna Grafis	65
H. Proses Uji Kinerja Peralatan.....	67
I. Hasil Uji Kinerja Peralatan.....	68
Bab 6 Tampilan Informasi Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir	71
A. Tampilan Data Fenomena Aliran Lahar	71
B. Tampilan Data Kecepatan dan Tinggi Aliran Lahar.....	72
C. Tampilan Data Prakiraan Waktu Tiba Banjir.....	75
Bab 7 Penyesuaian Istilah Peringatan Status Bahaya Aliran Lahar	77
A. Tingkat Peringatan Status Bahaya.....	77
B. Pengguna Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar	81
Bab 8 Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Pada Masa Mendatang	83
Daftar Pustaka	89
Daftar Singkatan.....	95
Indeks	99
Biografi Penulis	103

Daftar Gambar



Gambar 1.	Tren Kejadian Bencana di Indonesia pada 2002–2016	4
Gambar 2.	Siklus Penanggulangan Bencana	13
Gambar 3.	Rencana Tahapan Penanggulangan Bencana	14
Gambar 4.	Model Hujan Kritis yang diprogramkan di Stasiun Induk	24
Gambar 5.	Diagram Alir Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir	36
Gambar 6.	Diagram Peralatan Stasiun Seismograf Deteksi Lahar Awal	37
Gambar 7.	Diagram Peralatan Stasiun Seismograf Deteksi Lahar dengan Kamera Pemantau	37
Gambar 8.	Penempatan peralatan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir.	40
Gambar 9.	Foto stasiun seismograf deteksi lahar awal di sabo dam PU-C13.	41
Gambar 10.	Foto stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di lapangan.	42
Gambar 11.	Fenomena aliran lahar yang terpantau di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau.	43

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 12.	Lokasi Pemasangan dan Jarak Antara Dua Sensor.....	44
Gambar 13.	Sketsa Pemasangan Peralatan Pengembangan Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir.....	45
Gambar 14.	Peta Sebaran Bangunan Sabo dan Fasilitas Umum di DAS K. Putih	47
Gambar 15.	Lokasi Sabo Dam pada Penampang Memanjang K. Putih.....	47
Gambar 16.	Grafik RSAM saat simulasi banjir lahar, 3 November 2015.....	51
Gambar 17.	Grafik RSAM saat sensor mendeteksi aliran lahar pada 16 Desember 2015	52
Gambar 18.	Konsep Sistem Lalu Lintas Penerimaan dan Publikasi Data	53
Gambar 19.	Blok Diagram Rancangan Sistem	59
Gambar 20.	Diagram Algoritma Sistem secara Keseluruhan.....	61
Gambar 21.	<i>Next Unit of Computing</i> atau Komputer Personal Mini....	62
Gambar 22.	Daftar File Aplikasi yang Digunakan	62
Gambar 23.	Tampilan Penggunaan Visual Studio 2010	63
Gambar 24.	Tampilan Visual Studio Saat Pemrograman.....	65
Gambar 25.	Rancangan GUI Pengolah Data Visual	66
Gambar 26.	Contoh tampilan data fenomena aliran lahar yang terpantau kamera video di stasiun seismograf deteksi lahar PU-D2.....	72
Gambar 27.	Contoh tampilan data tinggi dan kecepatan aliran lahar ketika terjadi aliran lahar skala kecil.....	73
Gambar 28.	Sketsa Perhitungan Dasar Debit Aliran Lahar.....	87

Pengantar Penerbit



Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk ikut serta dalam mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Penerbitan buku ini merupakan salah satu upaya untuk mendiseminasikan hasil kegiatan penelitian dan pengembangan teknologi mitigasi bencana debris dari Balai Litbang Sabo, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Buku ini menggambarkan tentang pemanfaatan sistem peringatan dini berbasis perkiraan waktu dalam rangka mengurangi risiko bencana banjir lahar. Sistem peringatan dini banjir lahar yang menggunakan sensor getaran dan kamera berbasis internet ini, diharapkan dapat mengurangi dampak bencana banjir lahar, yaitu dengan meningkatkan kesiapsiagaan penduduk yang terdampak.

Semoga buku ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, dan para pemangku kepentingan, khususnya

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dalam pemanfaatan sistem peringatan dini banjir lahar. Dengan demikian, usaha pengurangan risiko bencana banjir lahar dan kesiapsiagaan penduduk yang terdampak dapat ditingkatkan.

LIPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Kata Pengantar



Indonesia merupakan negara dengan potensi bencana alam yang sangat tinggi, salah satunya bencana banjir lahar. Untuk mengurangi dampak bencana tersebut, dilakukan usaha mitigasi dengan berbagai tindakan pengurangan risiko bencana. Tindakan tersebut bisa pembangunan fisik (berupa infrastruktur pengendali banjir lahar), pembangunan nonfisik (berupa kesadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana), dan pengembangan sistem peringatan dini (*early warning system*).

Balai Litbang Sabo merupakan unit pelaksana teknis di bidang penelitian dan pengembangan teknologi mitigasi bencana debris yang berada di bawah Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Salah satu tugas Balai Litbang Sabo yang terkait dengan manajemen penanganan bencana adalah melakukan penelitian dan pengembangan sistem peringatan dini banjir debris/lahar.

Buku iptek *Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir* ini disusun berdasarkan hasil penelitian

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dan pengembangan sistem peringatan dini banjir debris/lahar yang selama ini telah dilaksanakan. Buku ini diharapkan menjadi bahan rujukan para pemangku kepentingan dalam membangun infrastruktur mitigasi bencana banjir debris/lahar berupa sistem peringatan dini.

Semoga dengan terbitnya buku ini, upaya pengembangan sistem peringatan dini bencana berbasis jaringan *broadband* dapat dilakukan dengan lebih baik sehingga menunjang program pemerintah dalam pengurangan risiko bencana dan mewujudkan *zero victim accident*.

Bandung, November 2018

Prof. Dr. Ir. Eko Winar Irianto, M.T.
Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Prakata



Akibat aktivitas lempeng tektonik di wilayah Cincin Api Pasifik pada dekade ini, erupsi gunung api di Indonesia meningkat di beberapa daerah. Musim hujan yang terjadi pascaerupsi gunung api selalu diikuti munculnya aliran lahar. Aliran lahar merupakan bencana yang mengancam jiwa dan harta benda penduduk yang tinggal di sekitar gunung api aktif.

Pemanfaatan sistem peringatan dini banjir lahar termasuk dalam usaha pengurangan risiko bencana banjir lahar. Usaha tersebut bertujuan mengurangi dampak bencana banjir lahar dengan memprakirakan kapan bencana akan terjadi sehingga kesiapsiagaan penduduk yang terdampak dapat ditingkatkan. Sistem peringatan dini banjir lahar ialah konsep dan praktik upaya sistematis untuk menganalisis dan mengurangi dampak bencana tersebut.

Buku ini ditulis berdasarkan hasil kegiatan penelitian pemasangan stasiun sistem peringatan dini banjir lahar di daerah Gunung Api Merapi berbasis prakiraan waktu tiba banjir pascaerupsi Merapi 2010. Kegiatan tersebut dilaksanakan oleh tim peneliti Balai Litbang Sabo, Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Badan Litbang Kementerian PUPR.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini mengulas kinerja sistem pemantau aliran lahar yang menggunakan sensor getaran dan kamera berbasis internet. Melalui sistem ini, waktu tiba aliran lahar di daerah berpotensi terdampak banjir lahar dapat diprakirakan. Selain itu, dapat pula dilakukan analisis kecepatan dan tinggi lahar serta analisis video banjir lahar yang terjadi di hulu sungai.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan penghargaan dan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah memberi masukan sehingga buku ini dapat diselesaikan dengan baik, terutama kepada Drs. Agus Harjoko, M.Sc., Ph.D. dan Dr. Danang Sri Hadmoko, S.Si, M.Sc. serta rekan-rekan peneliti Balai Litbang Sabo, Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air. Ucapan yang sama juga tertuju kepada rekan-rekan di Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi,

Penulis juga menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada Ir. Dwi Kristianto, M.Eng. selaku Kepala Balai Litbang Sabo; Prof. Dr. Ir. Eko Winar Irianto, M.T. selaku Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air; serta Ir. Lukman Hakim, M.Sc., selaku Plt. Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, yang telah memfasilitasi dan mendorong penulis dalam menyelesaikan buku ini.

Penulis

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab 1

Mengenal Gunung Api dan Bahayanya



A. Gunung Api di Indonesia

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang memiliki posisi unik, yakni terletak di antara Benua Asia dan Australia, serta diapit oleh Samudra Hindia dan Pasifik. Letak geografis Indonesia juga berada pada pusat tumbukan Lempeng Tektonik Hindia Australia di bagian selatan, serta Lempeng Eurasia di bagian utara dan Pasifik di bagian timur laut. Lempeng-lempeng yang berada di dalam bumi terus bergerak saling menyeimbangkan. Proses penyeimbangan ini menyebabkan terjadinya gesekan, mengakibatkan gempa tektonik, dan memicu gunung api aktif bereaksi.

Tiga lempeng tektonik dunia yang dikenal dengan sebutan Cincin Api Pasifik merupakan jalur rangkaian gunung api aktif yang mengelilingi Indonesia dari berbagai penjuru. Wilayah cincin tersebut membentang di antara subduksi maupun pemisah lempeng Pasifik dengan lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, lempeng Amerika-Selatan dan lempeng Nazca yang bertabrakan dengan lempeng Amerika-Selatan. Cincin ini membentang mulai dari

Buku ini tidak diperjualbelikan.

pantai barat Amerika-Selatan, berlanjut ke pantai barat Amerika-Utara, melingkar ke Kanada, Semenanjung Kamsatschka, Jepang, Indonesia, Selandia Baru dan Kepulauan Pasifik Selatan. Daerah ini berbentuk seperti tapal kuda mencakup wilayah sepanjang 40.000 km, mengelilingi cekungan Samudra Pasifik merupakan daerah yang sering mengalami gempa bumi dan erupsi gunung api. Sejumlah 81% kejadian gempa bumi dengan magnitudo besar pernah terjadi di daerah lintasan ini sehingga sering disebut juga sebagai Sabuk Gempa Pasifik (Widayanti, 2013).

Pada saat terjadi gempa bumi dengan magnitudo skala besar, sekitar kantong magma akan mengalami dinamika tektonik serta memicu aliran magma keluar dari perut bumi sebagai akibat terakumulasinya suhu cairan sangat panas dan energi yang dikeluarkan magma. Secara tektonovulkanik, terjadinya gempa bumi dengan magnitudo skala besar dapat mengaktifkan erupsi gunung api, khususnya gunung api di zona seismik aktif (Eggert & Walter, 2009).

Berdasarkan pengamatan peta vulkanisme global, terlihat jalur sabuk gunung api dunia berdekatan dengan jalur gempa bumi. Dari beberapa kasus erupsi gunung api di dunia, terlihat bahwa erupsi terjadi setelah gempa bumi dengan magnitudo skala besar yang lokasinya berdekatan dengan episenter gempa bumi. Lokasi Merapi yang terletak pada zona interseksi sesar yang tingkat seismisitas regionalnya tinggi dan kondisi tektonik yang aktif serta kompleks menjadikan Gunung Api Merapi sebagai salah satu gunung api paling aktif di dunia (lihat tabel 1) (Daryono, 2018).

Indonesia, yang termasuk bagian dari lintasan Cincin Api Pasifik dan merupakan bagian dari jalur pegunungan aktif, memiliki 129 gunung api yang tersebar di seluruh kepulauannya (di Pulau Sumatra 30 gunung api, di Pulau Jawa 35 gunung api, Pulau Bali dan Nusa Tenggara 30 gunung api, Kepulauan Maluku 16 gunung api, dan Pulau Sulawesi 18 gunung api). Jumlah itu merupakan yang terbanyak di dunia.

Tabel 1. Hubungan Gempa Bumi dengan Erupsi Gunung Api di Dunia

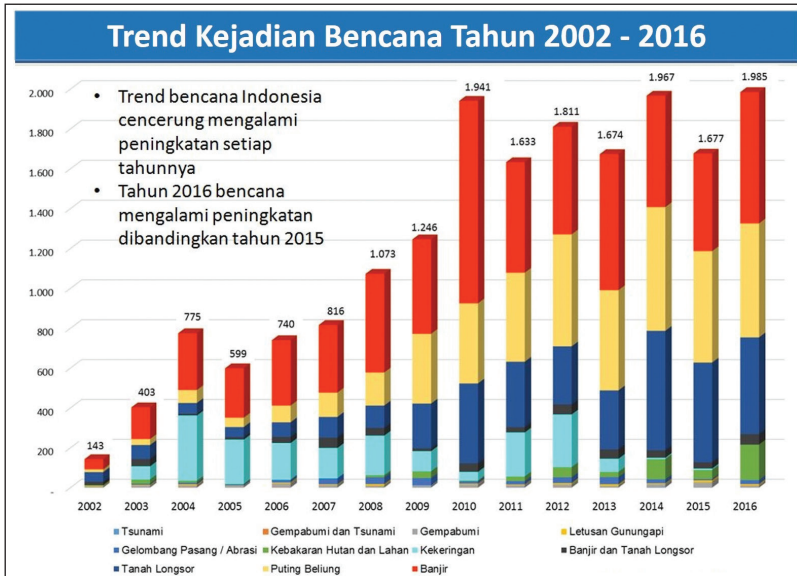
No.	Kejadian Gempa Bumi	Gunung Api yang Erupsi
1	Liwa, Lampung, 1932	G. Suoh, Lampung Barat, 1933
2	Pulau Nias, 2005	G. Talang, Sumatra Barat, 2005
3	Pulau Luzon, Filipina, 1990	G. Pinatubo, Filipina, 1991
4	Semenanjung Kamchatka, Rusia Timur, 1923	G. Kornotsky 1923, G. Zhupanovsky 1925, G. Koryasky 1926, terletak di Semenanjung Kamchatka, Rusia
5	Chili, Amerika Selatan, 1960	G. Copahue 1960, G. Nevados de Chillan 1965, terletak di Amerika Selatan
6	Guatemala, Amerika Tengah, 1902	G. Santa Maria 1902, G. Izalco 1902, terletak di Amerika Tengah
7	Aceh, Pulau Sumatra, 2004, 2012, 2016	Sinabung 2010, 2014–2018
8	Yogyakarta, dan Jawa Tengah, 2006, 2010	G. Merapi, 2006, 2010
9	Pulau Hawaii, Amerika Serikat, Mei 2018.	G. Kilauea, Hawaii, Amerika Serikat, Mei 2018.

Sumber: Diolah dari berbagai sumber.

B. Erupsi Gunung Api

Berdasarkan catatan Badan Nasional Penanggulangan Bencana, sejak tahun 2002 hingga 2016 telah terjadi peningkatan bencana di Indonesia. Tren kejadian bencana 2002–2016 (Gambar 1) menunjukkan bahwa bencana erupsi gunung api, tanah longsor, dan banjir meningkat secara signifikan.

Erupsi gunung api terjadi akibat terdorongnya magma keluar dari perut bumi oleh gas yang bertekanan tinggi atau karena gerakan lempeng bumi yang dipicu energi. Energi ini terbangkitkan karena terakumulasinya suhu tinggi dan energi dari cairan ultra panas magma. Ketika erupsi, gunung api menyemburkan material kasar berupa abu, pasir, dan batu, sedangkan material cair yang berupa lava panas meluap membanjiri daerah sekitarnya.



Sumber: Octobryan (2016)

Gambar 1. Tren Kejadian Bencana di Indonesia pada 2002–2016

Erupsi gunung api mengakibatkan korban jiwa, harta benda, dan lingkungan yang berada di wilayah radius ribuan kilometer di sekitar gunung api tersebut hancur dan tertimbun material vulkanik. Bila tingkat erupsi dari gunung api tersebut mempunyai magnitudo skala tinggi, siklus iklim di bumi ini dapat terpengaruh. Sebagai contoh, erupsi Gunung Api Krakatau di Provinsi Banten, Indonesia, pada 27 Agustus 1883.

Berdasarkan arsip online majalah *The Atlantic*, September 1884 erupsi Gunung Api Krakatau melontarkan material vulkanik sebanyak 45 kilometer kubik dan menyebar sejauh 442 kilometer dari pusat erupsi. Sebaran material vulkanik tersebut menutupi ujung barat Pulau Jawa dan selatan Pulau Sumatra, menyebabkan kegelapan yang sulit untuk ditembus mata dalam beberapa hari, cahaya matahari tak terlihat, siang hari seakan seperti malam hari, seolah Matahari tidak terbit daerah tersebut.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dampak dari erupsi Gunung Api Krakatau yang menelan korban sebanyak 36.417 jiwa tersebut juga dirasakan di seluruh penjuru dunia, dengan terjadinya perubahan iklim global. Dunia sempat gelap selama dua setengah hari akibat debu vulkanis yang menutupi atmosfer. Matahari bersinar redup sampai setahun berikutnya. Hamburan debu tampak di langit Norwegia hingga New York.

Selama 13 hari, lapisan sulfur dioksida dan gas-gas lain yang pada saat erupsi terlontar bersama material vulkanik, mulai menghambat jumlah sinar matahari untuk mencapai ke Bumi sehingga membuat fenomena optik yang aneh, seperti langit tampak merah darah. Di samping itu, gas sulfur dioksida (SO_2) yang terlontar tinggi ke lapisan stratosfer, karena pengaruh angin menyebar ke seluruh planet, mengakibatkan jumlah asam sulfat (H_2SO_4) di udara meningkat tajam. Akibat dari meningkatnya jumlah asam sulfat mempengaruhi curah hujan di California Selatan dan Los Angeles meningkat. Akibat dari tersebarnya unsur-unsur kimia ke penjuru dunia maka selama setahun pascaerupsi Gunung Api Krakatau rata-rata suhu global turun $1,2^\circ\text{C}$. Pola cuaca tetap tak beraturan selama bertahun-tahun, dan suhu tidak stabil hingga tahun 1888 (“Letusan Krakatau yang”, 2018).

Bencana yang ditimbulkan oleh erupsi gunung api tidak hanya terjadi di sekitar daerah erupsinya, tetapi juga dapat berdampak pada daerah yang luas. Jatuhan piroklastik bahan material vulkanik yang disebarkan ke udara saat terjadi erupsi terdiri dari batuan berukuran halus sampai besar. Batuan yang berukuran besar biasanya jatuh di sekitar kawah sampai radius 5 hingga 7 km dari kawah, sedangkan abu vulkanik yang berukuran halus ($< 2\mu\text{m}$) dapat jatuh dengan jarak mencapai ratusan bahkan ribuan kilometer dari kawah bergantung kecepatan angin. Ukuran, radius penyebaran, dan kandungan unsur kimia abu vulkanik yang keluar dari erupsi gunung api dapat menjadi ancaman bencana yang sangat berbahaya bagi manusia, tumbuhan, hewan, dan lingkungan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Hal inilah yang membuat erupsi gunung api dapat membahayakan nyawa manusia, harta benda, dan lingkungan yang berada di sekitar lokasi gunung api tersebut.

Bahaya erupsi gunung api dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu

1. Bahaya yang bisa berpengaruh secara langsung atau disebut bahaya primer. Bahaya primer biasanya terjadi bersamaan dengan proses erupsi gunung api tersebut, misalnya lelehan lava, awan panas, hujan abu, lahar panas, dan gas beracun.
2. Bahaya yang mengancam secara tidak langsung atau bahaya sekunder. Bahaya sekunder timbul setelah aktivitas erupsi gunung api selesai. Namun, ancaman bahaya yang bisa ditimbulkan bencana sekunder tidak kalah hebatnya dengan bahaya primer. Bencana ini sering kali terjadi ketika manusia sudah tidak lagi memberikan perhatian dan kewaspadaan terhadap bahaya gunung api tersebut, misalnya banjir lahar hujan, banjir bandang, dan longsoran vulkanik.

C. Bahaya Lahar

Pada sepuluh tahun terakhir ini, sebagian daerah di Indonesia cukup sering mengalami kejadian erupsi gunung api sehingga daerah-daerah tersebut rentan bencana banjir lahar. Banjir lahar terjadi akibat endapan material vulkanik yang belum stabil mendapat pasokan air hujan yang turun di daerah sekitarnya atau luapan air danau yang ada di kawahnya.

Istilah lahar berasal dari bahasa Jawa, dan pertama kali dipergunakan oleh Scrivenor pada 1929 saat terjadi aliran lahar di Gunung Api Kelud. Reinout Willem van Bemmelen, seorang ahli Geologi Belanda, mengartikan lahar sebagai suatu aliran sedimen vulkanik yang terangkut aliran air (Lavigne, Thouret, Voight, Suwa, & Sumaryono, 2000a).

Material lahar merupakan gabungan material piroklastik dan komposisi air yang jumlahnya jauh lebih besar sehingga bahaya

yang ditimbulkan oleh aliran lahar dapat lebih luas dan bersifat menyebarkan. Lahar umumnya mengalir mengikuti alur-alur sungai yang berhulu dari gunung api yang dampaknya sulit untuk diprediksi.

Aliran lahar merupakan bentuk pergerakan sedimen massa atau *mass movement*. Proses pembentukan aliran lahar biasanya terjadi di lereng-lereng sekitar puncak gunung api dan hulu sungai yang terpencil. Tempat tersebut merupakan area mengendapnya material vulkanik hasil dari erupsi gunung api, guguran awan panas, dan longsor kubah lava.

Aliran lahar mempunyai daya rusak tinggi karena aliran dengan angkutan sedimen ini bersifat kolektif, mempunyai konsentrasi sangat tinggi, dan meluncur melalui lereng dan alur sungai atau lembah curam dengan membawa batu-batu besar dan material lain, seperti batang-batang pohon. Komponen utama pembentuk aliran lahar adalah material sedimen yang melimpah pascaerupsi gunung api, lereng yang terjal, pasokan air hujan, dan gaya gravitasi. Aliran lahar berpotensi menimbulkan bencana dan mengakibatkan jatuhnya korban jiwa, kerugian harta benda, kerusakan lingkungan, dan dampak psikologis.

Pembangunan nasional yang bergulir hingga saat ini membuat pembangunan industri baru meningkat. Hal ini mendorong peningkatan arus urbanisasi dan cenderung menyebabkan bertambahnya beban lingkungan perkotaan. Pembukaan industri baru di suatu daerah akan mendatangkan banyak tenaga kerja dan menyebabkan semakin berkurangnya lahan permukiman di daerah tersebut. Akibatnya, banyak warga yang membangun permukiman baru, bahkan karena terbatasnya dana dan pemahaman bencana, tidak sedikit dari mereka mendirikan bangunan permukiman di bantaran hilir sungai. Aliran lahar yang melimpas keluar dari alur sungai sangat berbahaya bagi masyarakat yang tinggal di daerah hilir. Hal ini karena kekuatan banjir lahar dapat menghancurkan tebing sungai yang menghalanginya, memporandakan permukiman, struktur dan infrastruktur yang dilewatinya serta

akhirnya menimbun daerah permukiman dan fasilitas umum yang berada di daerah paling hilir.

Menurut proses pembentukannya, lahar dapat dibedakan dalam dua jenis bahaya, yaitu bahaya lahar primer dan bahaya lahar sekunder.

1. Bahaya lahar primer

Bahaya lahar primer terjadi pada gunung api yang mempunyai danau kawah, seperti Gunung Api Kelud, Semeru, dan Galunggung. Bahaya lahar primer merupakan aliran piroklastik pascaerupsi gunung api yang bercampur dengan air danau kawah yang jumlahnya jutaan meter kubik, membentuk aliran lahar, lalu mengalir ke sungai. Bahaya dari lahar primer sering juga disebut banjir lahar panas.

2. Bahaya lahar sekunder

Bahaya lahar sekunder ialah material piroklastik pascaerupsi gunung api yang mengendap di sekeliling kepundan, kerucut dan lereng, serta lembah yang saat musim hujan berpotensi menjadi aliran lahar. Air hujan di bagian hulu yang jumlahnya 30% dari volume material vulkanik yang mengendap sudah mampu memicu terjadinya pergerakan material tersebut. Aliran material kemudian mengalir ke hilir sebagai aliran lumpur dengan berat jenis tinggi. Karena pengaruh gaya gravitasi, lahar tersebut mengalir dengan kecepatan tinggi sehingga mempunyai daya rusak tinggi. Bahaya lahar sekunder ini biasanya disebut banjir lahar hujan.

D. Pengendalian Banjir Lahar

Sesuai dengan amanat Undang-Undang No. 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, pemerintah pusat dan daerah bertanggung jawab dalam penyelenggaraan penanggulangan bencana. Penanggulangan tersebut mulai dari tahap prabencana, saat tanggap bencana, sampai dengan pascabencana. Berdasarkan undang-

undang tersebut, pemerintah berkewajiban melakukan kegiatan penanggulangan bencana bersama masyarakat. Karena gunung api aktif di Indonesia tersebar hampir di seluruh wilayah, ancaman banjir lahar pun dapat terjadi di daerah-daerah tersebut. Dalam usaha mengurangi korban jiwa dan harta benda, perlu dilakukan upaya mitigasi bencana sebagai usaha pengendalian banjir lahar.

Pengendalian banjir lahar dapat dilakukan dengan mengaplikasikan teknologi sabo, di antaranya teknologi sabo dengan metode struktur (fisik) dan teknologi sabo dengan metode nonstruktur (nonfisik).

1. Teknologi sabo dengan metode struktur

Dalam metode ini, teknologi sabo yang digunakan untuk mengendalikan aliran lahar ditekankan pada upaya-upaya fisik. Hal ini dilakukan dengan membangun bangunan sabo atau bangunan pengendali sedimen (BPS) beserta fasilitasnya di alur sungai yang dialiri aliran lahar. Contoh bangunan sabo adalah check dam, dam konsolidasi (*consolidation dam*), krib, dan tanggul.

2. Teknologi sabo dengan metode nonstruktur

Teknologi sabo untuk mengendalikan aliran lahar dalam metode ini ditekankan pada usaha-usaha di luar membangun struktur bangunan (nonfisik). Hal ini bisa dilakukan dengan membuat sistem prakiraan dan peringatan dini, membuat peta rawan bencana, sosialisasi ke masyarakat untuk meningkatkan kewaspadaan, dan relokasi.

Bab 2

Sistem Peringatan Dini Bencana



A. Penanggulangan Bencana

Menurut Undang-Undang Penanggulangan Bencana No. 24 tahun 2007, bencana ialah suatu peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat. Bencana dapat disebabkan oleh faktor alam, faktor nonalam, dan faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis.

Pada hakikatnya, bencana adalah sesuatu yang tidak dapat terpisahkan dari kehidupan. Pandangan ini memberikan arahan bahwa bencana harus dikelola secara menyeluruh sejak prabencana, tanggap bencana, dan pascabencana. Pengelolaan ini memerlukan prakarsa pemerintah dan partisipasi masyarakat yang dikemas dan diatur dalam suatu manajemen bencana. Dalam manajemen bencana, tugas dan kewajiban pemerintah dan masyarakat diatur secara bersama-sama sehingga antara pemerintah sebagai pemrakarsa dan partisipasi masyarakat dapat saling melengkapi. Manajemen bencana difokuskan pada kegiatan pencegahan, mitigasi,

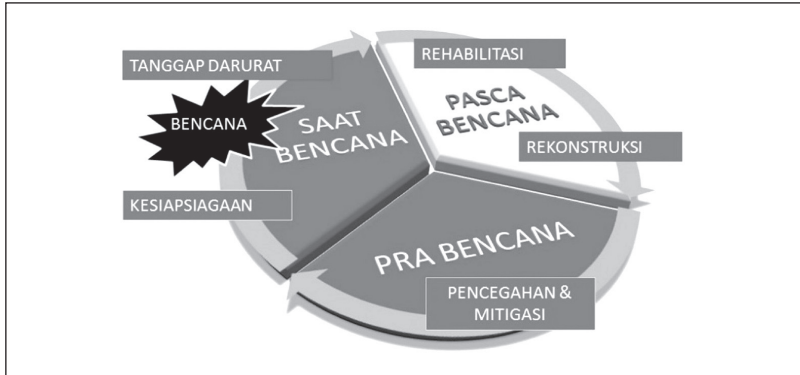
Buku ini tidak diperjualbelikan.

kesiapsiagaan dan kewaspadaan untuk memperkecil, mengurangi dan memperlunak dampak yang ditimbulkan bencana alam atau nonalami.

Penanggulangan bencana ialah segala upaya atau kegiatan dalam rangka pencegahan, mitigasi, kesiapsiagaan, tanggap darurat, dan pemulihan yang berkaitan dengan bencana. Kegiatan tersebut dilakukan pada saat prabencana, tanggap bencana, dan pascabencana untuk mencegah, mengurangi, menghindari dan memulihkan diri dari dampak bencana.

Sebelum berlakunya Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, penanggulangan bencana di Indonesia masih menganut paradigma kedaruratan (*emergency*) dan bantuan (*relief*). Artinya, penanggulangan bencana dilakukan hanya pada saat terjadi bencana saja (Andriyanto, 2011). Namun, setelah diberlakukannya Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007, penanggulangan bencana dilakukan dalam tahapan sebagai berikut.

1. Tahap prabencana. Tahap ini terdiri dari kegiatan pengurangan risiko bencana dan membangun kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi bencana. Tujuannya meminimalisasi potensi dampak bencana, seperti jumlah korban, kerusakan, kerugian, dan dampak lainnya.
2. Tahap tanggap darurat bencana. Tahap ini merupakan usaha cepat tanggap dalam menolong dan mengurangi penderitaan korban bencana. Tujuan tahap ini adalah menyelamatkan lebih banyak nyawa agar korban jiwa tidak bertambah.
3. Tahap pascabencana. Tahap ini terdiri dari rehabilitasi dan rekonstruksi pascabencana. Tujuannya adalah memulihkan kondisi pascabencana dengan membangun kembali daerah pascabencana.



Sumber: Piko (2016)

Gambar 2. Siklus Penanggulangan Bencana

Siklus tahapan penanggulangan bencana seperti pada Gambar 2.

Tahapan kegiatan penanggulangan bencana perlu disusun sesuai dengan rencana (*disaster management plan*). Rencana tahapan penanggulangan bencana dapat dilihat pada Gambar 3, sedangkan tahapan penyusunannya adalah sebagai berikut.

1. Tahap prabencana

Dalam situasi tidak terjadi bencana, dilakukan penyusunan rencana penanggulangan bencana (*disaster management plan*). Rencana ini bersifat umum, menyeluruh, dan meliputi seluruh bidang kerja kebencanaan. Jika diketahui terdapat potensi bencana, dilakukan penyusunan rencana kesiapsiagaan atau rencana penanggulangan bencana didasarkan atas skenario menghadapi bencana tertentu berupa usaha pencegahan dan mitigasi bencana. Rencana yang disusun dalam tahap prabencana ini disebut rencana kontingensi (*contingency plan*).

2. Tahap bencana

Pada tahap ini, dilakukan rencana operasi (*operational plan*). Rencana ini merupakan operasionalisasi atau aktivasi rencana

Buku ini tidak diperjualbelikan.

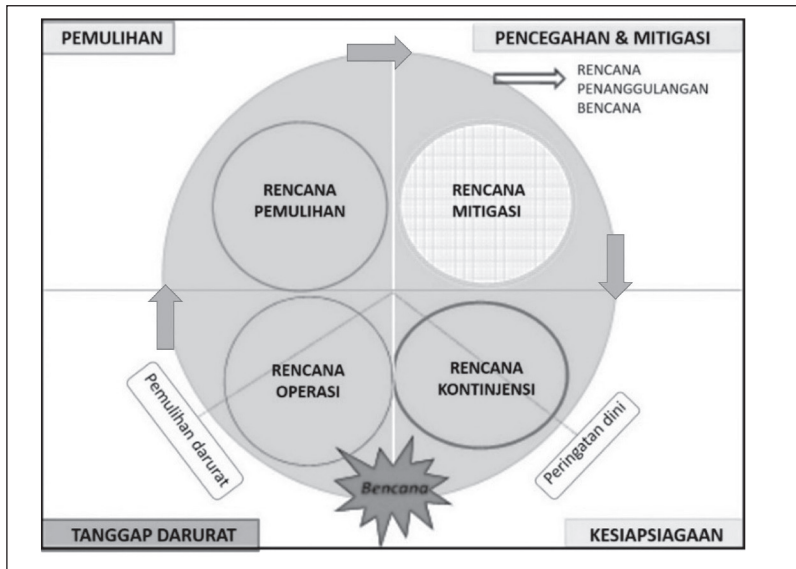
ke daruratan berupa kesiapsiagaan dan tanggap darurat yang telah disusun dalam rencana kontingensi sebelumnya.

3. Tahap pascabencana

Pada tahap ini dilakukan penyusunan rencana pemulihan (*recovery plan*) yang meliputi rencana rehabilitasi dan rekonstruksi. Jika bencana belum terjadi, untuk mengantisipasi kejadian bencana pada masa mendatang, dilakukan penyusunan petunjuk atau pedoman penanggulangan pascabencana.

B. Sistem Peringatan Dini

Penyiapan dan pemasangan instrumen sistem peringatan dini (*early warning system*) merupakan perwujudan rencana kesiapsiagaan pada tahap prabencana setelah didapati ada potensi bencana. Kegiatan pemasangan instrumen ini dilakukan untuk keadaan darurat



Sumber: Widiyatmoko (2011)

Gambar 3. Rencana Tahapan Penanggulangan Bencana

Buku ini tidak diperjualbelikan.

yang didasarkan atas skenario menghadapi bencana tertentu, misalnya erupsi gunung api, banjir lahar, banjir bandang, tanah longsor, dan tsunami.

Sistem peringatan dini merupakan mata rantai yang menghubungkan antara tindakan-tindakan dalam kesiapsiagaan dengan kegiatan dalam tanggap darurat. Ada tiga faktor yang berperan dalam kerangka sistem peringatan dini, yaitu

1. Pihak pengambil keputusan (BNPB/BPBD);
2. Pihak terkait yang ikut bertanggung jawab dalam penurunan risiko bencana (lembaga pemerintah, TNI/POLRI, lembaga nonpemerintah, perguruan tinggi/lembaga penelitian, swasta, media, lembaga internasional);
3. Masyarakat yang terdampak bencana.

Masyarakat berperan serta dalam kegiatan sistem peringatan dini karena telah memiliki unsur pengetahuan (*knowledge*), sikap (*attitude*), dan perilaku (*behaviour*). Namun, unsur-unsur yang telah ada tersebut harus ditunjang dengan pengenalan sistem peringatan dini. Masyarakat yang telah memperoleh pengetahuan atau informasi tentang sistem peringatan dini diharapkan mengalami perubahan sikap (yang positif) terhadap sistem tersebut. Perubahan ini diharapkan mampu membuat masyarakat berperilaku positif terhadap sistem itu.

Faktor lain yang berperan dalam kerangka kerja sistem peringatan dini adalah pihak pengambil keputusan. Berdasarkan peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) Nomor 4 tahun 2008, penanggulangan bencana, penanganan pengungsi, dan penyusunan rencana penanggulangan bencana dikoordinasikan oleh BNPB di tingkat nasional; Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) provinsi di tingkat provinsi; dan BPBD kabupaten/kota di tingkat kabupaten/kota. Melalui institusi-institusi tersebut, kebijakan-kebijakan yang berhubungan dengan sistem peringatan

dini, terutama hal-hal yang berkaitan dengan kerangka dan mekanisme kerja, dapat disusun.

Dengan demikian, sistem peringatan dini sebagai subsegmen awal dalam tahap kesiapsiagaan dapat berperan dengan baik sehingga ketika suatu bencana terjadi, tingkat keparahannya dapat dikendalikan. Kerangka kerja konseptual yang baik dan sistem peringatan dini sebagai mata rantai yang menghubungkan antara tindakan kesiapsiagaan dengan kegiatan tanggap darurat akan menghasilkan kegiatan penanggulangan kerugian akibat bencana. Pada akhirnya, korban akibat bencana dapat dikurangi.

Tugas dan kewajiban pemerintah serta partisipasi masyarakat dalam penanggulangan bencana ditentukan dalam mekanisme penanggulangan bencana sebagai berikut.

1. Pada prabencana, fungsi pemerintah (dalam hal ini BPBD) bertindak sebagai koordinator dan pelaksana;
2. Pada saat bencana atau darurat, BPBD bertindak sebagai koordinator, komando, dan pelaksana;
3. Pada pascabencana, BPBD bertindak sebagai koordinator dan pelaksana;
4. Pada saat darurat, masyarakat sebagai korban bencana diharapkan juga mampu dalam batasan tertentu ikut berperan dalam menangani penanggulangan bencana agar bencana tidak berkembang ke skala yang lebih besar.

C. Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Internet *Broadband*

Pada saat ini, perkembangan jaringan internet di Indonesia masih terus berlangsung. Namun, layanan internet kabel konvensional masih belum banyak tersedia di daerah terpencil sehingga penduduk yang tinggal di daerah-daerah tersebut sulit berkomunikasi dengan dunia luar. Setelah adanya pengembangan media transmisi nirkabel, spektrum frekuensi radio memiliki peranan strategis

dalam pengembangan jaringan telekomunikasi, termasuk pembangunan jaringan pita lebar berbasis nirkabel (*broadband wireless access*).

Jaringan *broadband* merupakan akses internet dengan kecepatan tinggi yang memungkinkan koneksi internet secara cepat dan tanpa putus “*always on*”. Secara sederhana, *broadband* memberikan jalan yang lebar untuk koneksi internet sehingga kecepatannya jauh lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan koneksi modem *dial-up* biasa. Kecepatan jaringan *broadband* bahkan mencapai 10–20 kali kecepatan modem *dial-up* yang ada saat ini.

Dengan adanya jaringan *broadband* yang berbasis satelit, hadir pilihan dalam berkomunikasi, bahkan saat layanan seluler tidak berfungsi ketika bencana. Karena spektrum frekuensi radio layanan akses pita lebar berbasis nirkabel (*broadband*) dapat dimanfaatkan untuk komunikasi dalam kondisi darurat, perlu dilakukan penataan frekuensi. Dengan penataan tersebut, ada alokasi frekuensi untuk keperluan pertahanan dan keamanan negara, penanggulangan bencana, pencarian dan pertolongan, serta sebagai sarana komunikasi untuk keperluan internal perusahaan, badan hukum, ataupun instansi pemerintah.

Pada 2005, Kementerian Komunikasi dan Informatika (dalam hal ini Direktorat Jenderal Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika) dapat memberikan izin pengoperasian suatu perangkat telekomunikasi kepada setiap orang perseorangan dan/atau badan hukum. Hal ini sebagai usaha mengatasi terbatasnya jaringan internet di daerah terpencil, khususnya dalam kondisi darurat ketika layanan seluler tidak berfungsi. Namun, pemberian izin ini hanya pada spektrum frekuensi radio 2,4/5,8 GHz dan harus menggunakan perangkat yang disertifikasi Kementerian Komunikasi dan Informatika.

Izin pengoperasian perangkat telekomunikasi spektrum frekuensi radio *wireless broadband* pita 2,4/5,8 GHz yang tidak berbayar dapat mengurangi biaya akses internet. Kebijakan tersebut

dapat meningkatkan jumlah penggunaan internet di daerah pinggiran kota dan menambah pemanfaatan internet untuk keperluan sosial kemasyarakatan. Lebih lanjut, pemanfaatan internet untuk keperluan sosial kemasyarakatan membuka peluang bagi pemantauan dan penyebarluasan informasi kondisi darurat atau sistem peringatan dini terjadinya bencana alam.

Sistem peringatan dini bencana yang andal harus dapat menurunkan risiko bencana dengan menjamin ketersediaan sistem informasi prakiraan terjadinya bencana dan waktu tiba bencana di daerah yang diperkirakan terdampak secara cepat dan terkoordinasi. Untuk mendukung pengiriman data-data lapangan yang terletak di daerah terpencil kepada pengelola sistem peringatan dini, digunakanlah perangkat telekomunikasi spektrum frekuensi radio *wireless broadband*. Sementara itu, penyebarluasan informasi kepada pengguna dilakukan menggunakan jaringan internet, baik dengan sistem *wireless broadband* maupun kabel.

Informasi yang dikirimkan pengelola sistem peringatan dini kepada instansi terkait biasanya meliputi informasi yang menunjukkan fenomena bencana yang akan dihadapi, disertai data-data pendukung yang dapat memprakiraan risiko bencana yang akan terjadi. Informasi tersebut diperoleh dengan memasang peralatan hidrologi dan kamera berbasis web di lapangan. Dengan adanya peralatan dan kamera tersebut, data yang diperoleh di stasiun induk pengendali tidak hanya berupa data angka, tetapi juga gambar dan video. Dengan sistem internet *broadband*, data yang berbentuk video dapat dikirimkan ke stasiun induk pengendali melalui *streaming video*.

Pengiriman data *streaming video* dari stasiun seismograf deteksi lahar yang dilengkapi kamera pemantau ke stasiun induk pengendali dilakukan dengan membagi-bagi file tersebut dalam paket file video. Selanjutnya, paket file video ditransmisikan dari stasiun seismograf deteksi lahar yang dilengkapi kamera pemantau ke stasiun induk pengendali. Setelah paket file video diterima di

stasiun induk pengendali, dilakukan proses penafsiran kode (*decoding*) dan paket file disusun kembali menjadi file video agar dapat disajikan tanpa harus menunggu seluruh file video selesai terkirim.

File video yang diterima di stasiun induk pengendali disimpan di server komputer. Dengan begitu, file secara langsung dapat diakses di komputer operator sesaat setelah ada permintaan. Jadi, proses mengunduh file yang menghabiskan waktu cukup lama dapat dihindari.

Ketika file dikirimkan dalam format *streaming* akan terbentuk *buffer* di komputer stasiun induk, dan data video tersebut akan mulai diunduh ke dalam *buffer* tersebut. Setelah *buffer* terisi file video dalam waktu hitungan detik, file tersebut secara otomatis akan dijalankan oleh sistem. Sistem akan membaca informasi dari *buffer* sambil tetap mengunduh file hingga proses *streaming* tetap berlangsung ke perangkat di stasiun induk. *Delay* waktu sesaat sebelum file video dijalankan berkisar antara 5 sampai 30 detik.

Bab 3

Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar



Sistem peringatan dini banjir lahar merupakan sistem yang mengintegrasikan kegiatan-kegiatan pemantauan kondisi terkini parameter-parameter yang memicu terjadinya banjir lahar. Hasil pengolahan data pemantauan tersebut kemudian menjadi informasi peringatan dini dan disebarluaskan kepada warga yang tinggal di daerah yang diperkirakan terdampak sesegera mungkin.

A. Metode Konvensional

Metode ini dilakukan dengan mengenali gejala alam yang timbul di sekitar daerah bencana dan biasanya telah menjadi kearifan lokal di daerah tersebut. Beberapa gejala alam tersebut misalnya terdapat endapan material vulkanik di daerah hulu, terjadi hujan di daerah endapan vulkanik, terdengar suara gemuruh dari arah hulu sungai, air sungai berubah menjadi keruh, dan aliran sedimen dasar sungai ke hilir yang sangat cepat. Sistem pemantauan data dan penyebaran informasi dalam metode konvensional ini telah didukung dengan peralatan radio komunikasi, tetapi masih dilakukan secara manual.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

B. Metode Garis Kritis

Metode ini digunakan untuk membuat prakiraan banjir lahar berdasarkan data curah hujan per jam dan data kejadian banjir lahar. Data curah hujan tiap jam dan data kejadian banjir lahar diperoleh dengan memasang peralatan penakar curah hujan dan pemantau banjir lahar di dalam satu daerah aliran sungai yang sama. Pengiriman datanya dilakukan dengan sistem telemetering. Peralatan penakar curah hujan yang digunakan dari jenis *tipping bucket*, sedangkan pemantau banjir lahar menggunakan sensor getaran atau sensor kabel. Peralatan penakar curah hujan dipasang di dekat endapan vulkanik, sedangkan peralatan pemantau banjir lahar dipasang di sebelah hilir lokasi penakar curah hujan.

Kumpulan data curah hujan dan kejadian banjir lahar yang diterima di stasiun induk selama dua kali musim hujan dianalisis menggunakan perangkat lunak untuk menetapkan garis kritis prakiraan terjadinya banjir lahar. Garis kritis curah hujan diperoleh dari garis lurus yang memisahkan titik-titik plot curah hujan yang menimbulkan banjir lahar dan titik-titik plot curah hujan yang tidak menimbulkan banjir lahar. Dengan kata lain, garis kritis ialah kondisi rata-rata antara curah hujan yang menimbulkan aliran lahar dan yang tidak menimbulkan aliran lahar (lihat Gambar 4).

1. Persamaan Garis Kritis

Untuk memprakirakan berapa jumlah curah hujan yang dapat memicu terjadinya aliran lahar digunakan persamaan Garis Kritis. Teori Garis Kritis menghadirkan garis batas yang menunjukkan banjir lahar berpotensi untuk terjadi atau tidak terjadi. Persamaan ini merupakan pemisahan kondisi rata-rata antara curah hujan yang menimbulkan aliran lahar (disimbolkan segitiga) dan curah hujan yang tidak menimbulkan aliran lahar (disimbolkan lingkaran) melalui garis regresi (MLIT, 2005). Dengan demikian, daerah yang berada di sebelah kanan garis regresi atau garis kritis merupakan daerah bahaya aliran lahar sedang daerah yang berada di sebelah

kiri merupakan daerah yang aman. Variabel pemicu banjir lahar yang digunakan sebagai patokan antara lain intensitas curah hujan tiap jam (*one hour rainfall intensity*, R_h , mm/h), curah hujan kumulatif yang menghitung efek dari 2 atau 3 periode hujan yang membentuk satu kesatuan hujan seri (*working rainfall*, R_w , mm).

Apabila besarnya nilai variabel pemicu melebihi garis kritis (*critical line*) maka dapat diramalkan bahwa banjir lahar berpotensi besar untuk terjadi, seperti dalam Gambar 4, di mana (a) adalah titik potong garis kritis dengan intensitas curah hujan/jam, (R_h) atau sumbu Y; (b) adalah kemiringan garis kritis, didapat dari titik potong garis kritis dengan intensitas curah hujan/jam, (R_h) dan curah hujan kumulatif yang menghitung efek dari 2 atau 3 periode hujan yang membentuk satu kesatuan hujan seri, (R_w) atau sumbu X; X adalah titik potong garis kritis yang menghubungkan titik potong (R_h) yang berada di sumbu Y dengan titik potong (R_w) di sumbu X.

Berdasarkan Gambar 4. Garis kritis terjadi pada saat intensitas curah hujan/jam, (R_h) = 42 mm/jam dan curah hujan kumulatif yang menghitung efek dari 2 atau 3 periode hujan yang membentuk satu kesatuan hujan seri, (R_w) = 550 mm.

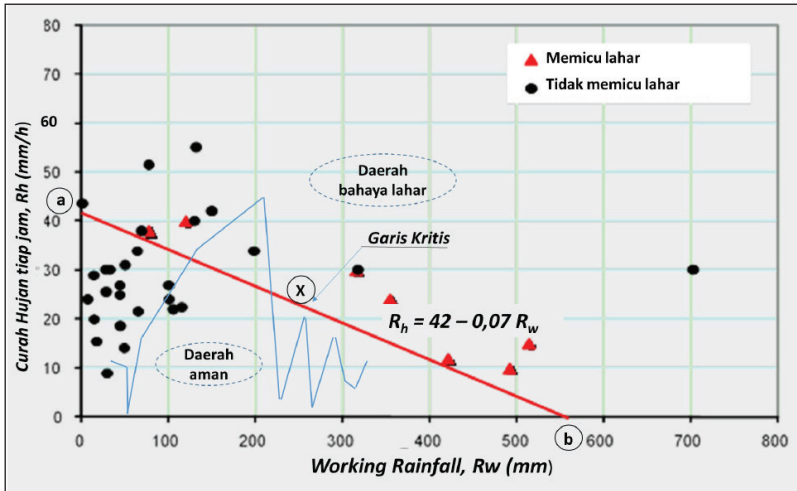
Persamaan garis lurus $Y = a - bX$

Maka di dalam Gambar 4 persamaan garis kritisnya adalah:
 $R_h = 42 - 0,07 R_w$

Model curah hujan kritis tersebut diinput ke dalam perangkat lunak di stasiun sistem prakiraan dan peringatan dini banjir lahar. Jadi, ketika curah hujan mencapai nilai kritis, masyarakat yang berada di sekitar alur kali lahar dapat segera diberi tahu agar mengungsi sehingga terhindar dari bencana lahar.

2. Simulasi Banjir Lahar

Simulasi dilakukan menggunakan aplikasi model simulasi aliran lahar yang tersedia di pasaran. Simulasi banjir lahar menggunakan



Gambar 4. Model Hujan Kritis yang diprogramkan di Stasiun Induk

model simulasi 2D aliran lahar berdasarkan *digital elevation model* (DEM), data curah hujan efektif, dan hidrograf satuan sintetik. Penggambaran peta bahaya banjir lahar dilakukan dengan perangkat lunak pengolah data spasial berdasarkan hasil simulasi banjir lahar yang dilakukan dengan *input* data curah hujan efektif dengan berbagai nilai tertentu. Berbagai nilai data curah hujan efektif yang di-*input* ke model simulasi pada daerah aliran sungai (DAS) yang diamati akan menghasilkan berbagai sebaran aliran lahar yang terjadi di sepanjang sungainya.

Beberapa nilai curah hujan efektif yang di-*input* ke dalam model simulasi dengan DAS yang sama, akan menghasilkan sebaran aliran lahar. Lahar tersebut ada yang mengalir pada alur sungai dan ada pula yang melimpas. Terjadinya limpasan di alur sungai dipicu oleh nilai curah hujan efektif, dan nilai tersebut digolongkan sebagai nilai hujan bahaya (*warning*).

Beberapa data nilai curah hujan efektif yang menghasilkan sebaran aliran lahar melimpas pada sungai dikumpulkan dalam

suatu basis data hujan kritis. Jadi, bila di lapangan terdeteksi hujan dengan nilai mendekati basis data hujan kritis, data tersebut dapat digunakan sebagai informasi peringatan untuk sistem peringatan dini banjir lahar.

3. Pengembangan Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar

Untuk mewujudkan sistem peringatan dini banjir lahar yang andal, dirancang pengembangan dari sistem peringatan dini banjir lahar yang telah ada. Sistem peringatan dini banjir lahar ini berbasis pemantauan getaran dan analisis data visual.

Sistem ini bekerja dengan mengintegrasikan beberapa kegiatan pemantauan kondisi terkini parameter pemicu terjadinya banjir lahar. Pemantauan tersebut menggunakan peralatan sensor getaran dan video kamera berbasis protokol jaringan internet *broadband*. Agar data hasil pemantauan dapat diolah menjadi informasi peringatan dini, digunakan modul perangkat lunak yang beroperasi secara otomatis dan berurutan sesuai dengan perintah-perintah yang telah ditentukan.

Pengiriman data dari stasiun pemantau di lapangan ke stasiun induk pengendali menggunakan jaringan internet *broadband*. Hal ini karena stasiun pemantaunya berada di daerah terpencil dan data yang dikirimkan berkapasitas besar.

Protokol komunikasi dengan jaringan internet *broadband* (*transmission control protocol/internet protocol broadband*) diimplementasikan dalam bentuk program komputer. Program komputer ini didesain agar dapat melakukan fungsi-fungsi komunikasi data sehingga data yang dikirimkan dapat diterima di stasiun induk pengendali tanpa mengalami distorsi.

Penyebarluasan informasi peringatan dini banjir lahar kepada instansi terkait dan warga yang tinggal di daerah yang diperkirakan terdampak dilakukan dengan jaringan internet. Jaringan internet dipilih untuk menyebarluaskan informasi ini karena dapat mengirimkan informasi berupa data angka dan video dengan cepat.

Bab 4

Pengembangan Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir



Pengembangan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir dilakukan agar institusi pengelola peralatan dapat memberikan informasi lengkap perihal terjadinya aliran lahar kepada instansi terkait dan masyarakat yang berpotensi terdampak. Dengan demikian, usaha pengendalian serta penyelamatan bisa dilakukan secara cepat dan akurat.

Keluaran dari sistem ini adalah suatu peringatan dini berupa informasi terjadinya aliran lahar di hulu sungai yang diamati dan informasi prakiraan waktu tiba banjir lahar di daerah yang berpotensi terdampak. Informasi terjadinya aliran lahar di hulu sungai yang diamati disampaikan dalam format video yang disertai data tinggi atau elevasi dan kecepatan lahar. Saat aliran lahar di hulu sungai telah mencapai level “bahaya,” aplikasi dalam sistem tersebut mengeluarkan peringatan (*warning*) yang dapat disebarluaskan melalui pesan singkat/SMS dan surat elektronik/surel. Terdeteksinya aliran lahar pada level *warning* ini juga dimanfaatkan aplikasi lain yang ada dalam sistem untuk memerintahkan perekam data di stasiun induk agar merekam aliran lahar yang terpantau di lapangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Di samping itu, terdeteksinya aliran lahar pada level *warning* juga dimanfaatkan aplikasi dalam sistem untuk memprakirakan waktu tiba banjir lahar di daerah yang berpotensi terdampak.

Memprakirakan kecepatan waktu tiba banjir lahar di daerah yang diperkirakan terdampak dilakukan dengan membandingkan jarak bangunan sabo dan fasilitas bangunan air di sepanjang sungai yang diamati dengan kecepatan rata-rata aliran lahar yang terjadi di lapangan. Nilai kecepatan rata-rata aliran lahar diperoleh dengan membandingkan jarak dua lokasi pemasangan sensor geophone di stasiun seismograf deteksi lahar awal serta di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera dengan selisih waktu terdeteksinya sinyal seismik lahar di tiap stasiun seismograf deteksi lahar.

Nilai kecepatan rata-rata aliran lahar yang lebih akurat diperoleh dengan mengalibrasi hasil nilai aliran lahar. Nilai ini dihitung berdasarkan beda waktu terdeteksinya sinyal seismik dengan nilai aliran lahar (diperoleh dari hasil analisis data video pemantauan kamera di stasiun deteksi lahar dan kamera menggunakan aplikasi pengolah data visual di stasiun induk). Untuk keakuratan data analisis sinyal seismik dari kedua stasiun seismograf deteksi lahar dan menghitung kecepatan rata-rata aliran lahar, digunakan aplikasi program komputer berupa modul *Earthworm*.

A. Modul *Earthworm*

Modul *Earthworm* merupakan perangkat lunak yang dikembangkan United States Geological Survey (USGS) sejak 1993. Modul tersebut tergolong modul tidak berbayar yang telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan pengguna jaringan seismik regional. Kebutuhan tersebut hadir karena semakin meningkatnya biaya pemeliharaan jaringan, perolehan data pengamatan yang kurang akurat, terbatasnya jumlah data yang diproses, dan lamanya waktu yang diperlukan dalam pemrosesan data.

Modul *Earthworm* dibuat khusus untuk akuisisi data seperti dalam pengolahan data seismik. Beberapa hal yang dapat dilakukan aplikasi ini adalah digitalisasi bentuk gelombang analog, menyeleksi datangnya fase seismik secara *real time*, menentukan skala besaran dan lokasi titik pusat sumber getaran, dan mengirim informasi ke situs web. Bahasa pemrograman modul ini dirancang sedemikian rupa sehingga memungkinkan untuk dioperasikan dengan Linux, Solaris, Mac OS X, dan Windows.

Modul *Earthworm* dirancang sebagai alat terapan sistem pengolahan data yang menggunakan bahasa pemrograman tertentu dan terpadu agar mampu memproses data seismik. Agar kinerjanya lebih efisien, dalam modul tersebut ada beberapa aplikasi yang digabung menjadi suatu paket atau suit aplikasi (*application suite*).

Untuk memudahkan pengguna mempelajari dan menggunakan tiap aplikasi dalam modul tersebut, disediakan beberapa layanan antarmuka (*interface*) sebagai sarana interaksi antara pengguna dengan sistem operasi. Karena bersentuhan langsung dengan pengguna, layanan antarmuka dalam modul *Earthworm* dirancang dengan kesamaan dalam sistem pengoperasiannya. Dengan demikian, pengguna terbantu dalam menyiapkan data yang hendak diolah, melakukan pengolahan data, menyeleksi dan menetapkan data ketika mencapai besaran nilai tertentu, menyimpan dan menampilkan data agar mudah menemukannya kembali serta memahaminya. Modul *Earthworm* mudah dioperasikan sehingga banyak digunakan dalam monitoring aktivitas vulkanis gunung api dan seismik gempa bumi. Dengan kemampuannya tersebut, modul *Earthworm* telah digunakan lebih dari 180 organisasi di dunia (Isti, 2013).

Dalam perkembangannya, modul *Earthworm* mampu mendukung jaringan transfer data dan beradaptasi dengan berbagai teknologi serta macam-macam strategi pemrosesan bentuk gelombang. Dengan modul tersebut, perangkat seismometer dan *digitizer* dari berbagai produsen perangkat keras dapat mengeksport data ke

pusat penyimpanan memori. Berbagai modul pemrosesan data lainnya dapat bersinergi untuk diproses dalam data memori bersama. Penggunaan modul *Earthworm* untuk berbagai bentuk gelombang seismo-gunung api, yang dihubungkan dengan perangkat lunak peringatan dini, dapat mengontrol perolehan dan pemrosesan data secara efisien dan luas (Friberg, Lisowski, Dricker, & Sidney, 2010).

Banyak pakar dan lembaga riset dunia telah menggunakan modul *Earthworm*. Sebagai contoh, Taiwan menggunakan *Earthworm* untuk sistem otomatis perhitungan parameter sumber gempa lokal secara *real-time* (Chen, Hsiao, & Wu, 2015). Selain untuk sistem otomatis perhitungan parameter sumber gempa lokal secara *real-time*, modul, *Earthworm* juga dapat mengimplementasi berbagai macam algoritma penentuan waktu kedatangan seismik, magnitudo gempa bumi, dan parameter sumber gempa (Stepnov, Konovalov, Gavrilov, & Manaychev, 2017). Di samping itu, modul *Earthworm* dimanfaatkan dalam pengamatan hubungan antara aktivitas vulkanik dengan gempa bumi tektonik besar di zona seismik aktif (Eggert & Walter, 2009).

Contoh lainnya, Pusat Gempa Nasional Pengawasan Seismik Italia memanfaatkan *Earthworm* yang dilengkapi sistem *buffering* untuk penyimpanan data lintas *platform* ke dalam database. Hal ini dilakukan agar kontinuitas layanan data dari beberapa aplikasi *Earthworm* yang berjalan secara paralel masih tetap terlayani meskipun terjadi gangguan dalam server atau sedang ada pemeliharaan *database* (Quintiliani & Pintore, 2013).

Pusat penelitian Seismik Universitas Hindia Barat, Gordon Street, St Augustine, Trinidad, Trinidad dan Tobago juga menggunakan *Earthworm* untuk jaringan pemantauan Gunung Api Pelée yang dibangun pada 1953. Erupsi dahsyat Gunung Api Pelée yang terletak di Pulau Trinidad di Karibia Timur kepulauan Laut Karibia pada 8 Mei 1902 mengakibatkan 30.000 orang meninggal. Untuk mencegah korban jiwa sebanyak seperti pada 1902, jaringan pemantauan vulkanologis dan seismologis telah dimutakhirkan

lima kali hingga menghasilkan topologi jaringan seismik yang menggunakan kombinasi instrumen mutakhir dan teknologi *trailing edge*, salah satunya menggunakan modul *Earthworm* (Dondin dkk., 2009).

Karena keandalannya dalam proses akuisisi beberapa data seismik yang datang bersamaan, Pusat Peringatan Tsunami, Komite Manajemen Data NOAA (*The National Oceanic and Atmospheric Administration*), menggunakan *Earthworm* dalam proses pengumpulan dan analisis awal dari data seismik dari beberapa sensor. Data seismik yang sudah dikumpulkan lalu dianalisis dan diolah dalam server. Data tersebut nantinya menjadi informasi penting terkait dengan data prakiraan terjadinya tsunami. Data prakiraan tersebut menentukan potensi tsunami yang dipicu gempa bumi, memprediksi waktu tiba tsunami, dan bila memungkinkan, memprediksi peningkatan tinggi air laut di pesisir pantai, serta penyebarluasan informasi peringatan sesuai dengan tingkat bencana tsunami yang akan terjadi (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2008).

B. Kajian Kritis Modul *Earthworm*

Sehubungan modul *Earthworm* mempunyai peran utama dalam memproses data seismik dari aliran lahar yang dideteksi geophone untuk menghasilkan suatu informasi prakiraan bencana maka perlu dilakukan kajian terkait kelebihan dan kekurangannya. Hasil dari kajian kritis tersebut adalah:

1. Modul *Earthworm* mampu memuat banyak kelompok modul analisis data yang kompleks, tetapi mudah diatur (*modularitas*). Setiap sistem dalam modul *Earthworm* harus mampu menempatkan beberapa modul analisis data yang baru ke dalam satu unit modul, dan tiap modul dapat independen dari pengaruh modul lain, baik yang berasal dari perangkat keras maupun perangkat lunak. Implikasinya, fungsi sistem yang krusial dapat independen dari fungsi lain dalam sistem.

Dengan demikian, fungsi modul baru yang ditambahkan tersebut tidak mengganggu operasi yang sudah ada sebelumnya.

2. Modul *Earthworm* mempunyai fungsi kemandirian sistem. Modul *Earthworm* mampu beroperasi dengan berbagai merek perangkat keras komputer dan sistem operasi serta berbagai jenis komputer yang dihubungkan untuk beroperasi sebagai satu sistem. Nantinya modul tersebut menjadi sistem yang secara bertahap dapat bermigrasi dari satu jenis komputer yang satu ke jenis komputer lain tanpa gangguan.
3. Modul *Earthworm* dapat ditingkatkan guna mengatasi penambahan beban kerja (*skalabilitas*). Sistem ini mampu menyiapkan data, menyeleksi, dan menetapkan data ketika mencapai nilai tertentu, juga menyimpan, menampilkan, dan menemukannya kembali untuk digunakan dalam jaringan kecil ataupun besar. Meskipun perangkat lunak tersebut mempunyai berbagai kemampuan, pengguna tetap dapat mengaksesnya secara terbuka.
4. Modul *Earthworm* mempunyai konektivitas. Modul ini bukanlah perangkat lunak yang tertutup atau terisolasi, melainkan perangkat lunak yang mampu berinteraksi secara cepat dengan sistem *real-time*, sistem analisis interaktif, dan berbagai skema pemberitahuan. Modul ini menyediakan konektivitas pada berbagai tingkat pemrosesan otomatis dan interaktif sehingga dapat dikonfigurasi untuk beroperasi mandiri sepenuhnya dan dapat berfungsi sebagai modul dalam sistem area luas yang terdistribusi.
5. Modul *Earthworm* memiliki kemampuan analisis yang tinggi, tetapi kurang dihargai oleh penggunanya (*robustness*). Secara umum, sistem pemrosesan data seismik berperan penting dalam penelitian dan monitoring sebelum terjadinya bencana. Modul *Earthworm* mampu menghadapi kesalahan yang muncul ketika program sedang dijalankan. Masalahnya,

biaya yang dikeluarkan untuk menghasilkan modul ini cukup besar. Biaya tersebut mencakup biaya merancang, mengimplementasikan, menguji, dan menyediakan perangkat keras serta peralatan tambahan. Para pengguna modul *Earthworm* seperti tak mengerti besarnya biaya yang harus dikeluarkan produsen untuk membuat modul yang andal, terutama ketika terjadi krisis seismik, *input* data dan daya mengalami gangguan, serta beban yang meningkat drastis.

6. Kelemahan modul *Earthworm* adalah penulisan programnya rumit. Karena banyaknya program yang harus dilayani modul *Earthworm* dan programnya cukup rumit, pengisian program tersebut harus runut sesuai dengan petunjuk dan diperlukan ketelitian yang ekstra.

C. Aplikasi *Earthworm* dalam Peringatan Dini Banjir Lahar

Beberapa aplikasi dalam perangkat lunak *Earthworm* dapat dimanfaatkan untuk memprediksi dan mengeluarkan informasi bahaya yang terkait dengan banjir lahar. Aplikasi modul dalam perangkat lunak *Earthworm* sebagai berikut.

1. Modul *psnadsend* yang bertugas menerima data dari *analog digital converter* (ADC);
2. Modul *vhmailman* yang membuat informasi bahaya/*warning* dalam format surel;
3. Modul *ew2file* yang membuat informasi bahaya/*warning* dalam format pesan singkat SMS;
4. Modul *archman* yang bertugas menyimpan data seismik dalam format *.sac;
5. Modul *ew2rsam* yang menghitung nilai RSAM secara *real-time* (*real-time seismic amplitudo measurement*);

6. Modul *Seismic Wave Analysis and Real Time Monitor* (SWARM) yang menampilkan bentuk gelombang seismik secara *real-time*.

Informasi bahaya/*warning* dihasilkan modul *Earthworm* ketika aliran lahar yang terdeteksi di stasiun seismograf deteksi lahar awal mencapai nilai besaran seperti yang telah ditetapkan. Informasi bahaya tersebut berupa sinyal deteksi banjir lahar yang dinyatakan sebagai sinyal alarm. Sinyal alarm tersebut digunakan untuk memerintahkan sistem perekaman banjir di stasiun induk agar merekam terjadinya banjir secara otomatis. Selain itu, sinyal alarm dapat diumpankan ke modul *vhmailman* dan modul *ew2file* yang juga terdapat dalam modul *Earthworm*.

Setelah sampai di stasiun induk pengendali, data seismik getaran aliran lahar yang terpantau dari lapangan diumpankan ke modul pemroses data RSAM dalam modul *Earthworm*. Agar dapat ditampilkan secara *real-time*, data tersebut disimpan dalam Winston Database yang berbasis MySQL.

Agar data seismik aliran lahar mudah dianalisis, pemrosesannya menggunakan aplikasi berbasis Java dalam modul *seismic wave analysis and real time monitor* (SWARM). Dengan modul SWARM ini, data getaran aliran lahar yang terdeteksi sensor *geophone* di stasiun seismograf di sungai yang diamati dapat ditampilkan dalam bentuk gelombang seismik secara *real-time*.

Aplikasi SWARM yang berbasis Java dapat digunakan untuk menampilkan spektrum frekuensi, spektogram, tapis *band-pass*, dan menghitung selisih waktu tiba gelombang sehingga mampu menggantikan peran kertas seismogram. Di samping aplikasi yang terdapat dalam modul *Earthworm*, di stasiun induk terdapat aplikasi lain:

1. Modul penghitung kecepatan aliran lahar rata-rata yang fungsinya menganalisis data RSAM untuk dihitung kecepatan rata-rata aliran laharnya;

2. Modul perhitungan waktu tiba banjir yang berfungsi membandingkan data kecepatan rata-rata aliran lahar dengan jarak daerah atau bangunan yang diperkirakan terdampak banjir lahar;
3. Modul pengoperasi sistem perekaman video;
4. Modul analisis data video.

Kinerja modul penghitung kecepatan aliran lahar rata-rata berkaitan dengan modul perhitungan waktu tiba banjir lahar. Hal ini karena hasil perhitungan modul penghitung kecepatan rata-rata aliran lahar dipergunakan untuk menganalisis waktu tiba aliran lahar di suatu lokasi yang diperkirakan terdampak.

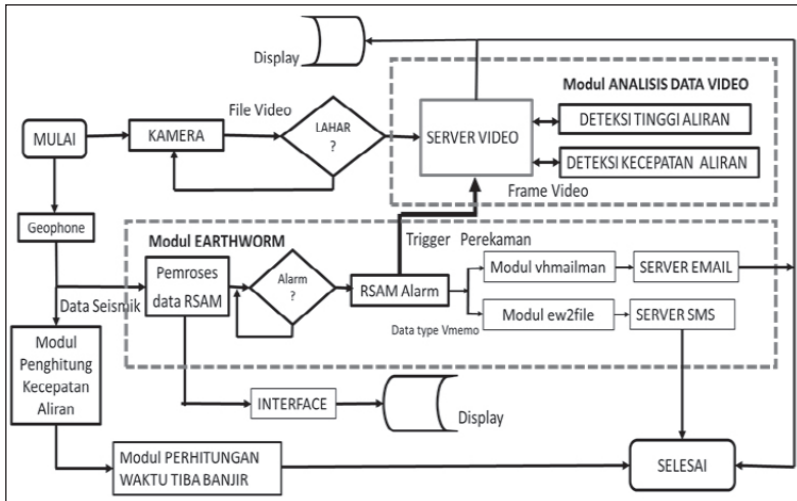
Modul pengoperasi sistem perekaman video dirancang untuk memberi perintah kepada server perekam data video. Dengan berfungsinya modul tersebut, server perekam data video hanya merekam data video yang menunjukkan aliran lahar yang besar saja sehingga server dapat digunakan dalam waktu yang lama. Gambar 5 menunjukkan diagram alir sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir.

D. Perencanaan Sistem

Sistem prakiraan dan peringatan dini banjir lahar dipasang di sungai yang berpotensi dilewati aliran lahar. Untuk menjaga dari risiko terdampak aliran lahar, stasiun seismograf deteksi lahar awal dan seismograf deteksi lahar dan kamera dipasang di bangunan sabo yang terdapat pada sungai yang diamati.

Untuk kelancaran pengiriman data video dari stasiun pemantau di daerah terpencil ke stasiun induk, digunakan sistem teknologi jaringan yang mempunyai kapasitas besar, yakni jaringan internet pita lebar berbasis nirkabel (*broadband wireless access*) dengan frekuensi 2,4 dan 5,8 GHz.

Pemasangan stasiun sistem peringatan dini banjir lahar dengan jaringan *broadband* dilakukan agar pengiriman data fenomena



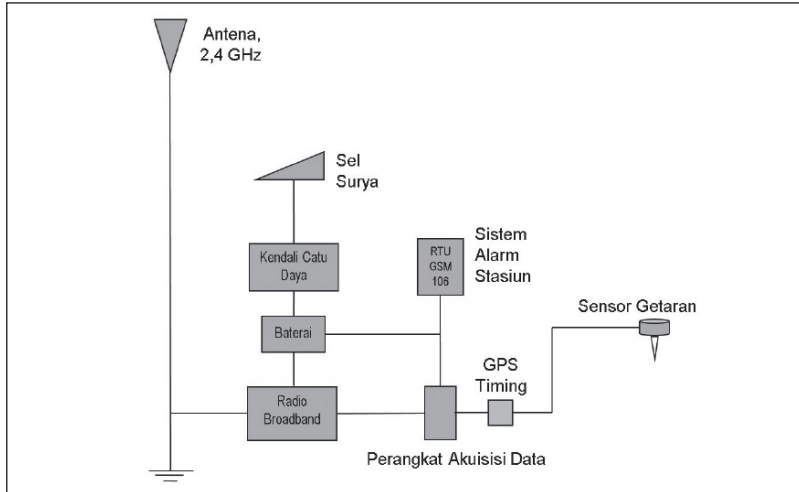
Sumber: Sukatja (2016)

Gambar 5. Diagram Alir Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir

peristiwa banjir lahar bisa berlangsung cepat. Data tersebut kemudian disampaikan sesegera mungkin kepada instansi pelaksana mitigasi kebencanaan dan masyarakat yang memerlukannya. Agar penyebarluasan informasi dapat berjalan lebih mudah, cepat, dan terencana, diperlukan berbagai jenis sistem komunikasi, seperti internet, radio komunikasi, dan telepon seluler.

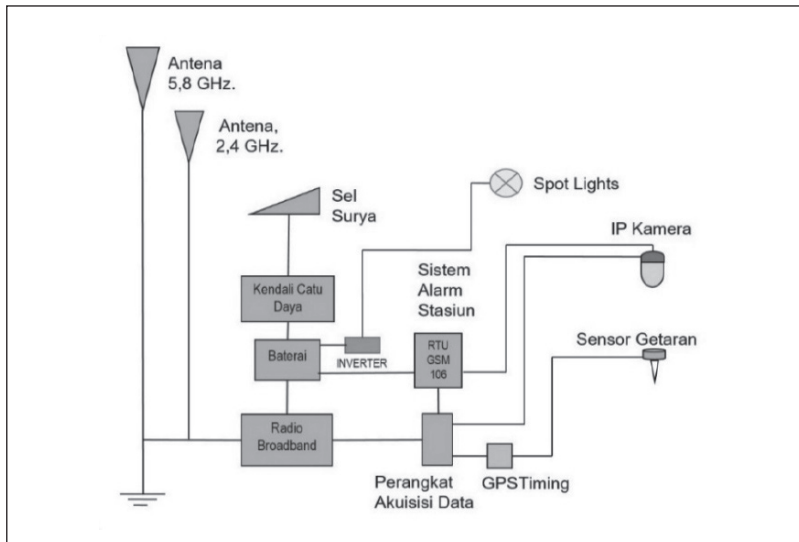
Peralatan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir dengan jaringan *broadband* terdiri dari stasiun seismograf deteksi lahar awal, stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera/pemantau visual, stasiun pengulang (bila diperlukan), serta stasiun pengendali di stasiun induk. Stasiun seismograf merupakan stasiun yang berguna untuk mendeteksi semua getaran yang ditimbulkan oleh aliran lahar yang terdeteksi oleh sensor getaran.

Stasiun seismograf deteksi lahar awal di lapangan terdiri dari perangkat utama berupa sensor getaran (*geophone*), radio-modem, kendali catu daya, sistem alarm untuk keamanan stasiun,



Sumber: Sukatja (2016)

Gambar 6. Diagram Peralatan Stasiun Seismograf Deteksi Lahar Awal



Sumber: Sukatja (2016)

Gambar 7. Diagram Peralatan Stasiun Seismograf Deteksi Lahar dengan Kamera Pemantau

dan menara dari bahan pipa galvanis sebagai pendukung kinerja sistem. Diagram peralatan stasiun seismograf deteksi lahar awal dan stasiun seismograf deteksi lahar dengan kamera pemantau dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.

Stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di lapangan terdiri dari perangkat utama berupa kamera CCTV berbasis web dengan kendalinya, radio-modem, pencatu daya, lampu penerangan dan menara sebagai pendukung kinerja sistem.

Stasiun pengendali dan monitor di stasiun induk terdiri dari perangkat utama berupa peralatan monitor, radio-modem, *router*, server, pencatu daya, perekam data, dan menara pendukung kinerja sistem.

Aliran lahar yang terdeteksi sensor getaran di stasiun seismograf deteksi lahar awal menghasilkan sinyal getaran yang berbentuk sinyal gelombang seismik analog. Sinyal seismik tersebut selanjutnya diumpankan ke perangkat akuisisi data. Di dalam perangkat akuisisi data ini, sinyal seismik analog diubah ke dalam bentuk sinyal seismik digital agar dapat dikirimkan ke stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau melalui radio *broadband* dan dikirimkan ke stasiun induk pengendali.

Ketika aliran lahar di sungai yang diamati sampai di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau, sensor getaran dan kamera yang terdapat di stasiun tersebut akan mendeteksinya. Kemudian, data visual dari kamera dan sinyal seismik yang terpantau serta terdeteksi oleh stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau dikirimkan ke stasiun induk pengendali. Bila letak geografis stasiun seismograf deteksi lahar dan stasiun induk pengendali tidak memenuhi syarat untuk mengirimkan data video dan data seismik dengan baik, perlu ditambahkan stasiun pengulang (*repeater*) di antara dua stasiun tersebut.

Pemantauan visual aliran lahar ini dilakukan dengan menggunakan kamera berbasis *internet protocol* sehingga dapat langsung

ditransmisikan melalui saluran *internet protocol broadband*. Data visual yang dikirimkan dari lapangan dikumpulkan pada stasiun penerima di stasiun induk melalui perangkat penghubung jaringan (*router*), lalu dikirimkan ke komputer server. Melalui perangkat lunak di stasiun induk pengendali, data visual dari komputer server dikirimkan ke layar monitor. Perangkat lunak yang terpasang pada komputer monitoring visual ini dilengkapi dengan menu penyimpanan dan pemanggilan data.

Jadi, dapat disimpulkan bahwa sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir memiliki beberapa kelebihan. Pertama, dapat memantau data sungai secara *real-time*. Kedua, berbagi (*sharing*) data menjadi lebih mudah. Ketiga, kapasitas jaringannya besar dan frekuensinya tidak berbayar. Keempat, pengembangan jaringan relatif mudah.

E. Aplikasi di Lapangan

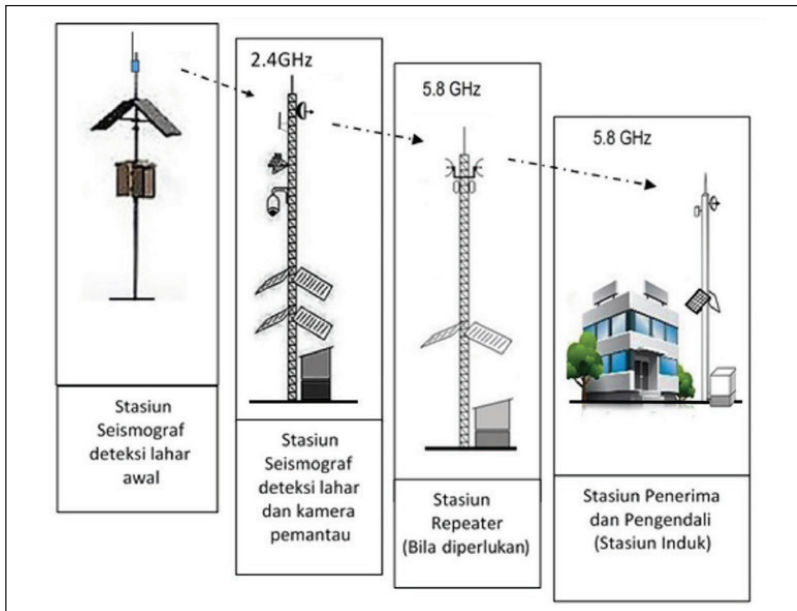
Aplikasi sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir diuji coba di Sungai (Kali) Putih yang berada dekat Gunung Api Merapi, Kecamatan Srumbung, Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Pemilihan lokasi didasarkan atas pertimbangan bahwa sungai tersebut paling sering mengalami banjir lahar dan paling berdampak pascaerupsi Merapi 2010. Tata letak penempatan peralatan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir seperti yang terlihat pada Gambar 8.

Pada Gambar 8, terlihat ada empat stasiun, yaitu stasiun seismograf deteksi lahar awal yang terletak di hulu sungai, stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau, stasiun penguang/*repeater* (bila diperlukan), dan stasiun induk sebagai stasiun penerima dan pengendali di kantor Balai Litbang Sabo, Sopalan, Maguwoharjo, Depok, Sleman, Yogyakarta.

Stasiun seismograf deteksi lahar awal dipasang di sabo dam PU-C13 ditunjukkan pada Gambar 9. Peralatan di stasiun ini

dapat mendeteksi adanya getaran aliran lahar yang terjadi di hulu Sungai (Kali) Putih dalam bentuk data sinyal gelombang seismik. Data sinyal gelombang seismik tersebut selanjutnya dikirimkan ke stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di bangunan sabo dam PU-D2.

Sehubungan jarak antara stasiun seismograf deteksi lahar awal (PU-C13) dengan stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau (PU-D2) hanya 1,348 km, jaringan komunikasi hanya menggunakan jaringan gelombang radio *broadband* 2,4 GHz. Hal ini disebabkan harga yang lebih terjangkau dan lingkup sinyal yang lebih luas dibandingkan jaringan *wireless fidelity* (*wifi*) dengan frekuensi 5 GHz. Peralatan stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau ditunjukkan pada Gambar 10.



Sumber: Sukatja (2016)

Gambar 8. Penempatan peralatan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir.

Sinyal data seismik aliran lahar yang terdeteksi di stasiun seismograf deteksi lahar awal diterima di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di bangunan sabo dam PU-D2. Data ini diterima bersama dengan data seismik video serta seismik aliran lahar yang terdeteksi stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau. Data ini diteruskan ke stasiun induk kendali di Balai



Gambar 9. Foto stasiun seismograf deteksi lahar awal di sabo dam PU-C13.

Litbang Sabo menggunakan jaringan internet *broadband* frekuensi 5,8 GHz. Jaringan internet *broadband* dengan frekuensi dipilih karena memiliki spektrum sinyal yang lebih luas dan tidak memiliki banyak gangguan sehingga cocok untuk pengiriman data yang memerlukan *bandwidth* besar, misalnya *streaming video* dan pengiriman file-file besar.

Fenomena aliran lahar yang tertangkap di stasiun seismograf deteksi lahar yang dilengkapi kamera pemantau dapat dimonitor di stasiun induk kendali. Lebih lanjut lihat Gambar 11. yang menampilkan fenomena terjadinya aliran

lahar di lokasi sabodam PU-D2. Fenomena tersebut menunjukkan kapasitas, kecepatan, sebaran, kepala aliran laharnya bahkan juga dapat menampilkan keberadaan bangunan sabodam, para penam-

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Gambar 10. Foto stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di lapangan.

Manfaat dari berbagai peralatan di stasiun seismograf deteksi lahar:

1. Peralatan sensor getaran (*geophone*) di stasiun seismograf deteksi lahar awal, serta di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau (di Kali Putih, PU-C13, dan PU-D2) digunakan untuk mendeteksi aliran lahar yang tiba di stasiun seismograf deteksi lahar awal serta di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau. Data waktu terdeteksinya

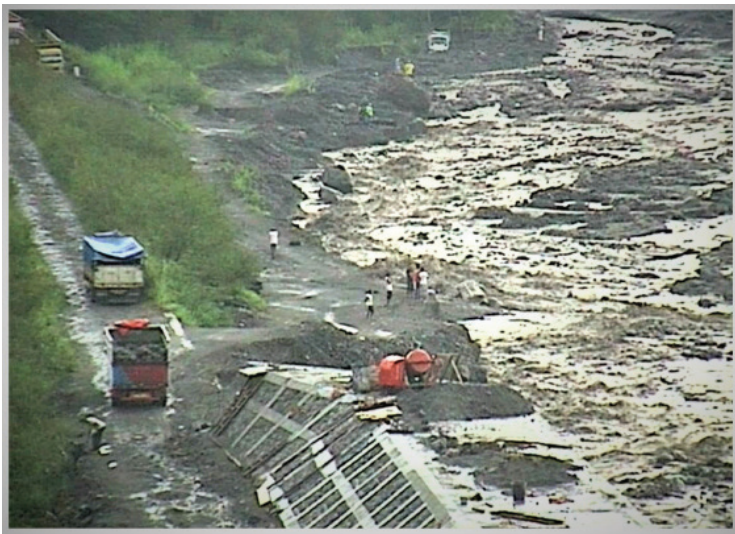
bang beserta truk pengangkut bahan galian yang ditambang pasca terjadinya lahar di sekitar sabodam PU-D2. Gambar 12 memperlihatkan lokasi pemasangan dan jarak antara dua sensor getaran *geophone* di tiap stasiun seismograf dalam satu sungai pada jarak yang telah ditetapkan. Data jarak tersebut digunakan sebagai dasar penghitungan kecepatan aliran lahar di sungai yang diamati.

Sketsa pemasangan peralatan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir dapat ditunjukkan pada Gambar 13. Stasiun seismograf deteksi lahar terdiri dari

1. Komponen sensor dan akuisisi data seismograf,
2. Komponen catu daya,
3. Komponen pengirim data.

aliran lahar pada dua stasiun seismograf deteksi lahar tersebut nantinya digunakan untuk menghitung kecepatan rata-rata aliran lahar. Selain itu, data ini juga dapat digunakan sebagai faktor koreksi hasil perhitungan data kecepatan aliran lahar berdasarkan pengolahan data video di server stasiun induk.

2. Peralatan akuisisi data di stasiun seismograf deteksi lahar awal di PU-C13 digunakan untuk mengirimkan sinyal seismik yang dideteksi oleh sensor getaran ke stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di PU-D2.
3. Peralatan akuisisi data di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di PU-D2 mengirimkan sinyal seismik yang dideteksi oleh sensor getaran di stasiun tersebut. Peralatan tersebut juga mengirimkan sinyal seismik yang diterima dari stasiun seismograf deteksi lahar awal di PU-C13 ke stasiun induk pengendali di kantor Balai Litbang Sabo di Yogyakarta. Ketika sinyal seismik yang dideteksi sensor



Gambar 11. Fenomena aliran lahar yang terpantau di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau.



Foto: Puslitbang SDA (2015)

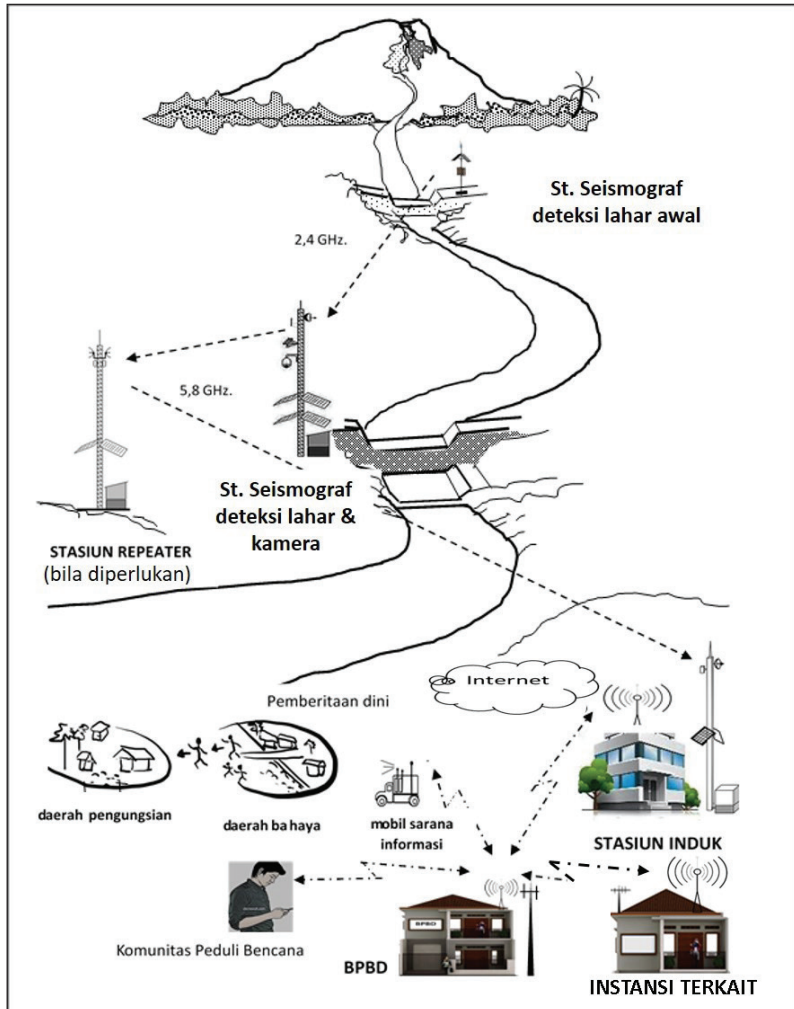
Gambar 12. Lokasi Pemasangan dan Jarak Antara Dua Sensor

getaran di stasiun seismograf deteksi lahar awal di PU-C13 (yang telah dianalisis di stasiun induk pengendali di kantor) mencapai batas *warning*, sinyal itu dimanfaatkan sebagai pemicu beroperasinya perekam data video di stasiun induk.

Sensor lahar yang digunakan adalah *geophone* tipe CDJ-Z/P4 (*vertical & horizontal*). Sensor ini dapat menerima getaran dari arah vertikal dan horizontal dengan frekuensi normal 4,5 Hertz \pm 10%, kepekaan 0,28 Hz \pm 5% dalam satuan v/cm/detik.

Pemasangan sensor tersebut dilakukan di bangunan sabo di daerah hulu Kali Putih. Sensor getaran 1 di sabo dam PU-C13 menjadi stasiun seismograf deteksi lahar awal, sedangkan sensor getaran 2 di sabo dam PU-D2 berfungsi sebagai stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera. Sensor ini menerima rambatan getaran mekanik yang ditimbulkan oleh aliran lahar yang melewati alur sungai. Sinyal keluaran sensor berupa getaran tegangan sebanding

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 13. Sketsa Pemasangan Peralatan Pengembangan Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan intensitas getaran tanah akibat terjadinya aliran lahar. Getaran seismik yang dibangkitkan oleh sensor lahar dipancarkan ke stasiun induk kendali di Balai Litbang Sabo melalui *microcontrolled voltage controlller oscillator* (Mc-VCO).

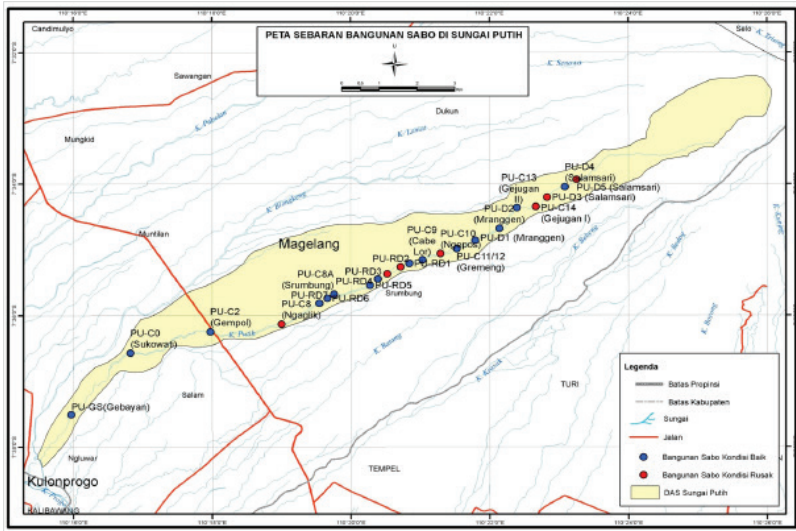
Setelah getaran seismik diterima di Balai Litbang Sabo, diperlukan diskriminator untuk mentransformasikan kembali sinyal frekuensi tersebut ke besaran tegangan listrik. Selanjutnya, sinyal getaran seismik dari diskriminator dimasukkan ke unit *digitizer* PSN_ADC (*analog digital converter*) serial board untuk mengubah data analog menjadi data digital.

Melalui proses akuisisi data dalam modul *Earthworm*, sinyal dari sensor getaran yang dipicu oleh terjadinya aliran lahar dibaca dan dihitung amplitudo gelombang seismiknya oleh pemroses data *real-time seismic amplitudo measurement* (RSAM). Data RSAM yang berupa *textfile* ini memperlihatkan nilai sinyal getaran yang dibangkitkan oleh aliran lahar dari ke dua sensor getaran *geophone*. Data ini nantinya dapat dilihat melalui layar monitor. Di samping itu, data RSAM dimanfaatkan sebagai kumpulan data yang dapat disimpan dalam *hard disk*.

Aliran lahar di Kali Putih, yang terdeteksi oleh sensor getaran di stasiun seismograf deteksi lahar awal yang dipasang di bangunan PU-C13 dan sensor getaran di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di bangunan PU-D2, mempunyai selisih waktu. Dengan membandingkan antara selisih waktu yang tercatat di kedua sensor tersebut dan jarak antara kedua sensor sejauh 1,348 km, kecepatan aliran lahar rata-rata dapat dihitung. Peta sebaran bangunan sabo dan fasilitas umum di DAS Kali Putih terlihat pada Gambar 14.

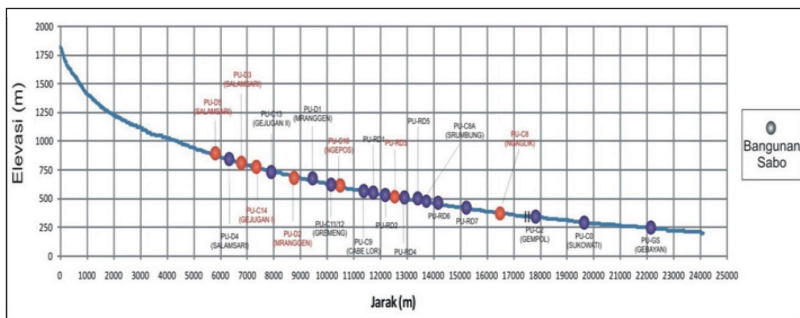
Dengan diketahuinya kecepatan rata-rata aliran lahar, jarak antara bangunan sabo dan fasilitas umum yang berada di sepanjang Kali Putih (Gambar 15), waktu tiba banjir (*traveling time*) di tempat-tempat yang berpotensi terdampak bencana dapat diprakirakan. Memprakirakan waktu tiba banjir dilakukan dengan membagi jarak

dari sabo dam PU-C13/PU-D2 ke daerah terdampak, dan dibagi dengan kecepatan rata-rata lahar.



Sumber: Balai Sabo (2011)

Gambar 14. Peta Sebaran Bangunan Sabo dan Fasilitas Umum di DAS Kali Putih



Sumber: Balai Sabo (2011)

Gambar 15. Lokasi Sabo Dam pada Penampang Memanjang Kali Putih

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Sebagai referensi dalam menghitung kecepatan rata-rata aliran lahar di Kali Putih, Gunung Api Merapi digunakan hasil perhitungan sebagai berikut.

1. Hasil pengukuran kecepatan rata-rata permukaan aliran lahar di Kali Putih, Gunung Api Merapi pada saat puncak aliran berkisar antara 4,0–6,0 m/detik
2. Hasil pengukuran kecepatan rata-rata kepala aliran lahar di Kali Bebung, Gunung Api Merapi bervariasi antara 2,7 dan 3,6 m/detik (Lavigne, F. dkk., 2000b).
3. Hasil pengukuran kecepatan bagian depan (kepala) lahar di Kali Gendol, Gunung Api Merapi bergerak dengan kecepatan rata-rata 4,1 m/detik (Sandy Budi Wibowo. dkk. 2015).
4. Hasil pengukuran tahun 1994–1995 kecepatan rata-rata kepala aliran lahar di Kali Boyong, Gunung Api Merapi bervariasi antara 2,7 dan 3,6 m/detik. Sementara itu, hasil pengukuran kecepatan puncak aliran lahar lebih besar dari pada kecepatan rata-rata kepala aliran lahar, yaitu 5–7 m/detik hingga 11 m/detik pada tahun 1934 dan pada tahun 1984.
5. Hal ini diakibatkan karena sejak tahun 1990 mulai dibangun beberapa sabodam di Kali Boyong. Di samping itu, kecepatan aliran puncak maksimum diamati 1 sampai 5 menit setelah lewatnya kepala aliran lahar (Lavigne, F. dkk., 2007).
6. Hasil pengkajian kecepatan rata-rata aliran lahar di Kali Putih dengan metode *cross-correlation* antara 3,5–7,5 m/detik (Sulistiyan, dkk., 2015).
7. Bila kecepatan rata-rata aliran lahar yang mengalir di Kali Putih sebesar 5 m/detik, perkiraan waktu tempuh banjir pada daerah terdampak seperti dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan Prakiraan Waktu Tiba Banjir di K. Putih

No.	Lokasi Antara Sabo dam	Jarak (m)	Waktu Tempuh Lahar
1.	Dari PU-C13 (Gejukan) ke PU-D2 (Mranggen)	1.348	4,50 menit
2.	Dari PU-D2 (Mranggen) ke PU-C10 (Ngepos)	1.800	6,00 menit
3.	Dari PU-C10 (Ngepos) ke PU-C2 (Gempol), Jl. Magelang	6.350	21,17 menit
4.	Dari PU-D2 (Mranggen) ke PU-C2 (Gempol), Jl. Magelang	8.150	27,17 menit

Untuk mendukung keakuratan data prakiraan banjir lahar, stasiun induk pengendali dilengkapi dengan modul *Earthworm*. Modul ini dapat mendeteksi banjir lahar bila telah mencapai nilai besaran seperti ditetapkan sebelumnya (disebut sinyal alarm). Sinyal tersebut dapat digunakan untuk mengirimkan sinyal agar sistem perekaman banjir di stasiun induk mulai merekam terjadinya banjir secara otomatis. Sinyal alarm tersebut juga dapat diumpankan ke modul *vhmailman* dan modul *ew2file*. Sinyal keluaran dari modul *vhmailman* bila diumpankan ke server surel akan menghasilkan informasi terjadinya banjir lahar dalam format surel, sedangkan sinyal keluaran dari modul *ew2file* bila diumpankan ke server layanan pesan pendek (SMS) akan menghasilkan informasi *warning* banjir lahar dalam format SMS.

Untuk menghasilkan alarm, digunakan modul *RSAM_Alarm*. Modul ini membaca pesan *type V_memo* yang dihasilkan oleh modul *RSAM_Alarm* ketika terjadi *trigger* (nilai *RSAM* melebihi ambang batas yang telah ditentukan) dan menghasilkan pesan *type V_memo*. Pesan *type V_memo* yang akan dibaca oleh modul *vhmailman* sebagai *trigger* untuk mengirimkan surel yang berisi informasi peringatan telah terjadi aliran lahar yang melebihi batas yang telah ditetapkan di stasiun deteksi seismograf deteksi awal. Di samping itu, pesan *type V_memo* juga akan dibaca oleh modul *ew2file* (file kedua, surel *warning*) untuk menghasilkan file teks yang

dapat dipergunakan sebagai informasi peringatan dini terjadinya aliran lahar dalam format SMS.

Setelah pemasangan peralatan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir, belum pernah terjadi banjir lahar besar. Oleh karena itu, dilakukan simulasi banjir lahar menguji kinerja modul *Earthworm*. Dalam simulasi tersebut, seolah-olah telah terjadi aliran lahar dengan kapasitas yang besar di stasiun seismograf deteksi lahar awal (PU-C13), serta di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau (PU-D2). Dalam simulasi tersebut, diberikan sinyal buatan guna men-*trigger* sensor getaran di stasiun seismograf deteksi lahar awal (PU-C13) dan stasiun seismograf deteksi lahar yang dilengkapi kamera pemantau (PU-D2). Dari hasil simulasi, diperoleh data seperti pada Gambar 16.

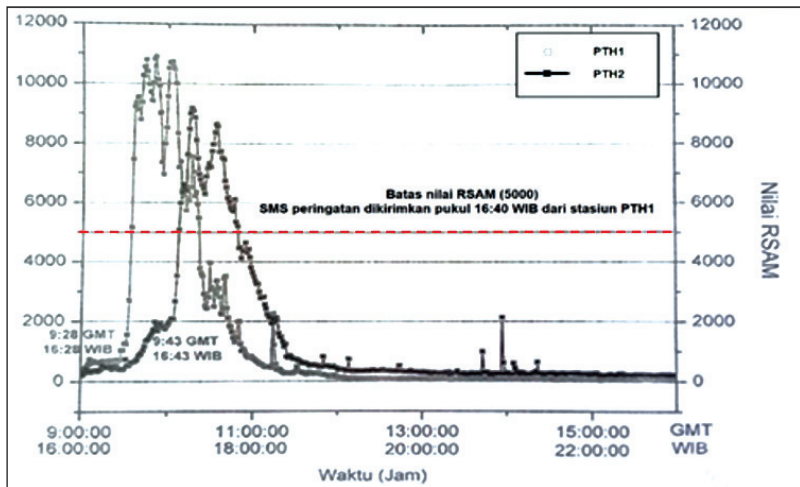
Dari Gambar 16 terlihat bahwa pada 3 November 2015 pukul 16:28 WIB dilakukan simulasi banjir lahar di stasiun seismograf deteksi lahar awal (PU-C13). Pada tanggal yang sama, pukul 16:43 WIB, juga dilakukan simulasi banjir lahar di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau (PU-D2). Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai RSAM meningkat drastis di kedua stasiun seismograf deteksi lahar.

Setelah dilakukan analisis getaran seismik yang diperlihatkan dalam grafik RSAM di stasiun seismograf deteksi lahar awal (PU-C13), nilai RSAM diketahui meningkat drastis, dari 800 Hertz menjadi 9.000 Hertz, bahkan sampai 11.000 Hertz. Peningkatan nilai ini telah melewati batas nilai alarm 5.000 Hertz dalam waktu 10 menit. Ketika nilai RSAM mencapai 5.000 Hertz, perangkat lunak di modul *ew2file* dalam modul *Earthworm*, pada pukul 16:40 WIB mengeluarkan sinyal alarm. Sinyal alarm ini diumpungkan ke server layanan pesan pendek sebagai informasi *warning* banjir lahar dalam format SMS.

Demikian juga yang terjadi di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau (PU-D2). Nilai RSAM meningkat

dari 1.800 Hertz menjadi 9.000 Hertz, yang artinya telah melewati batas nilai alarm sebesar 5.000 Hertz. Namun, karena sinyal alarm dalam grafik RSAM telah terlebih dahulu dikeluarkan dari data seismik stasiun seismograf deteksi lahar awal, sinyal alarm sebagai informasi *warning* banjir lahar menggunakan data dari stasiun yang lokasinya berada di hulu.

Setelah dilakukan analisis lanjutan terhadap getaran seismik, seperti diperlihatkan dalam grafik RSAM dari stasiun seismograf deteksi lahar awal (PU-C13), terlihat bahwa “kepala” banjir lahar terdeteksi 12 menit kemudian. Dengan terdeteksinya nilai RSAM mencapai 5.000 Hertz maka perangkat lunak di modul ew2file dalam modul Earthworm, mengeluarkan sinyal alarm untuk diumpankan ke server layanan pesan pendek sebagai informasi *warning* banjir lahar dalam format SMS.



Keterangan:

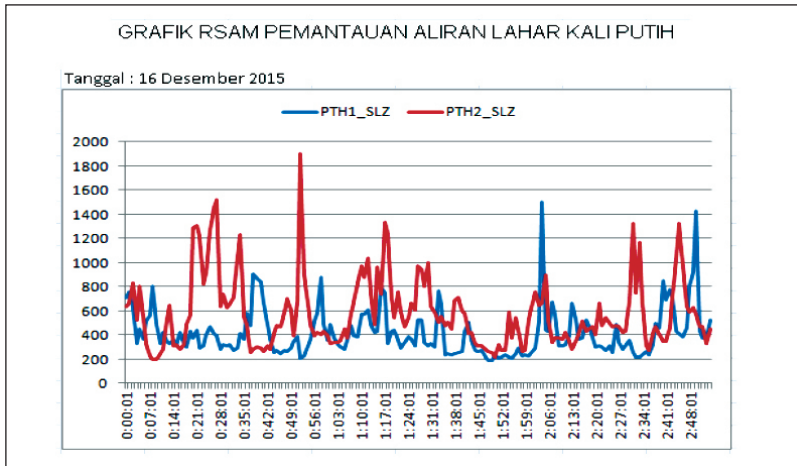
Sinyal PTH1, sinyal hasil simulasi dari stasiun deteksi lahar awal Kali Putih (PU-C13).

Sinyal PTH2, sinyal simulasi dari stasiun deteksi lahar & kamera Kali Putih (PU-D2).

Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 16. Grafik RSAM saat simulasi banjir lahar, 3 November 2015

Buku ini tidak diperjualbelikan.

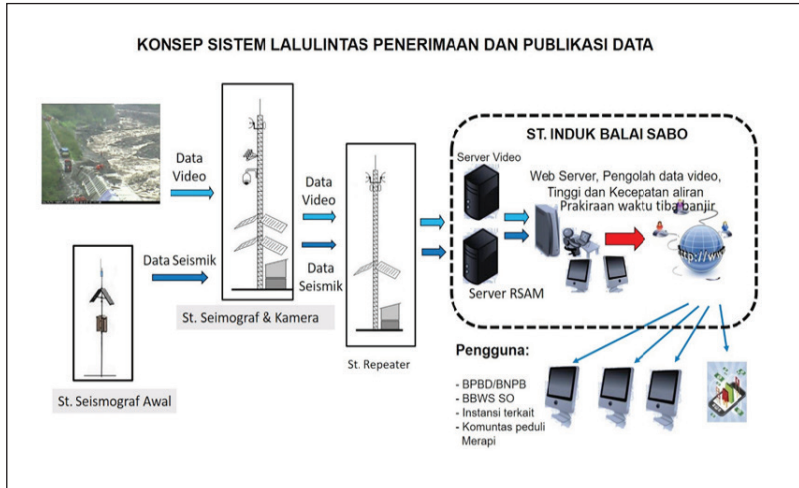


Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 17. Grafik RSAM saat sensor mendeteksi aliran lahar pada 16 Desember 2015

Informasi warning banjir lahar dalam format SMS tersebut disebarluaskan melalui aplikasi SMS Server lokal ke nomor telepon seluler (ponsel) yang telah didaftarkan di SMS Server. Pendaftaran nomor ponsel dilakukan di komputer oleh operator di lembaga institusi pengelola sistem peringatan dini banjir lahar.

Keakuratan sinyal Alarm terjadinya aliran lahar di hulu Kali Putih yang dihasilkan dalam format SMS ini dapat diklarifikasi bila di stasiun induk pengendali juga terdapat data hidrologi yang pengiriman datanya secara telemetri (data hujan dan tinggi muka air). Data hidrologi tersebut dapat digunakan sebagai pembanding karena terjadinya aliran lahar, selain dipicu dengan adanya data intensitas hujan yang tinggi, juga ditunjukkan dengan adanya informasi terjadinya aliran lahar di hulu sungai serta adanya informasi data tinggi muka air yang meningkat drastis. Dengan kata lain, adanya data hidrologi seperti data hujan dan tinggi muka air dapat lebih mendukung sistem peringatan dini yang ada.



Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 18. Konsep Sistem Lalu Lintas Penerimaan dan Publikasi Data

Data aliran lahar yang terdeteksi selama pengujian terlihat pada Gambar 17. Pada gambar tersebut, nilai grafik RSAM dari sensor di PU-C13 (PTH1) dan PU-D2 (PTH2) terlihat masih belum mencapai nilai 5.000 Hertz sehingga aliran lahar yang terpantau saat itu bisa dikatakan kecil.

Sistem lalu lintas penerimaan dan publikasi data yang mendukung sistem peringatan dini banjir lahar dapat dilihat pada Gambar 18.

F. Data yang Digunakan untuk Informasi Status Bahaya

Untuk mendukung keakuratan sistem informasi yang dihasilkan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir, digunakan gabungan beberapa data hasil pemantauan sensor getaran, peralatan monitoring, dan peralatan penganalisis data. Data yang digunakan adalah data hasil deteksi sensor getaran, data hasil pemantauan kamera video, dan data hasil analisis dari modul pengolah data seismik.

Semua data tersebut dipergunakan oleh sistem peringatan dini banjir lahar untuk menetapkan *warning*. Data hasil pemantauan tersebut juga dipergunakan untuk mengoreksi keakuratan data peringatan dini yang telah ditentukan. Jadi, keakuratan data yang dihasilkan oleh tiap peralatan akan meningkatkan keakuratan sistem peringatan dini banjir lahar secara keseluruhan.

G. Informasi Status Bahaya

Informasi status bahaya dari sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir ditentukan oleh data yang dihasilkan dari berbagai peralatan pemantau yang digunakan dalam sistem, yaitu

1. Data kecepatan aliran lahar. Data ini diperoleh dengan membandingkan jarak antara lokasi pemasangan kedua sensor getaran dengan selisih waktu terdeteksinya aliran lahar pada kedua sensor getaran.
2. Data nilai aliran lahar yang terpantau sensor. Data ini diperoleh dari gelombang seismik yang disebabkan oleh energi lahar yang menjalar di dalam bumi dan terdeteksi oleh sensor getaran dan seismograf. Dengan modul pengolah data seismik yang terpasang di stasiun induk pengendali, besarnya seismik aliran lahar yang terdeteksi oleh sensor getaran dapat diamati dalam nilai *real-time seismic amplitudo measurement* (RSAM).
3. Data RSAM_Alarm. Data ini dikeluarkan oleh modul pengolah data seismik ketika nilai RSAM melebihi nilai ambang batas nilai yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan demikian, dapat disimpulkan telah terjadi aliran lahar di stasiun seismograf deteksi lahar awal atau stasiun seismograf yang dilengkapi kamera.
4. Data video fenomena terjadinya aliran lahar yang terpantau secara *real-time* di layar monitor stasiun induk pengendali.

5. Data kecepatan aliran lahar dari hasil analisis rekaman video sebagai pembanding data kecepatan aliran lahar dari sensor getaran.
6. Data waktu tiba banjir pada daerah yang berpotensi terdampak banjir lahar. Data ini diperoleh dengan membandingkan jarak antara stasiun seismograf deteksi lahar yang dilengkapi kamera dan lokasi daerah yang berpotensi terdampak banjir lahar dengan kecepatan rata-rata aliran lahar.

Bab 5

Analisis Data Visual untuk Prakiraan Waktu Tiba Banjir



Sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir merupakan sistem peringatan dini yang andal karena mampu menampilkan fenomena aliran lahar yang terjadi di lapangan dan dapat memprakirakan waktu tiba banjir di daerah yang berpotensi terdampak. Prakiraan waktu tiba banjir didapatkan dari hasil perhitungan kecepatan rata-rata aliran lahar yang terjadi di hulu sungai yang diamati. Nilai kecepatan rata-rata aliran lahar diperoleh dengan membandingkan antara selisih waktu terdeteksinya sinyal seismik lahar di tiap stasiun seismograf deteksi lahar dengan nilai jarak dari dua lokasi pemasangan sensor geophone di stasiun seismograf deteksi lahar awal dan di stasiun seismograf deteksi lahar yang dilengkapi kamera.

Dengan diketahui prakiraan waktu tiba banjirnya di daerah yang berpotensi terdampak banjir lahar, usaha mitigasi bencana dapat dilakukan. Usaha mitigasi bencana bertujuan mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik bangunan pengendalian bencana maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana. Pada akhirnya, jumlah korban jiwa ataupun harta benda ketika bencana dapat diminimalisasi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Nilai kecepatan rata-rata aliran lahar penting untuk memprakirakan waktu tiba banjir. Oleh karena itu, nilai tersebut jangan hanya didasarkan pada analisis data seismik saja. Namun, nilai kecepatan rata-rata aliran lahar diperlukan sebagai pembanding yang dapat digunakan untuk mengalibrasinya. Untuk itu, disarankan suatu opsi dalam memperoleh data nilai kecepatan aliran lahar rata-rata lain, yakni dengan menganalisis data video hasil pantauan kamera.

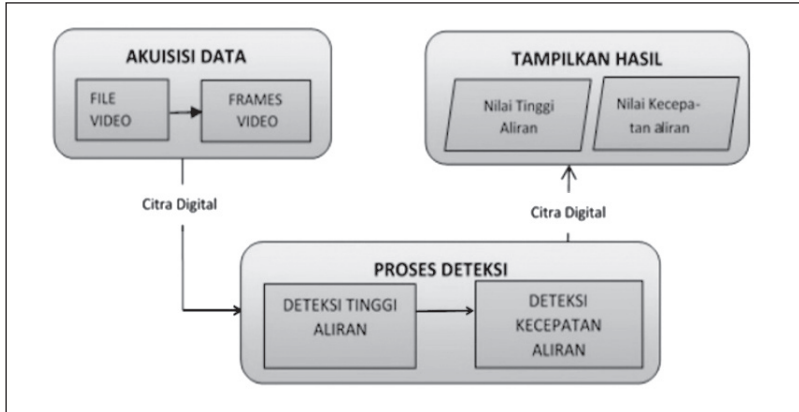
A. Aplikasi Pengolah Data Visual

Sistem operasi pengolahan data visual terdiri dari berbagai program komputer Visual Basic. Program tersebut merupakan bahasa pemrograman komputer yang berbasis *object oriented programming* (OOP). Visual Basic adalah bahasa pemrograman keluaran Microsoft yang merupakan pengembangan dari pendahulunya, yakni bahasa pemrograman BASIC yang dikembangkan pada 1950-an. Visual Basic adalah alat bantu untuk membuat berbagai macam program komputer, khususnya yang menggunakan sistem operasi.

B. Diagram Rancangan Sistem

Diagram rancangan sistem algoritma aplikasi pengolah data video terlihat pada Gambar 19.

Pada tahap awal, dilakukan proses akuisisi data berupa pengambilan file video sampel untuk membaca nilai kecepatan dan tinggi muka aliran lahar. Proses tersebut dilanjutkan dengan proses pembacaan *frame* file video secara satu per satu. Kemudian, dilakukan proses deteksi tinggi dan kecepatan aliran dari tiap *frame*. Proses berikutnya adalah menampilkan hasil akhir dari proses rancangan sistem. Rancangan algoritma ini menggunakan beberapa pola pengolahan citra sebagai berikut.



Sumber: Awaludin, Harjoko, dan Sumiharto (2012)

Gambar 19. Blok Diagram Rancangan Sistem

1. Pengambilan informasi dari citra (segmentasi objek) yang digunakan untuk memfasilitasi penggambaran daerah penting dalam citra sungai yang akan dibaca kecepatannya;
2. Memfokuskan pada gambar dinding sungai yang digunakan untuk mengurangi frekuensi daerah aliran air sungai dan menambah frekuensi daerah dinding sungai sehingga akan terlihat jelas perbedaan di antara kedua daerah tersebut;
3. Proses deteksi garis tepi sungai untuk mendeteksi garis tepi sungai yang berada di antara daerah aliran lahar dengan dinding sungai;
4. Mengubah citra gambar (citra berderajat keabuan menjadi citra biner atau hitam putih) sehingga dapat diketahui daerah mana yang termasuk dinding sungai (*foreground object*) dan *background* dari citra aliran sungai secara jelas;
5. Proses pembesaran piksel untuk menambahkan piksel pada batasan dari objek dinding sungai sehingga nantinya citra dinding sungai akan terlihat lebih besar dibandingkan dengan citra aslinya;

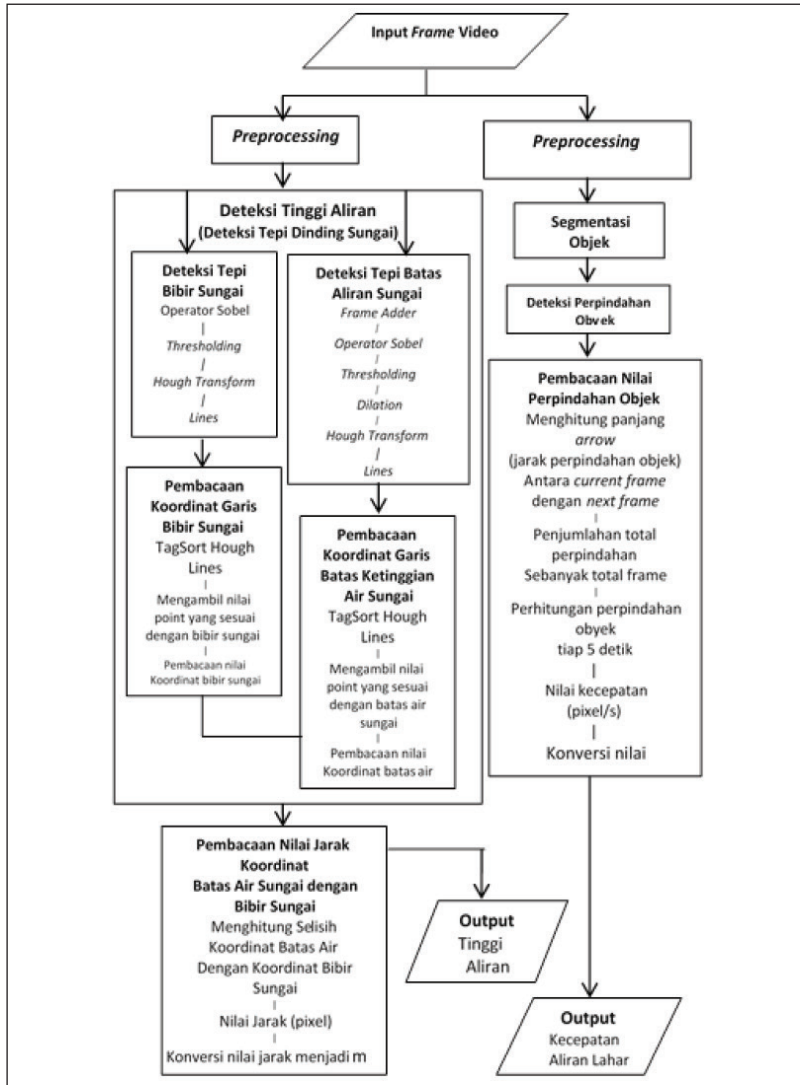
6. Pemberian koordinat gambar untuk mendeteksi garis pada tepian dinding sungai sehingga akan didapat koordinat garis bibir sungai dan garis batas air sungai dengan dinding sungai;
7. *Object tracking* untuk mengikuti suatu objek yang bergerak dan berpindah posisi untuk mengikuti proses pergerakan aliran lahar sehingga dapat diperoleh perpindahan objek yang di-*tracking* tersebut.

Gambar 20 menunjukkan algoritma sistem deteksi kecepatan dan tinggi muka aliran lahar secara keseluruhan. Algoritma pada awalnya menerima file video yang akan diproses, kemudian mengekstraksi *property* atau informasi file video berupa besaran ukuran resolusi dan jumlah *frame* yang terdapat pada file. File video yang digunakan adalah file video berformat *.avi. Proses selanjutnya terbagi menjadi dua, yaitu deteksi kecepatan dan elevasi atau tinggi muka aliran lahar. Pada deteksi tinggi muka aliran lahar, dilakukan dua proses algoritma, yaitu proses mengubah citra *frame* menjadi format *greyscale* (*pre-processing*) dan proses deteksi dinding sungai. Proses deteksi dinding sungai terbagi menjadi dua, yaitu proses deteksi tepi bibir sungai dan deteksi tepi batas aliran sungai.

C. Pengolah Data Visual

Komputer yang digunakan dalam menganalisis kecepatan dan tinggi aliran lahar adalah *next unit of computing* (NUC) atau mini *personal computer*. Hal ini sengaja dilakukan untuk menghemat tempat dan memperhatikan faktor estetika.

NUC adalah mini *personal computer* yang sudah mengalami pengembangan terbaru, berbentuk ultrakompak dengan ukuran dimensi 4 x 4 inci, kecil dan sangat ringkas, serta hemat listrik. Dengan ukuran kecil tersebut, NUC mampu berfungsi seperti komputer desktop biasa. NUC yang dilengkapi dengan perangkat lunak *development tools* beserta aplikasinya bahkan berfungsi sebagai *PC home theatre*, server media, atau tempat penyimpanan *personal cloud*. Bentuk dari peralatan NUC seperti terlihat pada Gambar 21.



Sumber: Awaludin dkk. (2012)

Gambar 20. Diagram Algoritma Sistem secara Keseluruhan



Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 21. Next Unit of Computing atau Komputer Personal Mini

D. Instalasi Pengembangan Perangkat Lunak

Beberapa aplikasi yang digunakan untuk pengembangan perangkat lunak aplikasi di antaranya *Microsoft Visual Studio 2010*. Sementara itu, *library* menggunakan *opencv 2.3.1* dan *cvblobslib*. Gambar 22 menunjukkan beberapa file aplikasi yang digunakan.

1. IDE Microsoft Visual Studio 2010

Visual Studio 2010 merupakan perangkat lunak yang dapat digunakan untuk melakukan pengembangan program aplikasi. Dalam Visual Studio 2010 terdapat aplikasi IDE (*Integrated Development*

Downloads	cvblobslib	24/10/2015 11:57	File folder
Recent places	Visual Studio 2008	20/10/2015 23:03	File folder
Homegroup	Visual Studio 2010	24/10/2015 11:20	File folder
	OpenCV2.3	24/10/2015 11:52	WinRAR archive

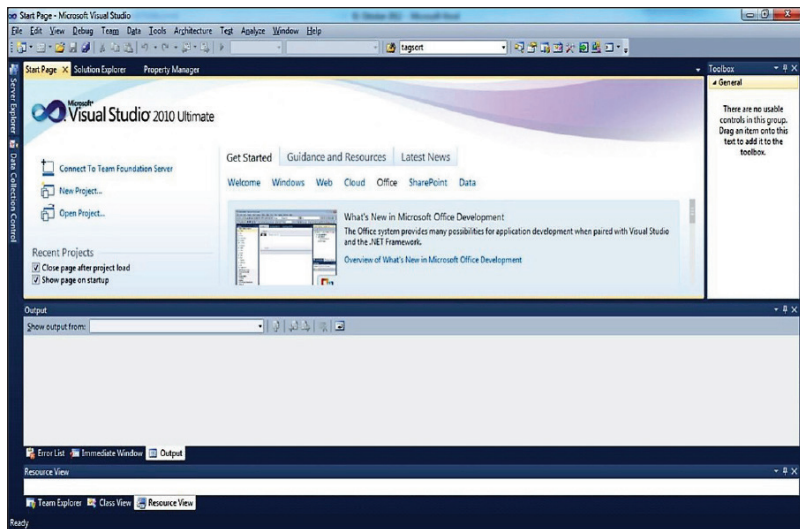
Sumber: Awaludin dkk. (2012)

Gambar 22. Daftar File Aplikasi yang Digunakan

Environment) yang berguna untuk menuliskan kode naskah program, mengompilasi program (*compile*), melakukan pengujian terhadap program (*debugging*), dan hal-hal lain yang terkait dengan aplikasi tersebut. Tampilan Visual Studio 2010 saat dijalankan dapat dilihat pada Gambar 23.

2. OpenCV (*Open Computer Vision*)

OpenCV adalah library *open source* Computer Vision untuk C/C++, yang didesain untuk aplikasi *real-time*, dengan fungsi-fungsi yang baik dalam akuisisi data gambar dan video. Perangkat lunak ini merupakan sebuah *application programming interface* (API) library untuk pengolahan citra *Computer Vision*. *Computer Vision* didefinisikan sebagai cabang dari bidang ilmu pengolahan citra (*image processing*). Dengan adanya *Computer Vision*, komputer tak ubahnya seperti manusia yang mampu mengenali objek yang diamati. Aplikasi ini dapat digunakan untuk mengambil keputusan,



Sumber: Awaludin dkk (2012)

Gambar 23. Tampilan Penggunaan Visual Studio 2010

Buku ini tidak diperjualbelikan.

melakukan aksi, dan mengenali suatu objek. Beberapa contoh pengimplementasian *Computer Vision* adalah *face recognition*, *face detection*, *face/object tracking*, dan *road tracking*.

3. Perangkat CvBlobsLib

Perangkat CvBlobsLib merupakan *library* yang digunakan dengan opencv. CvBlobsLib. Perangkat ini dapat digunakan untuk mendeteksi *blob* (tipe data yang menyimpan data biner dengan kapasitas besar) dari sebuah gambar yang sebelumnya telah diolah dengan filter warna atau metode tertentu.

Pengolahan basis data yang berisi banyak gambar biasanya menggunakan tipe data *blob* karena dapat menyimpan data biner yang besar. Dalam penulisannya, data *blob* diawali dengan *blb*, seperti *blb_foto*.

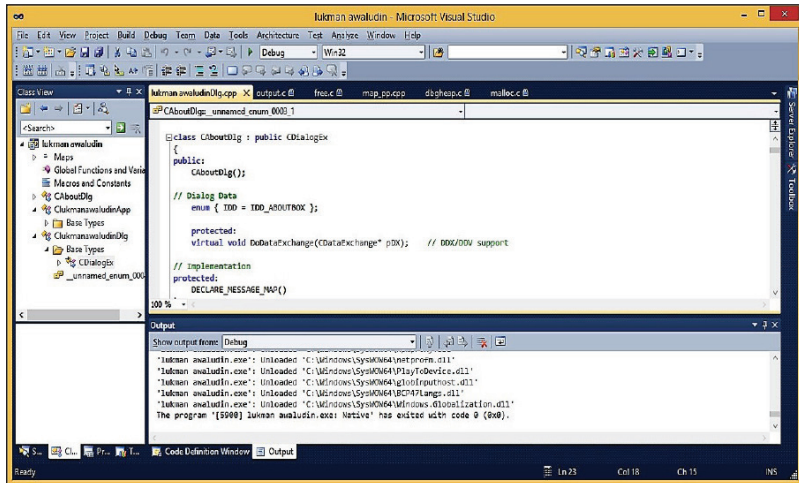
E. Persyaratan Pendukung Aplikasi Pengolah Data Visual

Persyaratan pendukung aplikasi perangkat lunak pengolah data visual sebagai berikut.

1. Menggunakan prosesor dengan kecepatan minimum 1.600 MHz dan RAM sedikitnya 4 Gb;
2. Pemasangan kamera diusahakan dapat menangkap objek secara langsung dan jelas sehingga perlu pencahayaan yang cukup. Hindari gangguan-gangguan visual yang timbul di sekitar objek dengan memfokuskan kamera pada objek yang akan diproses datanya.

F. Aplikasi Pembacaan Kecepatan dan Tinggi Muka Aliran

Metode pemrosesan video pendeteksi kecepatan dan tinggi aliran lahar menghubungkan kinerja perangkat lunak OpenCV 2.3.1 dengan Visual Studio 2010. Untuk mengakses file video, algoritma deteksi tinggi aliran dan deteksi kecepatan aliran dipindahkan ke dalam bentuk GUI (*graphical user interface*) dari konsol Win32



Sumber: Awaludin dkk. (2012)

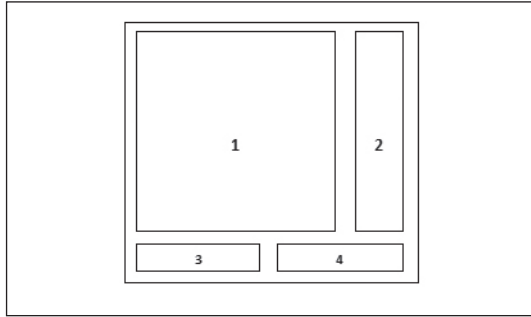
Gambar 24. Tampilan Visual Studio Saat Pemrograman

ke aplikasi *Microsoft foundation classes* (MFC), dan implementasi dari program tersebut dapat dieksekusi. MFC adalah *library* bagian dari aplikasi pemrograman antarmuka Windows dalam kelas C++. Gambar 24 menampilkan visual studio saat digunakan untuk membuat aplikasi.

G. Rancangan Antarmuka Pengguna Grafis

Antarmuka pengguna grafis atau *graphical user interface* (GUI) adalah media virtual yang membuat penggunanya bisa memberikan perintah tertentu pada komputer dengan memilih gambar yang tersedia pada layar monitor tanpa menyetik perintah apa pun. Dengan GUI, perintah dapat dikonversi menjadi ikon dalam layar monitor yang dapat di-klik untuk memulai fungsinya. Ikon merupakan sebuah symbol atau lambang kecil berupa gambar yang tampak pada layar komputer, biasanya dipakai untuk melambangkan dokumen atau program lain. Dengan adanya GUI, pengguna dapat lebih cepat mengeksekusi perintah kerja dari komputer

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Awaludin dkk. (2012)

Gambar 25. Rancangan GUI Pengolah Data Visual

tanpa harus mengkhawatirkan kesalahan dalam mengetik perintah. Sebagai contoh, di layar monitor komputer ada sebuah ikon (simbol) berbentuk huruf *W*. Huruf tersebut adalah ikon untuk menjalankan aplikasi *Microsoft Word*. Contoh lainnya, ikon yang berbentuk tombol di pojok kiri bawah layar monitor atau tombol bertuliskan *Start* atau logo *Windows*. Semua ikon yang terlihat di layar monitor komputer tersebut merupakan GUI. GUI yang ada dalam sistem ini dirancang untuk mempermudah pengoperasian metode algoritma pengolah data visual. Rancangan GUI dalam sistem ini terlihat pada Gambar 25.

Rancangan GUI pemrosesan data visual berupa analisis perhitungan kecepatan dan tinggi aliran lahar. Rancangan ini terbagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut.

1. Layar tampilan utama. Layar tampilan utama digunakan untuk menampilkan *frame* dari file video dengan resolusi 320 x 240 piksel dalam format RGB secara berurutan, dan nantinya dihasilkan tampilan *frame* bergerak (video). Layar ini juga menampilkan hasil deteksi berupa garis batas tepi bibir sungai dan garis batas aliran, serta kotak *region of interest* (ROI) yang telah dilakukan dalam proses sebelumnya;
2. Panel Tombol. Dalam panel ini terdapat tombol “Open File” yang digunakan untuk membuka file video berformat *.avi,

tombol “Kalibrasi Area” sebagai perintah untuk mengambil kotak ROI, tombol “Proses” sebagai perintah untuk memproses video, dan tombol “Close” sebagai perintah untuk menutup aplikasi program;

3. Panel penampil hasil pembacaan kecepatan aliran dari video dengan satuan piksel/detik dan m/detik;
4. Panel penampil hasil pembacaan tinggi aliran dari video dengan satuan piksel dan meter.

H. Proses Uji Kinerja Peralatan

Tahap pertama adalah pemilihan perangkat keras komputer. Untuk memproses data video dalam menganalisis kecepatan dan tinggi aliran lahar, dipilih perangkat keras komputer dengan ukuran yang relatif kecil dan spesifikasi teknis yang standar atau sesuai dengan kebutuhan. Perangkat keras komputer dengan ukuran kecil dipilih karena harganya terjangkau dan tidak memerlukan ruangan yang besar. Pada tahap ini, PC yang dipilih adalah mini PC, dengan memori dan kecepatan *clock CPU* seperti yang ditentukan agar cukup untuk melakukan proses dari semua aplikasi yang dibutuhkan.

Tahap kedua adalah penyesuaian layanan yang disediakan (fitur) dan kelakuan atau sifat objek (*behavior*) program untuk implementasi di lapangan. Tahapan ini dibagi lagi menjadi dua bagian. Bagian *pertama* adalah penyesuaian antara hasil tangkapan kamera dengan hasil analisis perangkat lunak. Oleh karena itu, dibutuhkan penyetelan kamera sesuai kondisi lingkungan yang sebenarnya. Usaha yang juga disebut kalibrasi kamera ini dilakukan agar hasil penangkapan gambar baik dan jelas. Dalam penyetelan tersebut, perlu dipahami adanya gangguan-gangguan yang dapat memengaruhi perubahan data visual saat pembacaan. Bagian *kedua* adalah pengecekan di sekitar tempat pemasangan kamera. Hal ini dilakukan agar hasil pemantauan lahar di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera pemantau di sabo dam PU-D2 dapat dianalisis

dengan baik oleh perangkat lunak pengolah data visual. Dalam pengecekan tersebut, hasil pemantauan video diupayakan jelas dengan sudut pengambilan gambar selalu pada lokasi yang sama dan fokus kamera terpusat di salah satu sayap bangunan sabo.

I. Hasil Uji Kinerja Peralatan

Berikut ini adalah hasil yang diperoleh dalam proses uji kinerja peralatan.

1. Proses pengolahan data visual sistem prakiraan dan peringatan dini banjir lahar ini menggunakan rekaman video hasil pemantauan selama pelaksanaan pengkajian;
2. Komputer pengolah data visual menggunakan jenis NUC Mini PC yang ukurannya relatif kecil. Hal ini disesuaikan dengan segi estetika penataan peralatan di stasiun induk pengendali dan agar komputer tersebut dapat diletakkan di balik layar monitor;
3. Penggunaan perangkat keras NUC Mini PC Intel(R) Celeron(R) CPU N3050 @ 1.60GHz dengan RAM 4Gb cukup untuk *debugging* semua program dari aplikasi yang direncanakan sehingga semua modul aplikasi dapat berjalan sesuai yang diharapkan;
4. Analisis data rekaman video aliran lahar yang berhasil ditangkap kamera masih mengalami beberapa kendala. Hal ini karena pemasangannya belum tepat seperti dipersyaratkan. Selain itu, kamera yang menangkap fenomena aliran lahar dengan skala kecil dan arah alirannya belum stabil pun akan menjadi kendala.

Pemasangan kamera yang belum tepat, pengambilan sudut gambar dan fokus kamera yang belum terpusat ke salah satu sayap dari bangunan sabo, serta aliran lahar pada saat pemantauan terjadi dalam skala kecil membuat hasil perhitungan kecepatan aliran lahar dengan perangkat lunak pengolah data visual ini perlu dikalibrasi.

Sebagai faktor koreksi untuk hasil perhitungan kecepatan aliran lahar dari rekaman video yang mengalami kendala dapat digunakan data hasil perhitungan kecepatan rata-rata aliran lahar yang terdeteksi sensor geophone.

Untuk menghasilkan data kecepatan dan tinggi aliran lahar yang akurat dalam pelaksanaan otomatisasi analisis data rekaman video aliran lahar yang berhasil ditangkap kamera, ada beberapa hal yang perlu dihindari:

1. Hindari adanya gerakan objek lain
Hal ini terjadi bila kamera bergetar akibat angin kencang di lapangan, tetesan air hujan yang tertangkap kamera pada kaca pelindung kamera, dan gerakan orang-orang di sekitar sungai yang tertangkap kamera saat aliran lahar berlangsung. Semua itu bisa diatasi dengan memfokuskan analisis pengamatan hanya pada titik aliran tertentu.
2. Pencahayaan lingkungan yang kurang memadai
Pencahayaan kurang memadai karena aliran lahar umumnya terjadi pada petang atau sore hari dan disertai hujan sangat deras. Selain itu, kabut di sekitar sungai mengakibatkan tangkapan kamera kurang jelas. Hal-hal tersebut dapat diatasi dengan mengatur tingkat kecerahan pada peralatan perekam video.
3. Spesifikasi perangkat keras yang memadai dan sesuai standar
Spesifikasi teknis peralatan yang digunakan harus memadai dan sesuai dengan standar kebutuhan. Spesifikasi yang tidak memadai dan tidak sesuai dengan standar mengakibatkan kualitas hasil pengamatan video aliran lahar kurang jelas dan kadang gambarnya tampak kabur.

Bab 6

Tampilan Informasi Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Berbasis Prakiraan Waktu Tiba Banjir



Tampilan informasi dari sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir adalah data yang nantinya disebarluaskan ke pengguna. Tampilan informasi tersebut berupa video fenomena terjadinya aliran lahar di lapangan, tinggi dan kecepatan aliran lahar, serta perkiraan waktu tiba banjir lahar di daerah yang diprakirakan terdampak.

Mengingat data yang disebarluaskan ke pengguna berformat video, diperlukan jaringan internet. Jaringan internet memungkinkan pengguna menerima informasi berupa video aliran lahar yang terjadi di lapangan dengan peralatan komputer yang terhubung dengan jaringan internet dan telepon genggam yang terhubung jaringan perangkat internet *broadband* nirkabel.

A. Tampilan Data Fenomena Aliran Lahar

Data video fenomena terjadinya aliran lahar yang terpantau secara *real-time* di layar monitor di stasiun induk pengendali didapat dari pemantauan kamera di stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera



Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 26. Contoh tampilan data fenomena aliran lahar yang terpantau kamera video di stasiun seismograf deteksi lahar PU-D2.

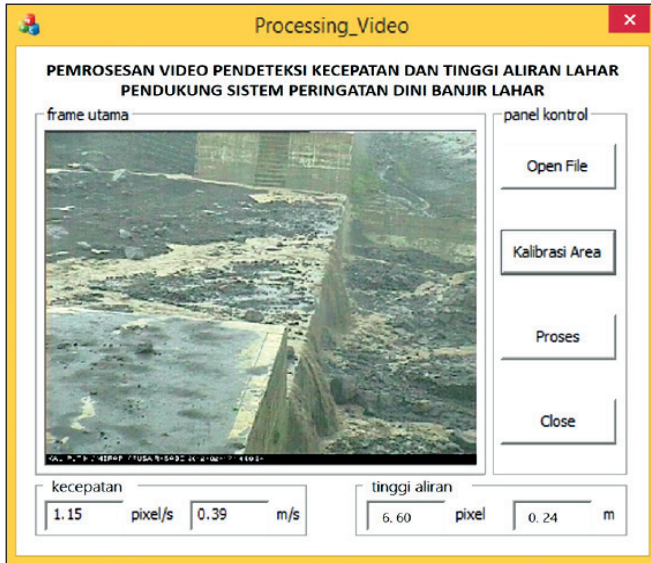
pemantau di bangunan sabo PU-D2. Contoh tampilan data tersebut terlihat pada Gambar 26.

B. Tampilan Data Kecepatan dan Tinggi Aliran Lahar

Data yang diolah dalam perangkat aplikasi pengolah data visual diambil dari salah satu kumpulan data video hasil pemantauan kamera di stasiun seismograf deteksi lahar dan di bangunan sabo PU-D2. Data video yang dianalisis tersebut bisa berupa data *video-capture* atau *video live-streaming*.

Data *video-capture* adalah cuplikan layar (*screenshot*) dari gambar berformat digital (*avi*). Objeknya adalah item yang ditampilkan layar monitor ketika komputer menganalisis data video hasil rekaman. Data *video-capture* tersebut digunakan jika aliran lahar yang tertangkap kamera skalanya kecil. Sementara itu, penggunaan data *video live-streaming* dilakukan bila aliran laharnya berskala besar. *Video live-streaming* yang diproses oleh pengolah data visual dikirim secara langsung (*real-time*) dari unit pemancar di stasiun seismograf deteksi lahar ke stasiun induk pengendali.

Tampilan informasi berupa tinggi dan kecepatan aliran lahar dari aplikasi pengolah data visual diperlihatkan pada Gambar 27.



Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 27. Contoh tampilan data tinggi dan kecepatan aliran lahar ketika terjadi aliran lahar skala kecil.

Ketika proses analisis video menggunakan data video *live-streaming*, tampilan menunjukkan adanya perpindahan dari frame 1 ke frame 2 dan frame selanjutnya yang dilakukan secara berkelanjutan.

Selama melakukan uji kinerja sistem peringatan dini banjir lahar di Kali Putih, tidak terjadi aliran lahar berskala besar. Hal ini karena intensitas hujan sebagai faktor pemicu terjadinya lahar di hulu Kali Putih lebih kecil dibandingkan dengan intensitas hujan di hilir sungai. Selain itu, penambangan pasir, kerakal, *boulder* pascaerupsi Gunung Api Merapi tahun 2010 dilakukan secara berlebihan hingga mencapai endapan material di hulu Kali Putih. Selain merusak morfologi dan ekosistem sungai, penambangan seperti ini juga dapat memicu terjadinya limpasan aliran lahar ke luar alur sungai sehingga membahayakan jiwa penambang. Penam-

bangunan pasir, kerakal, boulder yang dilakukan di dekat bangunan sabo dan fasilitas bangunan pengendali aliran lahar lainnya dapat merusak bangunan tersebut.

Karena terbatasnya data video kejadian aliran lahar yang cukup besar ketika uji kinerja peralatan, data video masih belum memenuhi persyaratan untuk dianalisis oleh aplikasi pengolah data visual. Pada saat terjadi aliran lahar yang relatif kecil, sudut datang aliran lahar terhadap kamera masih berubah-ubah arah. Selain itu, alirannya juga belum terfokus pada titik pengamatan di salah satu sayap bangunan sabo PU-D2. Jadi, yang diproses dalam pengolah data visual adalah data dari *video-capture*. Meskipun begitu, semua fitur dalam aplikasi pengolahan data visual dapat membaca kecepatan per satuan piksel dan meter/*second* (m/detik) serta tinggi muka aliran dengan satuan per piksel dan meter (m).


Akibat data video belum memenuhi persyaratan untuk dianalisis, perlu dilakukan perbandingan antara data kecepatan aliran lahar hasil perhitungan pengolah data visual dengan data kecepatan aliran lahar yang terdeteksi sensor getaran. Hasil perbandingan tersebut menunjukkan adanya perbedaan. Perbedaan tersebut muncul karena ada kendala dalam data rekaman video aliran lahar, yaitu gerakan objek lain dan pencahayaan lingkungan yang kurang memadai.

Untuk menghasilkan perhitungan data kecepatan aliran banjir lahar rata-rata yang akurat, perlu dilakukan kalibrasi. Langkah kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil analisis kecepatan aliran lahar menggunakan aplikasi pengolah data visual dengan hasil analisis data kecepatan (diperoleh dari perbandingan jarak lokasi kedua sensor getaran dengan selisih waktu ketika sensor mulai mendeteksi aliran lahar yang dipasang di lokasi PU-C13 dan PU-D2).

C. Tampilan Data Prakiraan Waktu Tiba Banjir

Dalam tampilan data informasi prakiraan waktu tiba banjir, jarak dari sabo dam PU-C13/PU-D2 ke daerah terdampak dibagi dengan kecepatan lahar rata-rata. Untuk efisiensi, kecepatan lahar rata-rata ditentukan sebesar 5 m/det. Tampilan data perkiraan waktu tiba banjir pada daerah terdampak dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Contoh tampilan data prakiraan waktu tiba banjir.



No	Antara Bangunan Sabo	Jarak	Waktu Tiba
1	PU-C13 (Gejukan) ~ PU-D2 (Mranggen)	1.348 m	4,50 menit
2	PU-D2 (Mranggen) ~ PU-C10 (Ngepos)	1.800 m	6,00 menit
3	PU-C10 (Ngepos) ~ PU-C2 (Gempol), Jl. Magelang	6.350 m	21,17 menit
4	PU-D2 (Mranggen) ~ PU-C2 (Gempol), Jl. Magelang	8.150 m	27,17 menit

Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Bab 7

Penyesuaian Istilah Peringatan Status Bahaya Aliran Lahar



Dalam sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir, informasi peringatan bahaya aliran lahar harus disebarluaskan. Informasi tersebut merupakan mata rantai penting yang menghubungkan antara tindakan kesiapsiagaan dan kegiatan tanggap darurat.

Penyampaian informasi peringatan status bahaya aliran lahar dilakukan agar instansi terkait dan masyarakat dapat melakukan usaha-usaha mengurangi risiko bencana dengan maksimal. Oleh karena itu, informasi peringatan status bahaya aliran lahar harus disampaikan secara tepat, detail, dan mudah dipahami oleh pengguna.

A. Tingkat Peringatan Status Bahaya

Bencana terjadi pada waktu yang tidak diperkirakan sehingga banyak orang yang mengalami kepanikan. Tentu sangat sulit bagi orang-orang tersebut untuk mengingat dan menafsirkan istilah bahaya yang didengarnya dalam informasi peringatan bahaya. Bila orang-orang keliru menafsirkan bencana yang sedang dihadapi,

upaya penyelamatan yang mereka lakukan juga berbeda. Hal inilah yang menyebabkan kegagalan penyampaian informasi bencana.

Agar informasi peringatan bahaya mudah dipahami oleh pengguna, perlu dilakukan pemilihan istilah status bahaya. Hal ini untuk mencegah risiko terjadinya salah persepsi terkait dengan bencana yang sedang dihadapi masyarakat, terlebih bila bencana erupsi dan banjir lahar berlangsung dalam waktu yang bersamaan. Sebagai contoh, masyarakat sempat kebingungan soal peringatan status bahaya saat erupsi Gunung Api Merapi pada Oktober 2010 dan Gamalama pada Mei 2012. Hal ini terjadi karena ada perbedaan istilah. Bahaya erupsi biasanya menggunakan istilah Aktif Normal-Waspada-Siaga-Awas, sedangkan bahaya banjir lahar menggunakan istilah yang digunakan untuk banjir, yaitu Siaga I-Siaga II-Siaga III-Siaga IV. Dalam hal ini, ada persamaan istilah pada kata siaga, tetapi ada perbedaan makna.

Untuk menghindari kegagalan penyampaian informasi peringatan status bahaya banjir lahar, istilah yang digunakan haruslah tepat dan mudah dipahami agar tidak terjadi salah persepsi. Oleh karena itu, istilah dalam status bahaya lahar sebaiknya disamakan dengan istilah bahaya erupsi yang sudah sangat dipahami masyarakat di sekitar daerah gunung api. Untuk membedakannya dengan istilah erupsi, hanya perlu ditambahkan kata “lahar” sehingga istilah peringatan status bahaya bencana banjir lahar sebagai berikut.

1. Status Normal Lahar

Saat status normal, di daerah hulu sungai tidak terdapat endapan vulkanis atau endapan vulkanis sisa erupsi sebelumnya. Selain itu, di daerah tersebut biasanya tidak terjadi hujan; jika terjadi hujan, intensitasnya rendah atau durasinya singkat. Namun, pada kondisi ini, masyarakat di daerah yang berpotensi terdampak lahar (jarak minimal 1 km dari hilir stasiun seismograf awal) tetap harus

menyadari bahwa mereka tinggal di daerah berisiko terdampak lahar.

2. Status Waspada Lahar

Saat status waspada, di daerah hulu sungai terdapat endapan vulkanis yang masih labil pascaerupsi terakhir (diperkirakan usia endapan di bawah 5 tahun). Selain itu, terjadi hujan di daerah tersebut. Data hujan dapat diperoleh bila di daerah tersebut dipasang penakar hujan otomatis yang datanya dikirim secara telemetri. Namun, apabila alat tersebut belum dipasang, hujan dapat dimonitor dari sinyal amplitudo yang dikirim sensor *geophone* dan seismograf. Ketika terdeteksi oleh *geophone*, getaran dari partikel air hujan yang jatuh di permukaan tanah akan ditampilkan dalam grafik seismograf pada layar monitor di stasiun induk (amplitudo yang semula kecil kemudian membesar dan sinyal yang ditampilkan terlihat berkelanjutan).

Ketika terjadi aliran lahar di hulu sungai, layar monitor di stasiun induk akan menunjukkan gambar amplitudo aliran lahar yang terdeteksi *geophone*. Tampilan grafik amplitudo dapat dilihat pada Gambar 17 (hlm. 52). Ketika pada layar monitor terlihat bahwa aliran lahar terjadi dalam skala kecil (misalnya di bawah 0,5 meter), status bahaya yang ditetapkan adalah waspada lahar. Dalam kondisi ini, masyarakat yang tinggal di daerah yang berpotensi terdampak lahar (jarak minimal 1 km dari hilir stasiun seismograf deteksi lahar awal) harus berhati-hati dan meningkatkan kewaspadaan akan risiko lahar yang mungkin terjadi di daerah permukiman mereka.

3. Status Siaga Lahar

Saat status siaga, di daerah hulu sungai terdapat endapan vulkanis sisa erupsi terakhir yang masih labil (usia endapan di bawah 5 tahun) dan terjadi hujan. Partikel air hujan yang jatuh di permukaan tanah getarannya terdeteksi oleh *geophone* dan akan ditampilkan

kan pada layar monitor di stasiun induk dalam bentuk grafik RSAM (amplitudo yang semakin membesar dan berkelanjutan).

Aliran lahar yang semakin membesar di daerah hulu sungai akan ditampilkan pada layar monitor di stasiun induk. Tampilannya berupa grafik getaran amplitudo aliran lahar yang semakin membesar di stasiun seismograf deteksi lahar awal dan stasiun seismograf yang dilengkapi kamera (lihat Gambar 16). Pada layar monitor juga terlihat fenomena aliran lahar dengan tinggi aliran pada mercu sabo dam mencapai satu meter sehingga status bahaya lahar ditetapkan sebagai siaga lahar. Pada kondisi ini, masyarakat yang tinggal di daerah yang berpotensi terdampak lahar (minimal satu kilometer dari hilir stasiun seismograf awal) harus bersiap-siap mengungsi ke tempat yang lebih aman.

4. Status Awas Lahar

Saat status awas, di daerah hulu sungai terdapat endapan vulkanis yang masih labil pascaerupsi terakhir (diperkirakan usia endapan di bawah lima tahun) dan di daerah tersebut terjadi hujan. Layar monitor di stasiun induk menunjukkan adanya aliran lahar yang terdeteksi oleh *geophone*. Kondisi aliran lahar ditunjukkan dengan tampilan grafik getaran amplitudo banjir di stasiun seismograf deteksi lahar awal, dan di stasiun seismograf dan kamera, nilai RSAM-nya sudah melebihi 5.000 Hertz (lihat Gambar 16). Pada layar monitor juga terlihat fenomena aliran lahar pada mercu sabo dam yang mencapai lebih dari tiga meter sehingga status bahaya pun ditetapkan menjadi awas lahar. Pada kondisi ini, masyarakat di daerah yang berpotensi terdampak lahar (jarak minimal satu km dari hilir stasiun seismograf awal) harus mengungsi ke tempat yang lebih aman.

B. Pengguna Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar

Pengguna dari sistem peringatan dini banjir lahar ini adalah

1. BPBD/BNPB sebagai unsur kelembagaan yang bertanggung jawab atas mitigasi bencana;
2. Balai Pengelola Wilayah Sungai sebagai unsur kelembagaan dari Kementerian PUPR pendukung rehabilitasi pascabencana;
3. Instansi terkait, unsur kelembagaan dari jajaran Pemerintah Daerah, TNI, POLRI, dan Basarnas;
4. Komunitas peduli bencana sebagai unsur masyarakat.

Bab 8

Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar Pada Masa Mendatang



Sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir menggunakan jaringan *broadband* untuk lalu-lintas pengiriman data. Bila sistem tersebut berfungsi sesuai dengan rencana, informasi yang diberikan kepada pengguna akan tersebar secara cepat, jelas, dan lebih akurat. Dalam sistem lama, informasi yang disampaikan BPBD kepada pengguna hanya berupa informasi audio. Setelah menggunakan sistem ini, informasi yang disampaikan berupa video yang dilengkapi dengan data digital.

Aplikasi komputer digunakan agar dapat menyelesaikan masalah sesuai dengan kebutuhan pengguna dalam waktu yang singkat, atau dengan kata lain, melakukan pekerjaan sesuai dengan perintah sistem. Sebagai contoh, penggunaan aplikasi *Earthworm* dan pengolah data visual dalam server di stasiun induk pengendali dapat menambah keakuratan sistem tersebut.

Dalam aplikasi *Earthworm*, sinyal seismik yang terdeteksi sensor getaran di lapangan digambarkan dalam bentuk gelombang seismik fluktuasi energi aliran lahar. Gelombang seismik tersebut lalu dimanfaatkan untuk memberikan informasi prakiraan dan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

peringatan dini banjir lahar secara otomatis dalam bentuk SMS dan surat elektronik (surel). Selain itu, waktu terdeteksinya aliran lahar oleh kedua sensor getaran di dua lokasi yang berbeda digunakan untuk menghitung kecepatan rata-rata aliran lahar yang mengalir di sungai yang diamati. Dengan diketahuinya kecepatan rata-rata aliran lahar, prakiraan waktu tiba banjir lahar di daerah terdampak dapat diketahui. Jadi, pengguna dapat lebih siap siaga dalam mengurangi risiko banjir lahar.

Aplikasi pengolah data visual yang menganalisis tinggi dan kecepatan aliran lahar digunakan untuk menambah informasi data video fenomena aliran lahar yang terjadi di lapangan. Aplikasi ini juga dapat dimanfaatkan untuk mengoreksi perhitungan kecepatan rata-rata aliran lahar berdasarkan perbandingan waktu kedua sensor getaran dalam mendeteksi aliran lahar. Dengan adanya pengoreksian tersebut, prakiraan waktu tiba banjir di daerah terdampak akan semakin akurat.

Penggunaan jaringan *broadband* membuat akses internet menjadi lebih cepat dan selalu terkoneksi. Hal ini membuat pengiriman data video jauh lebih cepat dibandingkan dengan bila menggunakan modem *dial-up* biasa. Pada masa mendatang, sistem peringatan dini bencana harus dapat menyampaikan konten informasi yang semakin banyak dan semakin cepat. Dalam hal ini, jaringan *broadband* menjadi pilihan tepat untuk pengembangan sistem peringatan dini banjir lahar.

Pengembangan sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir dapat dilakukan dengan menambahkan aplikasi-aplikasi baru. Aplikasi baru tersebut dapat melengkapi informasi yang telah ada dalam sistem sebelumnya. Selain itu, aplikasi baru harus dapat menyesuaikan dengan layanan yang disediakan (*fitur*) dan kelakuan atau sifat objek program (*behavior*) untuk implementasi sesuai dengan kebutuhan di lapangan.

Terkait dengan adanya Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 Pasal 46 dan 47 tentang Penanggulangan Bencana, Peraturan

Pemerintah Nomor 21 Tahun 2008 Pasal 19 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana. Serta Peraturan Kepala BNPB Nomor 3 Tahun 2008 Bab 2 tentang Pedoman Pembentukan BPBD, pemerintah daerah bertanggung jawab untuk segera dan secara luas mengumumkan arahan yang jelas dan instruktif untuk membantu penduduk, para penambang yang beraktivitas dan penduduk yang melintas jembatan di daerah aliran sungai lahar untuk bereaksi cepat dan tepat terhadap ancaman banjir lahar. Untuk melaksanakan tanggung jawabnya, pemerintah daerah membentuk Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) dengan Pusat Pengendalian Operasi (Pusdalops) Penanggulangan Bencana di setiap daerah Kabupaten/Kota, sebagai salah satu komponennya.

Pada saat terjadi bencana Pusdalops mempunyai peran penting dan menjadi garda terdepan untuk menggali informasi di daerah terdampak (BNPB. 2016). Diharapkan ketika terjadi bencana, Pusdalops dalam waktu sesingkat mungkin setelah kejadian harus segera menyampaikan apa yang terjadi kepada Kepala Pelaksana (Kepala BPBD) untuk membuat “pernyataan resmi terkait bencana“. Informasi Pusdalops kepada Kepala BPBD dapat menggunakan berbagai saluran komunikasi, baik melalui surat elektronik, sosial media resmi, *WhatsApp*, telepon seluler dan sebagainya.

Dalam Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar, Pusdalops Daerah memiliki tiga fungsi utama, yaitu menerima peringatan banjir lahar dari Instansi Pengelola Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat), mengambil keputusan apakah evakuasi diperlukan, dan menyebarkan peringatan banjir lahar dan arahan evakuasi kepada masyarakat.

Untuk itu, dalam memenuhi tuntutan Undang-Undang Penanggulangan Bencana perlu dipikirkan adanya suatu Sistem Penyebarluasan Informasi Banjir Lahar kepada lembaga perantara, dengan Pusdalops Daerah (Provinsi atau Kabupaten) sebagai salah satunya. Yang termasuk ke dalam lembaga perantara di antaranya Pusdalops BPBD pemerintah daerah provinsi/kabupaten atau kota,

Buku ini tidak diperjualbelikan.

instansi Kementerian PUPR terkait, POLRI, media (stasiun televisi dan radio), dan pihak swasta atau komunitas peduli bencana.

Perangkat dan program Sistem Penyebarluasan Informasi Banjir Lahar yang dipasang oleh Instansi Pengelola Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar (Kementerian Pekerjaan Umum dan Pemukiman Rakyat) di kantor Pusdalops dapat digunakan untuk menjalankan dua dari tiga fungsi utama Pusdalops, yaitu menerima pesan peringatan banjir lahar dan menyebarluaskan peringatan dan arahan kepada masyarakat berisiko. Selain di Pusdalops Daerah, perangkat dan program Sistem Penyebarluasan Informasi Banjir Lahar juga ditempatkan di lembaga perantara lainnya, seperti instansi terkait lainnya: Balai Besar Wilayah Sungai/Balai Wilayah Sungai, POLRI, Stasiun TV, dan komunitas peduli bencana lahar.

Berdasarkan fungsinya, perangkat dan program Sistem Penyebarluasan Informasi Banjir Lahar yang dipasang oleh Instansi Pengelola Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar adalah sistem aplikasi diseminasi berbasis komputer yang digunakan untuk mengirimkan informasi banjir lahar dan informasi lainnya ke Pusdalops BPBD, Balai Besar Wilayah Sungai/Balai Wilayah Sungai, Polri, Stasiun TV, dan komunitas peduli bencana lahar.

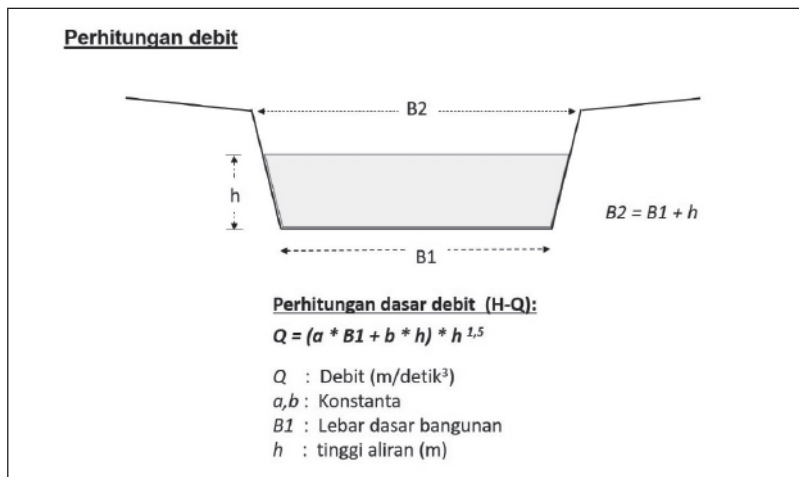
Koneksi yang digunakan untuk mengirimkan informasi dari Instansi Pengelola Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar ke lembaga perantara dapat melalui:

1. Internet/VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) adalah stasiun penerima dan pengirim sinyal dari satelit, merupakan jenis komunikasi IP to IP yang bersifat dua arah (dari server bisa menjangkau *client*, dan sebaliknya),
2. *Digital Video Broadcasting* (DVB), adalah jenis komunikasi satu arah dari server ke *client* (server bisa menjangkau *client*, namun tidak sebaliknya).

Aliran lahar digambarkan lewat perbandingan antara volume dan waktu dengan menggunakan satuan debit. Satuan debit me-

mang umum digunakan untuk menentukan volume cairan yang mengalir dalam satuan waktu tertentu. Melalui data debit, nantinya dapat diperkirakan kemampuan suatu alur sungai beserta bangunan air dalam mengalirkan aliran pada debit tertentu. Dalam sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir, informasi yang diberikan kepada pengguna terkait aliran lahar hanyalah tinggi dan kecepatan banjir lahar. Oleh karena itu, pada masa mendatang dapat dilakukan pengembangan agar pengguna bisa memperoleh informasi mengenai debit aliran lahar. Contoh pengembangan yang bisa dilakukan adalah menambahkan aplikasi pada komputer di stasiun induk pengendali. Aplikasi yang dimaksud adalah yang dapat mengonversi satuan tinggi aliran banjir (m) menjadi satuan debit (m/detik^3) seperti pada Gambar 28.

Melalui rumus perhitungan dasar debit, dapat dibuat aplikasi baru untuk mengonversi informasi tinggi aliran yang diperoleh dari perhitungan aplikasi pengolahan data visual dalam satuan (m) menjadi nilai debit dengan satuan (m/detik^3).



Sumber: Puslitbang SDA (2015)

Gambar 28. Sketsa Perhitungan Dasar Debit Aliran Lahar

Kesimpulannya, masih terbuka lebar peluang atau inovasi baru dalam sistem peringatan dini banjir lahar berbasis prakiraan waktu tiba banjir. Hal ini agar sistem tersebut berdaya guna dalam mengurangi korban jiwa dan harta benda akibat bencana banjir lahar.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Pustaka



- Andriyanto, W. (2011). Buku aksi pemuda panduan pengurangan risiko bencana berbasis komunitas untuk pemuda. Jakarta: Deputi Bidang Pemberdayaan Pemuda, Kementerian Pemuda dan Olahraga Republik Indonesia.
- Awaludin, L., Harjoko, A., & Sumiharto, R. (2012). Pemrosesan video pendeteksi kecepatan dan ketinggian aliran lahar dingin pendukung sistem peringatan dini. *Jurnal IJEIS*, 2(2), 187–198.
- Balai Sabo. (2011). Laporan survey lapangan pascaerupsi Gunungapi Merapi 2000. Yogyakarta: Balai Litbang Sabo, Pusat Litbang Sumber Daya Air, Badan Litbang Kementerian PUPR.
- BNPB. (2016). Pusdalops Garda Terdepan Menggali Informasi Saat Bencana. 15 Maret 2016. Diakses pada 12 Agustus 2017 dari <https://www.bnpb.go.id/pusdalops-garda-terdepan-menggali-informasi-saat-bencana->
- Chen, D., Hsiao, N-C., & Wu, Y. M. (2015). The Earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 568–579. Diakses pada 10 Maret 2019 dari <https://doi.org/10.1785/0120140147>.

Buku ini tidak diperjualbelikan.


- Daryono. (2018). Aktivitas gempabumi tektonik di Yogyakarta menjelang erupsi Merapi 2010. Diakses pada 12 Oktober 2018 dari http://data.bmkg.go.id/share/Dokumen/aktivitas_gempabumi_tektonik_di_yogyakarta_menjelang_erupsi_merapi_2010_oleh_daryono_bmkg_2010.pdf.
- Departemen Pekerjaan Umum/JICA (1984). Guidelines for the setting of rainfall for warning issuance and evacuation instruction against debris flow disaster (tentative draft). Jepang.
- Dewan Perwakilan Rakyat Republik Indonesia. (2007). Undang-Undang Negara Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana.
- Dondin, F, J-Y, Lynch, L., Ramsingh, C., Ryan, G, A., Papadopoulous, I., Rueppe, D., Joseph, E,P, Latchman, J, L., Robertson, R, E, A., Nath, N., Mathura, R., Balchan, A., George, S., Juman, L., Madoo, F, Manette, G., & Ramsingh, H. (2019). The University of the West Indies-Seismic Research Centre Volcano Monitoring Network: evolution since 1953 and challenges in maintaining a state-of-the-art network in a small island economy. *Geosciences*, 9(2), 71. Diakses pada 10 Maret 2019 dari <https://doi: 10.3390/geosciences9020071>.
- Eggert, S., & Walter, T. R. (2009). Volcanic activity before and after large tectonic earthquakes: observations and statistical significance. *Tectonophysics*, 471(1–2), 14–26. doi:10.1016/j.tecto.2008.10.003.
- Friberg, P, Lisowsk, S., Dricker, I., & Sidney, H. (2010). Earthworm in the 21st century. *Geophysical Research*, 12. EGU General Assembly 2010. Instrumental Software Technologies, Inc., New Paltz, NY, 12561, USA.
- History.com Editors. (2009). Krakatau explodes, A & E television networks, 24 November 2009. Diakses pada 16 Juli 2019 dari <https://www.history.com/this-day-in-history/krakatau-explodes>.
- Isti. (2016). Earthquake Monitoring and Seismic Software. *Instrumental Software Technologies, Inc. (ISTI)*, 6 November 2016. Diakses pada 15 Februari 2017 dari <http://www.isti.com/products/eq-monitoring-seismic-software/earthworm/>.
- Kepala BNPB. (2008). Nomor 3 tahun 2008 tentang Pedoman Pembentukan Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Lavigne, F, Thouret, J. C., Voight, B., Hadmoko, D. S., Sukatja, C. B. (2007). Lahars in Java: Initiations, Dynamics, Hazard Assessment and Deposition Processes. *Jurnal Forum Geografi*, 21(1), 17–32.

- Lavigne, F., Thouret, J. C., Voight, B., Suwa, H., & Sumaryono, A. (2000a). Lahars at Merapi Volcano, Central Java: an overview. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 423–456.
- Lavigne, F., Thouret, J.C., Voight, B., Young, K., LaHusen, R., Marso, J., Suwa, H., Sumaryono, A., Sayudi, D.S., & Dejean, M. (2000b). Instrumental lahar monitoring at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100(1), 457–478.
- Letusan Krakatau yang menewaskan puluhan ribu orang dan mengguncangkan dunia. (2018). BBC Indonesia News. Arsip online majalah The Atlantic, September 1884. Diakses 16 Juli 2019 dari <https://www.bbc.com/indonesia/trensosial-46683658>.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan. (2005). Procedure and examples of setting standard for critical rainfall for warning and evacuation from sediment-related disasters. *The National Institute for Land and Infrastructure Management*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2008). An initial report on the management of environmental data. Required to minimize the impact of tsunamis in the United States, prepared for the National Tsunami Hazard Mitigation Program. Version 1.0. January 2008. Washington, DC 20230.
- Octobryan, (ed). (2016, Desember 29). Indonesia catat rekor bencana nasional. *Net.z*. Diakses pada 2 Juni 2017 dari <https://netz.id/news/2016/12/29/00516-01616/1018291216/indonesia-catat-rekor-bencana-nasional>.
- pccontrol. (2012). Pengetahuan Dasar IP Camera (Apa bedanya dgn CCTV?). Diakses pada 2 Februari 2013 dari <http://pcontrol.wordpress.com/2012/07/13/>.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2007). Undang-Undang Negara Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2008). Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2008 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana.
- Piko, J. M. (2016). 15 Upaya penanggulangan bencana dari BNPB. Blok aksi cepat tanggap bencana dan kemanusiaan. Diakses pada 24 Agustus 2017 dari <https://blog.act.id/15-upaya-penanggulangan-bencana-dari-bnpb/>.

- Puslitbang Sumber Daya Air. (2015). *Laporan akhir kegiatan pengembangan sistem pemantauan banjir lahar di daerah Gunung Merapi*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air.
- Quintiliani, M., & Pintore, S. (2013). Mole: an open near real-time database centric Earthworm sub-system. *Seismological Research Letters*, 84(4), 695–701. Diakses pada 10 Maret 2019 dari <https://doi.org/10.1785/0220120066>
- Stepnov, A. A., Konovalov, A. V., Gavrilov, A. V., & Manaychev, K. A. (2017). Earthworm-based automatic system for real-time calculation of local earthquake source parameters. *Seismic Instruments*, 53(4), 267–279. Diakses pada 10 Maret 2019 dari <https://doi.org/10.3103/S0747923917040107>.
- Sukatja, C. B. (2016). Early warning system for lahar flow based on lahar arrival time forecasting. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 6(11), 11–21.
- Sukatja, B., Sudibyakto, & Voskuil, RPGA. (2014). Urban risk assessment of lahar flows in Merapi Volcano (study case: Muntilan urban area, Central Java). *Indonesian Journal of Geography*, 46(1), 62.
- Sulistiyani, N., Leyla S. A., Sulistio, A., Nurudin, & Rozin, M. (2015). Aplikasi metode korelasi silang untuk perhitungan kecepatan aliran lahar di K. Putih, K. Boyong, dan K. Senowo. 1. *Yogyakarta: Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi*.
- Thomas, E. (2015). The history of Earthworm project. The United States Geological Survey. April 24, 2015. Diakses February 12, 2017 dari <http://www.earthwormcentral.org/documentation3/index.html>.
- Waspada, Cincin Api Pasifik mulai beraksi. Gempa terus terjadi karena sesar menuju keseimbangan baru. (2008). Diakses pada 20 Mei 2018 dari <https://www.pressreader.com/indonesia/jawa-pos/20180125/page/1/textview>.
- Wibowo, S. B., Lavigne, F., Mouroto, P., Métaxianc, J. P., Zeghdoudid, M., Virmoux, C., Sukatja, C. B., Hadmoko, D. S., & Mutaqin, B. W. (2015). Coupling between video and seismic data analysis for the study of lahar dynamics at merapi volcano, Indonesia. July 2015. *Géomorphologie relief processus environnement*, 21(3), 251–265.

- Widayanti, T. S. (2013). Pendokumentasian arsip bencana upaya mengetahui pola penanggulangan bencana. *Majalah ARSIP, Media Kearsipan Negara-Arsip Nasional Republik Indonesia*, Edisi 60, Januari-April, 2013). Diakses pada 24 Juli 2018 dari https://www.anri.go.id/assets/collections/files/mkn_60_arsip_dan_mana-jemen_bencana_di_negeri_cincin_api-568c89276b1dc.pdf.
- Widiyatmoko, P. (2011). Perkumpulan inisiatif inisiatif RAD pengurangan risiko bencana Kabupaten Bandung. Diakses pada 16 Juli 2017 dari <http://inisiatif.org/?p=10980>.

Daftar Singkatan



ADC	: <i>Analog digital converter</i>
AP	: <i>Access point</i>
API	: <i>Application programming interface</i>
Basarnas	: Badan SAR Nasional
BBWS SO	: Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak
BNPB	: Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BMKG	: Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika
BPBD	: Badan Penanggulangan Bencana Daerah
BPTKG	: Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi
BWS	: Balai Wilayah Sungai
CPE	: <i>Customer-premise equipment</i>
CPU	: <i>Computer processing unit</i>
2D	: <i>2 Dimension</i>
DAS	: Daerah aliran sungai
DEM	: <i>Digital elevation model</i>
Det	: Detik
GB	: Giga bit

Buku ini tidak diperjualbelikan.

GHz	: Giga hertz
GSM	: Global system for mobile communication
GUI	: Graphical user interface
IDE	: Integrated deviation environment
IP Address	: Internetworking protocol address
IP Camera	: Internetworking protocol camera
ISO/IEC	: International Organization of Standardization/ International Electrotechnical Comission (Organisasi Internasional untuk Standardisasi)
Km	: Kilo meter
LSM	: Lembaga swadaya masyarakat
m	: Meter
Mc-VCO	: Microcontrolled voltage controller oscillator
MFC	: Microsoft Foundation Classes
NIC	: Network interface card
NOAA	: The National Oceanic and Atmospheric Administration
NUC	: Next unit of computing
OOP	: Object oriented programming
OpenCV	: Open Computer Vision
Pemda	: Pemerintah Daerah
PC	: Personal computer
PTZ	: Pan-tilt-zoom
PSN	: Pedoman standardisasi nasional
PTH1	: Kali Putih Sensor no. 1
PTH2	: Kali Putih Sensor no. 2
POLRI	: Polisi Republik Indonesia
PU-C13	: Kali Putih consolidation dam no. 13
PU-D2	: Kali Putih sabo dam no. 2
PUPR	: Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
PVMBG	: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi
RAM	: Random access memory
RGB	: Red Green Blue

ROI	: <i>Region on Interest</i>
RSAM	: <i>Real-time Seismic Amplitudo Measurement</i>
SMS	: <i>Short Message Service</i>
SWARM	: <i>Seismic Wave Analysis and Real Time Monitor</i>
SPS	: <i>Semi intelligent process selector</i>
TCP	: <i>Transmission control protocol</i>
TNI	: <i>Tentara Nasional Indonesia</i>
USGS	: <i>United States Geological Survey</i>
UU	: <i>Undang-Undang</i>
Wifi	: <i>Wireless fidelity</i>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Indeks



- Analisis Data Visual untuk Pra-kiraan, 57
- Aplikasi Earthworm, 33
- Aplikasi Pengolah Data Visual, 58, 64
- Aplikasi SMS Server, 52
- Banjir lahar, 6–9, 15, 21–23, 25, 27, 28, 33–36, 39, 40, 42, 49–55, 57, 73, 74, 77, 78, 80, 83–88, 92, 103
- BNPB, 15, 80, 85, 89–91, 95
- BPBD, 15, 16, 80, 83, 85, 86, 95
- Broadband 2,4 GHz, 40
- Data Kecepatan dan Tinggi Aliran Lahar, 72
- Data video-capture, 72
- Digital elevation model (DEM), 24
- File video, 18, 19, 64
- Frame file video, 58
- Frekuensi 5,8 GHz, 41
- Frekuensi radio 2,4/5,8 GHz, 17
- Geophone, 28, 31, 34, 36, 42, 44, 46, 57, 79, 80
- Informasi status bahaya, 54
- Internet broadband, 18, 25, 41
- Jaringan broadband, 17, 35, 36, 83, 84
- Kali Bebeng, 48
- Kali Boyong, 48, 92
- Kearifan lokal, 21
- Kecepatan dan tinggi aliran, 60, 64
- Kali Gendol, 48
- Kali Putih, 42, 46–49, 51, 52, 73,

- 92
- Lahar, 6–9, 18, 21–25, 27, 28, 31, 34–36, 38–44, 46, 48–55, 57–60, 64, 72–75, 77–80, 83–86, 88, 89, 91, 92, 103
- Layanan antarmuka, 29
- Metode Garis Kritis, 22
- Metode Konvensional, 21
- Microsoft Visual Studio 2010, 62
- Model simulasi 2D, 24
- Modem dial-up, 17, 84
- Modul analisis data video, 35
- Modul archman, 33
- Modul Earthworm, 28, 29, 31, 32
- Modul ew2file, 33
- Modul ew2rsam, 33
- Modul penghitung kecepatan aliran, 34
- Modul pengoperasi sistem perekaman video, 34
- Modul perhitungan waktu tiba banjir, 35
- Modul psnadsend, 33
- Modul SWARM, 34
- Modul vhmmailman, 33
- Nirkabel (broadband wireless access), 17
- Opencv 2.3.1 62
- Penanggulangan bencana 8, 12, 13, 15–17, 91
- Pengendalian Banjir Lahar, 8
- Pengolah Data Visual, 60
- Peraturan Kepala BNPB Nomor 3 Tahun 2008 Bab 2 tentang Pedoman Pembentukan BPBD, 85
- Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2008 Pasal 19 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana, 85
- Persamaan Garis Kritis, 22
- Pesan singkat/SMS, 27
- Prakiraan Waktu Tiba Banjir, 27, 36, 49, 75
- PU-D2 Sabo dam, 40–44, 46, 47, 49–51, 53, 72, 74, 75, 96
- Pusat Pengendalian Operasi (Pusdalops), 85
- Real-time, 30, 32, 33, 34, 39, 46, 54, 63, 72, 92
- RSAM, 33, 34, 46, 49–54, 79, 80, 97
- Sabo dam PU-C13, 39, 41, 44, 47, 75
- Satuan debit (m/detik³), 87
- Seismik, 2, 28–34, 38, 40, 41, 43, 46, 50, 51, 53, 54, 57, 58, 83
- Sistem peringatan dini, 14–16, 18, 25, 27, 35, 36, 39, 40, 42, 50, 52, 53, 54, 57, 73, 77, 80, 84, 87–89, 104
- Sistem Peringatan Dini Banjir Lahar, 16, 21, 36, 45, 80, 85, 86

- Stasiun induk kendali, 41, 46
- Stasiun penerima dan pengendali, 39
- Stasiun pengulang (repeater), 38
- Stasiun Seismograf Deteksi Lahar Awal, 28, 34–44, 46, 50, 51, 54, 57, 79, 80
- Stasiun seismograf deteksi lahar dan kamera, 8, 36, 38–44, 46, 50
- Stasiun Seismograf Deteksi Lahar dengan Kamera, 37
- Status Awas, 80
- Status Normal, 78
- Status Siaga, 79
- Status Waspada, 79
- Streaming video, 18, 41
- Surat elektronik/surel, 27
- Teknologi sabo dengan metode non-struktur (non-fisik), 9
- Teknologi sabo dengan metode struktur (fisik), 9
- Tingkat Peringatan Status Bahaya, 77
- Undang-Undang No. 24 Tahun 2007, 8
- Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 Pasal 46 dan 47 tentang Penanggulangan Bencana, 84
- Undang-Undang Penanggulangan Bencana No. 24 tahun 2007, 11
- Video live-streaming, 72, 73
- Wireless broadband, 17, 18

Biografi Penulis



Cosmas Bambang Sukatja

Lahir di Yogyakarta 31 Maret 1956. Merupakan alumni Teknik Elektro STTNas Yogyakarta dan *Environmental Science (Geo-Information for Spatial Planning and Risk Management)* Universitas Gadjah Mada ini menikah dengan Bernadetta Sri Widayati dan dikaruniai dua orang anak laki-laki. Mulai bekerja di Balai Litbang Sabo, Pusat Litbang Sumber Daya Air tahun 1984. Di awal kariernya pernah mengikuti program pelatihan JICA di Jepang pada tahun 1985 selama 3 bulan dan selama 6 bulan pada tahun 1987. Materi pelatihannya tentang pemahaman, pengoperasian, dan pemeliharaan peralatan Radar Pengukur Curah Hujan dan Peralatan Telemetering untuk sistem prakiraan dan peringatan dini banjir debris. Sejak tahun 1986 hingga 2010 menjabat sebagai koordinator pengoperasian, pemeliharaan, dan pengembangan sistem prakiraan dan peringatan dini banjir lahar di daerah Gunung Merapi dan sekitarnya. Pada tahun 2000, selama 3 bulan terlibat dalam *JICA Project for Review Master Plan Study of Mt. Merapi and Semeru Volcanic Disaster Counter Measures* untuk merencanakan lokasi, pengembangan jaringan, peralatan hidrologi sistem telemetering dan radio komunikasi untuk penyebarluasan informasi terjadinya lahar. Pada tahun 2006, selama 3 bulan terlibat dalam *JICA Project for Urgent Disaster Reduction Project for Mt. Bawakaraeng, South Sulawesi*, merencanakan revitalisasi untuk desain, dan pemasangan peralatan hidrologi sistem telemetering dan radio komunikasi peringatan dini banjir

Buku ini tidak diperjualbelikan.

lahar. Pada tahun 1990 hingga sekarang menjadi peneliti di Balai Litbang Sabo.

Beberapa makalah yang terkait dengan pengkajian kinerja peralatan dan uji bunyi peralatan penghasil suara untuk sistem peringatan dini banjir lahar telah ditulis dan diterbitkannya pada jurnal ilmiah nasional, seperti Jurnal Teknik Sumber Daya Air, Jurnal Irigasi, dan Jurnal Sumber Daya Air. Dalam kolaborasinya dengan peneliti nasional dan asing seperti dari Perancis serta Jepang ada beberapa makalah yang dipresentasikan dalam Seminar Internasional dan diterbitkan dalam Jurnal Internasional.

Selama bekerja sebagai peneliti bidang teknik sabo pada tahun 2011–2012 melakukan penelitian di daerah Gunung Api Semeru untuk melakukan revitalisasi peralatan sistem prakiraan dan peringatan dini banjir lahar yang lama rusak. Dalam revitalisasi tersebut dilakukan penggantian beberapa peralatan yang rusak dan sudah tidak diproduksi lagi dengan peralatan dan sistem pengiriman data yang semula merupakan barang-barang impor menjadi peralatan produk lokal. Pada tahun 2014–2015 melakukan penelitian untuk mengembangkan sistem prakiraan dan peringatan dini banjir lahar di daerah gunung api yang semula berbasis data curah hujan dikembangkan berbasis analisis getaran dan visual agar dapat memprakirakan waktu tiba banjirnya secara lebih akurat.

SISTEM PERINGATAN DINI

BANJIR LAHAR

BERBASIS PRAKIRAAN
WAKTU TIBA BANJIR

Penerbitan buku ini merupakan salah satu upaya untuk mendiseminasikan hasil kegiatan penelitian dan pengembangan teknologi mitigasi bencana debris, Balai Litbang Sabo, Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Kementerian PUPR, khususnya tentang pemanfaatan sistem peringatan dini berbasis perkiraan waktu. Adanya sistem peringatan dini banjir lahar ini diharapkan dapat mengurangi risiko dan dampak bencana banjir lahar, yaitu dengan meningkatkan kesiapsiagaan penduduk di wilayah gunung api.

Semoga buku ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, dan para pemangku kepentingan, khususnya dalam pemanfaatan sistem peringatan dini banjir lahar. Dengan demikian, usaha pengurangan risiko bencana banjir lahar dan kesiapsiagaan penduduk yang terdampak dapat ditingkatkan.



Diterbitkan oleh:

LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI Lt. 6

Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta Selatan 12710

Telp.: +62 21 573 3465 | Whatsapp +62 812 2228 485

E-mail: press@mail.lipi.go.id

Website: lipipress.lipi.go.id | penerbit.lipi.go.id

ISBN 978-602-496-076-6



9 786024 960766