

## Desain Alat Pendeteksi Bencana Longsor Di Kawasan Wisata Situ Rawa Gede Berdasarkan Analisis Deskriptif dan Sistem Informasi Geografis

Iit Adhitia<sup>1</sup>, Singgih Irianto Trisilo Hadi<sup>2</sup>, Fikri Adzikri<sup>\*3</sup>, Evyta Wismiana<sup>4</sup>, Waryani<sup>5</sup>, Lisa Purwani Radja<sup>6</sup>

<sup>1,2,6</sup>Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Pakuan, Indonesia

<sup>3,4,5</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pakuan, Indonesia

Email: <sup>1</sup>iitadhitia@unpak.ac.id, <sup>2</sup>singgihirianto@unpak.ac.id, <sup>3</sup>fadzikri@staff.unpak.ac.id,

<sup>4</sup>evytawismiana@unpak.ac.id, <sup>5</sup>waryani@unpak.ac.id, <sup>6</sup>lisaradja879@gmail.com

### Abstrak

Keberadaan Situ Rawa Gede memberikan peluang untuk mengembangkan potensi agrowisata. Pengembangan agrowisata akan berefek bagi pertumbuhan berbagai aktivitas pendukung pariwisata seperti usaha komersial dan layanan jasa. Disisi lain dari perspektif geologi, pengembangan kawasan wisata Situ Rawa Gede perlu mempertimbangkan kondisi geologi dan geoteknik setempat. Wilayah ini berada pada zona perbukitan dengan kemiringan lereng yang relatif curam. Ditambah lagi wilayah ini didominasi oleh jenis batuan berupa andesit, breksi, dan tufa serta intensitas hujan yang cukup tinggi di kawasan tersebut. Hal ini mendatangkan risiko serius terhadap kestabilan lereng. Faktor tersebut menjadikan kawasan ini tergolong memiliki tingkat kerawanan longsor. Permasalahan yang ada adalah belum tersedianya alat pendeteksi dini bencana longsor di kawasan tersebut. Selain itu efektifitas penggunaan alat ditentukan oleh pemosisian yang tepat agar dapat berfungsi optimal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang desain dan menentukan lokasi penempatan alat pendeteksi dini longsor di kawasan wisata Situ Rawa Gede. Metode penelitian menggunakan analisis deskriptif serta penentuan zona kerentanan menggunakan analisis sistem informasi geografis. Parameter yang dianalisis meliputi kemiringan lereng, jenis tanah, satuan batuan, dan penggunaan lahan. Hasil analisis menunjukkan bahwa daerah penelitian terbagi ke dalam zona kerentanan rendah, sedang, dan tinggi, dengan zona kerentanan sedang hingga tinggi mendominasi pada bagian lereng hulu kawasan Situ Rawa Gede. Zona tersebut direkomendasikan sebagai area prioritas penempatan alat pendeteksi dini. Desain sistem alat peringatan lokal untuk memantau potensi longsor bekerja dengan mendeteksi kandungan air tanah sebagai indikator awal terhadap adanya ketidakstabilan lereng. Alat berbasis sensor soil moisture dan programmable logic controller dengan alasan ketahanan sistem terhadap kondisi lapangan.

**Kata kunci:** Kelembaban Tanah, Longsor, Mitigasi, Peringatan Dini.

### *Landslide Disaster Detection Tool Design in Situ Rawa Gede Tourism Area Based on Descriptive Analysis and Geographic Information Systems*

#### *Abstract*

*The existence of Situ Rawa Gede provides an opportunity for agro-tourism development, which is expected to stimulate the growth of tourism-supporting activities such as commercial businesses and service providers. However, from a geological perspective, the development of this tourist area must consider local geological and geotechnical conditions. The area is located in a hilly zone with relatively steep slopes, dominated by rock types such as andesite, breccia, and tuff, and is characterized by high rainfall intensity. These conditions indicate a high level of landslide vulnerability. One of the main problems in this area is the absence of early landslide detection equipment, while the effectiveness of such equipment is strongly influenced by its proper placement. This study aims to design and determine the location of early landslide detection equipment in the Situ Rawa Gede tourist area. The research method employs descriptive analysis and the determination of vulnerability zones using geographic information systems analysis. The parameters analyzed include slope gradient, soil type, rock units, and land use. The results show that the study area is classified into low, medium, and high vulnerability zones, with medium to high vulnerability zones dominating the upstream slopes of the area. These zones are recommended as priority locations for the placement of early warning devices. The designed local warning system monitors potential landslides by detecting groundwater content as an early indicator of slope*

*instability, using a soil moisture sensor and a programmable logic controller to ensure reliable operation under field conditions.*

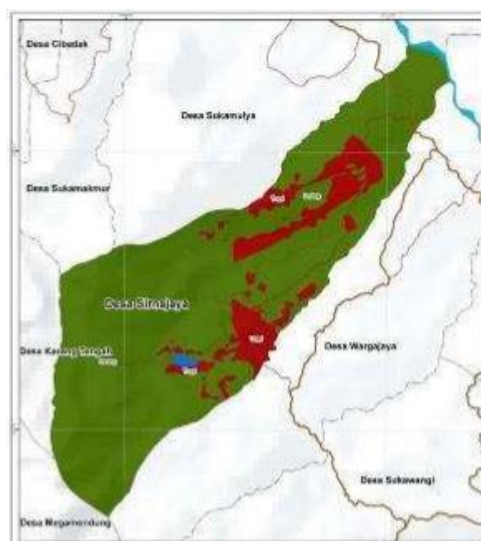
**Keywords:** *Early Warning, Landslides, Mitigation, Soil Moisture.*

## 1. PENDAHULUAN

Desa Sirnajaya terletak di Kecamatan Sukamakmur, Kabupaten Bogor dengan luas wilayah mencapai 1.567,5 hektare dan terbagi ke dalam tiga dusun [1]. Secara administratif, desa ini berbatasan dengan Desa Sukamulya dan Sukamakmur di bagian utara, Desa Wargajaya di timur, Desa Megamendung di selatan, serta Desa Karantengah di sebelah barat [2]. Desa Sirnajaya berada di kaki Gunung Pasarean pada ketinggian 500–800 mdpl dengan kemiringan lereng 20–40%. Letaknya di dataran tinggi menjadikan desa ini memiliki panorama alam yang menarik. Lanskap tersebut diperindah oleh keberadaan ruang terbuka hijau serta objek wisata alam, salah satunya Situ Rawa Gede. Dari sisi penggunaan lahan, wilayah ini didominasi oleh hutan, sawah, dan perkebunan kopi. Situ Rawa Gede sendiri menjadi daya tarik utama karena dikenal luas sebagai destinasi wisata yang ramai dikunjungi wisatawan domestik [3].

Situ Rawa Gede mulai dikembangkan sebagai destinasi wisata komersial sejak tahun 2015. Pada tahap awal, pengelolaan dilakukan secara swadaya oleh masyarakat sekitar, namun kini telah beralih dikelola oleh Badan Usaha Milik Desa (BUMDes). Keberadaan Situ Rawa Gede memberikan peluang besar bagi Desa Sirnajaya untuk mengembangkan potensi agrowisata, meskipun hal ini juga berdampak pada perubahan pola pemanfaatan lahan. Pengembangan agrowisata diperkirakan menimbulkan efek berganda (*multiplier effect*) bagi wilayah sekitarnya, terutama melalui pertumbuhan berbagai aktivitas pendukung pariwisata seperti usaha komersial dan layanan jasa [4]. Kondisi ini berpotensi menciptakan lapangan kerja baru bagi masyarakat setempat sehingga mendorong peningkatan perekonomian lokal dan kesejahteraan warga. Selain itu, perkembangan kawasan wisata juga berpotensi memicu munculnya permukiman baru di sekitar lokasi agrowisata Situ Rawa Gede.

Dari perspektif geologi, pengembangan Desa Sirnajaya, khususnya kawasan Situ Rawa Gede sebagai destinasi wisata, perlu juga mempertimbangkan kondisi geologi dan geoteknik setempat. Wilayah ini berada pada zona perbukitan dengan kemiringan lereng yang relatif curam yang memiliki kemiringan sekitar ( $15^{\circ}$  -  $>45^{\circ}$ ) [5] dan tergolong curam menurut Permen PU Nomor 20 Tahun 2007 [6]. Ditambah lagi wilayah ini didominasi oleh endapan dari Gunung Kencana dan Gunung Limo berupa andesit, breksi, dan tufa. Wilayah Situ Rawa Gede khususnya jalur trek Agrowisata Kopi terdiri dari 3 jenis tutupan lahan, yaitu kebun, semak, dan pemukiman yang turut berkontribusi dalam terjadinya gerakan tanah [5]. Faktor tersebut menjadikan desa ini tergolong memiliki tingkat kerawanan longsor sedang hingga tinggi [3], seperti ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Zona Rawan Longsor Kawasan Wisata Situ Rawa Gede Desa Sirnajaya

Perubahan kadar air tanah, yang dapat terjadi akibat hujan langsung, infiltrasi, serta variasi muka air tanah, mendatangkan risiko serius terhadap kestabilan lereng. Lonjakan kadar air tanah meningkatkan tekanan pori,

mengurangi kekuatan geser tanah, dan pada gilirannya memicu potensi kelongsoran [7,8]. Berbagai studi menunjukkan bahwa infiltrasi hujan merupakan salah satu pemicu utama kegagalan lereng, melalui peningkatan pore-water pressure (tekanan air pori) serta penurunan suction pada tanah tidak jenuh [9].

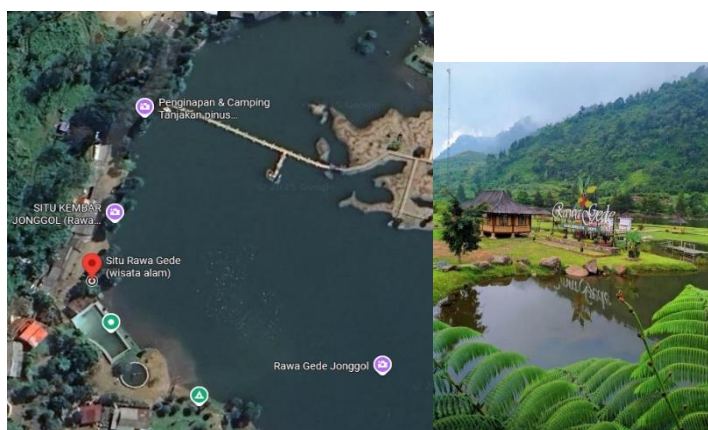
Pendekatan konvensional dalam mitigasi longsor umumnya masih bersifat reaktif, yaitu penanganan dilakukan setelah bencana terjadi. Untuk mengurangi risiko secara signifikan, diperlukan pendekatan preventif dan prediktif, salah satunya melalui analisis deskriptif dan sistem informasi geografis (SIG) [10-12]. Analisis deskriptif dan sistem informasi geografis (SIG) memungkinkan analisis kondisi lereng secara kuantitatif mampu menggambarkan kondisi gerakan tanah melalui foto – foto dari titik lokasi dan memberikan gambaran tentang proses pertampalan (tumpang-tindih) antara data spasial (diantara dua peta atau lebih), untuk memudahkan proses analisis kerawanan gerakan tanah dalam bentuk peta dan analisis ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona kritis yang memiliki faktor keamanan rendah dan berpotensi mengalami longsor.

Di sisi lain, perkembangan teknologi sensor dan perangkat controller memungkinkan dirancangnya alat pendeteksi dini bencana longsor yang relatif terjangkau, portabel, dan mudah diimplementasikan di lapangan [13]. Namun, tantangan utama dalam penerapan alat tersebut adalah penentuan desain dan lokasi penempatan sensor yang tepat. Penempatan alat tanpa dasar analisis teknis yang kuat berpotensi menghasilkan sistem peringatan dini yang tidak optimal atau bahkan gagal mendeteksi kondisi kritis.

Masyarakat harus memiliki pemahaman yang kuat tentang kebencanaan dan didukung dengan sistem atau perangkat yang diandalkan untuk menjaga keselamatan atau meminimalisir dampak potensi bencana longsor yang ada [4]. Sangat disayangkan apabila potensi wisata yang ada di Situ Rawa Gede tidak dilengkapi dengan pengamanan yang baik terutama untuk mencegah kerugian yang lebih besar. Menjaga kawasan wisata dari bencana tidak hanya sekedar menjaga keselamatan pengunjung tapi berimplikasi pada hal lain utamanya bisnis yang terkandung pada kawasan wisata itu sendiri. Apabila kawasan wisata tersebut dapat menjamin keamanan pada pengunjung maka hal ini tentu akan mengundang hal positif lainnya seperti bertambahnya pengunjung karena disuguhkan dengan objek wisata didalamnya dan juga keamanan yang menjamin keselamatan pengunjung.

Penelitian terkait sistem peringatan dini longsor mengalami perkembangan signifikan melalui integrasi antara teknologi sensor, analisis geospasial (SIG), dan sistem monitoring *real-time*. Pendekatan modern tidak lagi hanya bergantung pada observasi lapangan konvensional, tetapi telah berkembang menjadi sistem terintegrasi berbasis data spasial dan temporal [14, 15]. Begitupun penelitian dalam jurnal *Materials Today: Proceedings* menunjukkan bahwa desain sistem peringatan dini longsor saat ini umumnya menggunakan multi-parameter sensor seperti *soil moisture*, curah hujan, suhu, dan kemiringan lereng untuk mendeteksi kondisi awal ketidakstabilan lereng secara *real-time* [16]. Sistem tersebut juga mengimplementasikan konsep *threshold level* (Level I–III) untuk mengklasifikasikan kondisi aman hingga bahaya, yang menjadi dasar pengambilan keputusan mitigasi [16, 17]

Gambaran Situ Rawa Gede Kecamatan Sukamakmur seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Situ Rawa Gede Kecamatan Sukamakmur

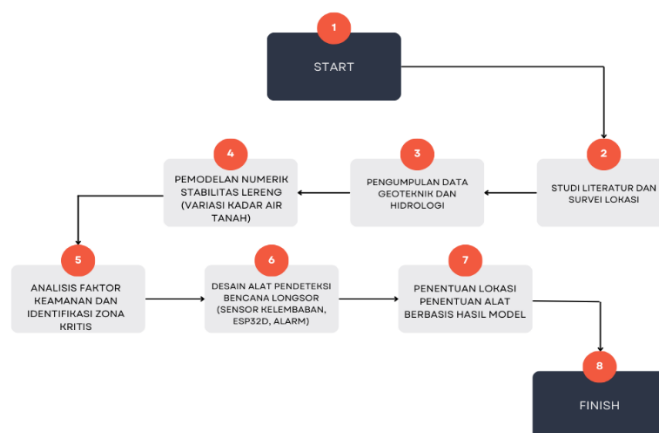
Perkembangan terbaru juga mengarah pada integrasi antara SIG dan sistem monitoring berbasis sensor. Studi dalam *Journal of South American Earth Sciences* menunjukkan bahwa penggunaan GIS dengan *multi-layer* parameter (kemiringan, litologi, penggunaan lahan, curah hujan, dll.) mampu menghasilkan peta kerentanan longsor yang akurat, yang kemudian digunakan sebagai dasar penentuan lokasi pemasangan sensor di lapangan [14]. Pendekatan ini menekankan pentingnya penempatan alat berbasis analisis spasial, bukan sekadar pemasangan acak. Selain itu, inovasi terbaru juga menunjukkan penggunaan sensor berbasis *MEMS* (*Micro-*

*Electro-Mechanical Systems*) dan *edge computing* untuk meningkatkan sensitivitas dan kecepatan deteksi longsor. Penelitian dalam jurnal *Applied Sciences* mengembangkan perangkat monitoring yang mampu memberikan peringatan beberapa detik sebelum kegagalan lereng terjadi melalui analisis anomali data sensor secara *real-time* [15]. Hal ini menunjukkan bahwa arah penelitian saat ini tidak hanya pada deteksi, tetapi juga prediksi dini berbasis data kontinu.

Penerapan alat menggunakan mikrokontroler (Arduino/ESP32), penggunaan sistem kontrol industri seperti *Programmable Logic Controller* (PLC) masih relatif terbatas dalam penelitian longsor. PLC memiliki keunggulan dalam hal *robustness*, keandalan operasi, dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan ekstrem, sehingga berpotensi meningkatkan kualitas sistem peringatan dini di lapangan [17]. Oleh karena itu, penelitian ini memfokuskan pada desain alat pendeteksi bencana longsor yang didasarkan pada hasil pemetaan stabilitas lereng akibat kemiringan dan struktur batuan penyusunnya. Dengan mengintegrasikan analisis geoteknik dan teknologi sistem pendeteksi dini berbasis PLC, diharapkan perencanaan ini dapat dirancang dengan tepat sasaran, efektif, dan sesuai dengan kondisi nyata di kawasan wisata Situ Rawa Gede. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam upaya mitigasi bencana longsor berbasis sains dan teknologi, sekaligus mendukung terciptanya kawasan wisata yang aman dan berkelanjutan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif dengan metode analisis deskriptif dan analisis SIG (*Sistem Informasi Geografis*), sebagaimana pada Gambar 3. Pendekatan ini bertujuan untuk memetakan zona kerentanan gerakan tanah, mengelompokkan jenis gerakan tanah pada daerah penelitian serta merancang dan menentukan lokasi penempatan alat pendeteksi dini longsor yang optimal berdasarkan hasil analisis tersebut. Adapun kriteria parameter rawan longsor berdasarkan PERMEN PU No. 22 Tahun 2007 [18], dengan menggunakan bantuan perangkat lunak (software) ArcMap 10.5.



Gambar 3. Prosedur Penelitian dalam Bentuk Diagram Alir

### 2.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data primer dilakukan dengan survei dan pengamatan langsung di lokasi penelitian, untuk mengetahui kondisi dan karakteristik di wilayah penelitian. Hal-hal yang dilakukan diantaranya seperti wawancara dengan masyarakat setempat terkait gerakan tanah yang pernah terjadi. Hal ini bertujuan untuk lebih mengetahui karakteristik wilayah penelitian dan tindakan perangkat desa dan masyarakat dalam merespon kejadian gerakan tanah. Selain itu dilakukan observasi dengan melakukan pengamatan lapangan terkait bentuk – bentuk topografi, pengamatan gerakan tanah dan menampilkan informasi dalam bentuk gambar/foto.

### 2.2. Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan meliputi instrumen pengumpulan data lapangan, instrumen pengolahan data spasial, dan instrumen sistem pendeteksi dini longsor. Instrumen pengumpulan data lapangan terdiri atas lembar observasi, kamera dokumentasi, alat ukur kemiringan lereng, dan perangkat GPS yang digunakan untuk mendukung analisis deskriptif kondisi fisik lereng. Instrumen pengolahan data spasial menggunakan perangkat lunak Arcmap yang dimanfaatkan untuk pengolahan dan analisis data *Sistem Informasi Geografis* (SIG), seperti pembuatan peta kemiringan lereng, pemetaan zona rawan longsor, serta penentuan lokasi penempatan alat pendeteksi dini. Selain itu, *Google Earth* digunakan sebagai instrumen pendukung untuk

visualisasi citra satelit dan verifikasi kondisi lapangan guna mendukung analisis deskriptif kawasan wisata Situ Rawa Gede. Selanjutnya, instrumen sistem pendeteksi dini longsor meliputi sensor kelembaban tanah, *Programmable Logic Controller (PLC)*, sistem alarm sirine, dan catu daya yang dirancang untuk memberikan peringatan dini berdasarkan kondisi lingkungan di kawasan wisata Situ Rawa Gede.

### 2.3. Analisis Sistem Informasi Geografis (SIG)

Analisis *Sistem Informasi Geografis (SIG)* adalah proses pengolahan dan analisis data spasial (berbasis lokasi/koordinat) untuk memperoleh informasi geografis yang mendukung pengambilan keputusan. Dalam penelitian longsor, analisis SIG digunakan untuk mengidentifikasi dan memetakan zona rawan longsor berdasarkan parameter fisik wilayah, seperti kemiringan lereng, topografi, penggunaan lahan, dan kondisi lingkungan. Analisis SIG memungkinkan integrasi berbagai data spasial dalam satu sistem sehingga hasil analisis bersifat visual, kuantitatif, dan spasial, yang sangat penting dalam penentuan lokasi penempatan alat pendeteksi dini longsor [19]. Langkah – langkah dalam melakukan analisis SIG setelah data – data seperti *Digital Elevation Model (DEM)*, peta topografi, citra satelit (*Google Earth*), peta penggunaan lahan dan batas administrasi wilayah penelitian adalah sebagai berikut :

1. Pra pengolahan data untuk memastikan seluruh data dapat dianalisis secara konsisten dalam satu sistem koordinat.
2. Pembuatan peta kemiringan lereng
3. Analisis penggunaan lahan
4. Overlay data spasial.
5. Klasifikasi area zona longsor.

Berdasarkan peta zona rawan longsor, ditentukan lokasi prioritas pemasangan alat pendeteksi dini longsor. Penentuan lokasi mempertimbangkan tingkat kerawanan, aksesibilitas lokasi, keamanan alat, kedekatan dengan area wisata dan aktivitas manusia.

### 2.4. Desain Alat Pendeteksi Tanah Longsor

Dalam lima tahun terakhir, penelitian sistem pendeteksi dini longsor menunjukkan adanya banyak pemanfaatan sensor kelembaban tanah (*soil moisture*), sensor kemiringan, dan accelerometer yang diintegrasikan dengan sistem kontrol berbasis mikrokontroler dan *Internet of Things* untuk pemantauan *real-time* dan pemberian peringatan dini. Studi menunjukkan bahwa sensor kelembaban tanah merupakan indikator utama ketidakstabilan lereng karena berkorelasi langsung dengan peningkatan tekanan air pori dan penurunan kekuatan geser tanah [13].

Sejumlah penelitian mengembangkan arsitektur *early warning system* berbasis jaringan sensor nirkabel dan komunikasi *LoRa* untuk mendukung pemantauan multi-node pada wilayah rawan longsor [20, 21]. Integrasi sensor dengan platform IoT juga menjadi tren untuk memungkinkan pengiriman data jarak jauh dan visualisasi kondisi lereng secara daring [22].

Meskipun sebagian besar penelitian menggunakan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32, pendekatan kontrol industri seperti *programmable logic controller (PLC)* relatif jarang diterapkan dalam sistem peringatan dini longsor. Padahal, *PLC* memiliki keunggulan dalam hal keandalan, kestabilan operasi, dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan lapangan dibandingkan mikrokontroler komersial. Oleh karena itu, rencana penggunaan *PLC* dalam penelitian ini merupakan pengembangan dari *state of the art* yang ada, dengan tujuan meningkatkan stabilitas sistem peringatan dini longsor berbasis sensor.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Kondisi Umum Lokasi Penelitian Berdasarkan Analisis Deskriptif dan Observasi

Hasil analisis deskriptif menunjukkan bahwa kawasan wisata Situ Rawa Gede memiliki karakteristik topografi yang bervariasi, dengan keberadaan lereng di sekitar area danau yang berpotensi mengalami ketidakstabilan. Beberapa bagian lereng memiliki kemiringan yang relatif curam dan menunjukkan kondisi drainase permukaan yang kurang optimal, terutama pada area dengan tutupan vegetasi yang terbatas dan aktivitas manusia yang cukup intens. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya potensi peningkatan risiko longsor, khususnya pada saat curah hujan tinggi.

Observasi lapangan dan dokumentasi visual memperlihatkan adanya alur-alur aliran air permukaan serta tanah yang mudah mengalami kejenuhan air, sebagaimana pada Gambar 4. Temuan ini memperkuat pentingnya upaya mitigasi bencana longsor berbasis analisis kondisi fisik lapangan dan pendekatan spasial.



Gambar 4. Beberapa Titik Rawan Longsor di Kawasan Situ Rawa Gede

Berdasarkan hasil pengamatan yang ada, teridentifikasi adanya gerakan tanah di daerah Kawasan Wisata Situ Rawa Gede Desa Sirnajaya, Kecamatan Sukamakmur, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat. Mengidentifikasi gerakan tanah menjadi 5 (lima) jenis gerakan tanah yang teramati pada daerah penelitian yaitu *Debris Creep* (a), *Debris Flow* (b), *Debris Slide* (c), *Rock Falls* (d), dan *Soil Flow* (e). *Debris Creep* Adalah rayapan dari material berukuran kasar (>2mm) akibat kemiringan lereng, tingkat kandungan air dan tata guna lahan. *Debris flow* adalah jenis gerakan tanah aliran disebabkan oleh air, dengan kecepatan air tergantung pada kemiringan lereng, volume air, tekanan air dan jenis material yang dibawanya. *Debris Slide* adalah gerakan tanah yang bergerak planar berupa longsor yang membawa material rombakan disebabkan kandungan air, pelapukan, sudut lereng, tutupan lahan, jenis batuan dan sudut lereng. *Rock Falls* adalah luncuran jatuh bebas dari blok batuan pada lereng – lereng yang sangat terjal disebabkan kemiringan yang terjal dan jenis batuan. *Soil Flow* adalah aliran yang terjadi pada tanah lempung atau lanau sehabis hujan lebat [23, 24].

Dalam mengetahui dan menentukan zona kerentanan geakan tanah, dilakukan dengan metode analisis stasistic yaitu dengan prosedur tumpang tindih (*overlay*). Sekaligus dengan analisis *Sistem Informasi Geografis* (*SIG*) dapat ditentukan zona kerentanan gerakan tanah berdasarkan Peraturan Menteti Pekerjaan Umum No. 22 Tahun 2007. Untuk menentukan skor dan bobot untuk setiap parameter dimana hal ini mengacu kepada Permen PU (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum) No 22 Tahun 2007, sebagaimana pada Tabel 1.

Tabel 1. Skor dan Bobot (Permen PU No 22 Tahun 2007).

No	Skor	Bobot
1	Potensi Kecil = 1	10% Kecil
2	Potensi Sedang = 2	20% Sedang
3	Potensi Tinggi = 3	30% Tinggi

### 3.2. Kemiringan Lereng

Berdasarkan pembagian kelas lereng menurut Pedoman Penyusunan Pola Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah (1986) [25], kemiringan lereng pada daerah penelitian dibagi 5 (lima) kelas dimana tiap kelas memiliki skor yang berbeda, sebagaimana Tabel 2. Kemiringan lereng tersebut diperoleh dari hasil analisis melalui data *Digital Elevation Model* (*DEM*) yang akan di ekspor menjadi slope kemudian dibagi menjadi beberapa kelas sesuai dengan klasifikasi yang digunakan, *DEM* sendiri merupakan model digital yang mempresentasikan tiga dimensi dari permukaan bumi yang sangat berguna dalam memberikan gambaran topografi yang lebih baik dan data spasial yang lebih akurat. Semakin tinggi tingkat kemiringan lereng maka nilai potensi juga akan semakin besar. Pemberian bobot 30% untuk parameter kemiringan lereng berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No 22 Tahun 2007.

Tabel 2. Nilai Pembobotan Parameter Kemiringan Lereng

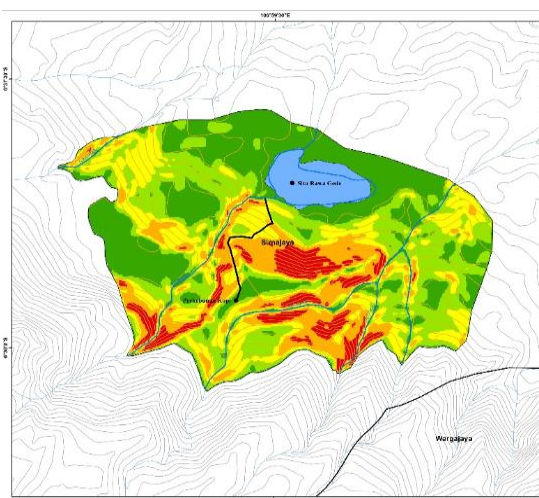
Simbol	Keterangan	Skor	Bobot	Skor x Bobot
	Datar (0 – 8%)	1	30%	0,3
	Landai (8 – 15%)	1		0,3
	Agak Curam (15 – 25%)	2		0,6
	Curam (25 – 45%)	3		0,9
	Sangat Curam (>45%)	3		0,9

Berdasarkan pengolahan data *Digital Elevation Model* (*DEM*) menggunakan perangkat lunak *SIG*, diperoleh peta kemiringan lereng. Hasil analisis menunjukkan bahwa wilayah penelitian memiliki variasi

kemiringan yang cukup signifikan, mulai dari lereng landai hingga sangat curam. Secara umum, area dengan warna hijau tua dan hijau muda mendominasi bagian tengah wilayah, khususnya di sekitar badan air Situ Rawa Gede, yang menunjukkan kemiringan lereng relatif landai. Kondisi ini mengindikasikan bahwa area tersebut secara topografis lebih stabil dan relatif aman dari potensi longsor.

Sebaliknya, zona dengan warna kuning hingga merah tersebar cukup luas pada bagian selatan, barat daya, dan sebagian tenggara kawasan penelitian. Warna kuning menunjukkan lereng dengan kemiringan sedang, sedangkan warna merah merepresentasikan lereng dengan kemiringan curam hingga sangat curam. Area-area ini umumnya berada pada bagian lereng perbukitan yang mengelilingi kawasan situ dan menunjukkan kontur yang rapat, yang mengindikasikan perubahan elevasi yang tajam dalam jarak horizontal yang relatif pendek.

Keberadaan lereng curam hingga sangat curam tersebut berpotensi meningkatkan risiko terjadinya longsor, terutama ketika dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti curah hujan tinggi, peningkatan kadar air tanah, dan aktivitas manusia. Lereng-lereng dengan kemiringan tinggi memiliki gaya penggerak yang lebih besar dibandingkan gaya penahannya, sehingga lebih rentan mengalami ketidakstabilan, seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Peta Kemiringan Lereng Di Kawasan Wisata Situ Rawa Gede

Selain itu, pola sebaran lereng curam yang memanjang mengikuti kontur perbukitan menunjukkan adanya jalur alami pergerakan tanah apabila terjadi kegagalan lereng. Hal ini menjadi perhatian penting mengingat beberapa zona lereng curam berada relatif dekat dengan area aktivitas manusia dan jalur akses menuju kawasan wisata.

Analisis kemiringan lereng ini menegaskan bahwa kemiringan lereng merupakan parameter dominan dalam penentuan zona rawan longsor di kawasan Situ Rawa Gede. Oleh karena itu, area dengan kemiringan sedang hingga sangat curam perlu diprioritaskan dalam analisis lanjutan serta dijadikan dasar utama dalam penentuan lokasi penempatan alat pendeteksi dini longsor.

### 3.3. Satuan Batuan

Satuan batuan yang terdapat di daerah penelitian adalah satuan batuan batupasir dan satuan batuan breksi. Batuan yang terdapat di daerah penelitian berupa batuan dengan jenis sedimen dengan kekompakan rendah, banyak singkapan dengan kondisi sangat lapuk [26]. Kondisi singkapan dan jenis batuan tersebut menunjukkan bahwa gerakan tanah dapat terjadi di daerah penelitian. Faktor tingkat pelapukan batuan menyebabkan berkurangnya kekuatan mekanik material penyusun lereng, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap longsor, terutama ketika dipengaruhi oleh curah hujan tinggi dan peningkatan kadar air tanah.

### 3.4. Jenis Tanah

Jenis tanah pada daerah ini terbagi menjadi 3 berdasarkan *DSMW (Digital Soil Map of the World)* yaitu : *orthic acrisols*, *humic andosols*, dan *ochric andosols*. Dari ketiga kelas tersebut yang paling mendominasi adalah jenis tanah *humic andosols* yang berada di selatan pada daerah penelitian ini, kemudian *ochric andosols* pada bagian barat laut pada daerah penelitian ini dan *orthic acrisols* pada bagian timur laut pada daerah penelitian. Dominasi tanah *humic andosols* menunjukkan karakteristik tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi dan porositas besar, sehingga memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi namun cenderung mengalami

penurunan kekuatan geser ketika berada pada kondisi jenuh. Sementara itu, tanah *ochric andosols* dan *orthic acrisols* memiliki sifat fisik yang relatif berbeda, namun tetap berpotensi mengalami ketidakstabilan lereng apabila dipengaruhi oleh kemiringan lereng yang curam dan intensitas hujan yang tinggi. Variasi jenis tanah tersebut berpengaruh terhadap tingkat kerawanan longsor dan perlu dipertimbangkan dalam analisis spasial, khususnya dalam penentuan zona rawan longsor dan penempatan alat pendeteksi dini di kawasan penelitian.

### 3.5. Tutupan Lahan

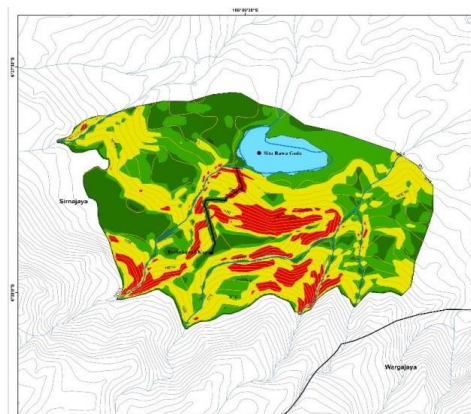
Aktivitas manusia memiliki kontribusi dalam pergerakan tanah seperti ekstraksi air tanah berlebih, pembangunan pada daerah tanah yang tidak mendukung terhadap pembangunan, dan pertambangan bawah tanah sehingga menimbulkan dampak pada daerah di sekitarnya. Tutupan Lahan yang terdapat di daerah penelitian berupa Danau, Semak Belukar, Kebun, Ladang, Sawah, Hutan Kering, Pemukiman. Tutupan lahan cukup berpengaruh terhadap pergerakan tanah karena vegetasi memiliki peran dalam kestabilan lereng. Peta tutupan lahan sendiri berdasarkan Indonesia Geospatial Portal. Pengaruh pada parameter ini didasarkan atas karakteristiknya seperti danau yang memiliki nilai sedang karena danau dapat mengakibatkan merembesnya air ke dalam lereng dan menambah beban pada permukaan lereng, demikian juga dengan semak belukar yang memiliki nilai sedang karena mempunyai pepohonan yang relative besar dan akar yang masuk kedalam tanah, sedangkan kebun memiliki nilai yang rendah karena area ini di tumbuh pepohonan yang relative besar dan memiliki akar yang masuk jauh kedalam tanah yang menjaga kestabilan wilayah agar tetap baik, beda dengan ladang yang memiliki nilai besar karena memiliki pepohonan dengan akar di bagian permukaan saja, sama halnya dengan sawah yang memiliki nilai besar dikarenakan memiliki tingkat kejenuhan air yang tinggi, sedangkan hutan memiliki nilai yang rendah karena banyak ditumbuhi oleh pepohonan yang besar yang memiliki akar masuk jauh kedalam tanah sehingga dapat menjaga kestabilan pada lereng, kemudian pemukiman dengan sekor sedang karena manusia mendirikan bangunan dengan pondasi ke dalam tanah guna menjaga keseimbangan bangunan tersebut.

### 3.6. Penentuan Zona Kerentanan Gerakan Tanah Daerah Penelitian

Peta zonasi kerentanan gerakan tanah merupakan hasil akhir dari overlay peta – peta sebelumnya yang mencakup seluruh nilai yang ada pada peta – peta tersebut. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 22 Tahun 2007 total nilai berkisar antara 1,00 – 3,00. Sedangkan untuk menetapkan tingkat kerawanan zona tersebut, digunakan kriteria sebagai berikut :

- Tingkat Kerawanan Zona Berpotensi Longsor Tinggi apabila total nilai bobot tertimbang berada pada kisaran 2,40 – 3,00.
- Tingkat Kerawanan Zona Berpotensi Longsor sedang bila total nilai bobot tertimbang berada pada kisaran 1,70 – 2,39.
- Tingkat Kerawanan Zona Berpotensi Longsor rendah apabila total nilai bobot tertimbang berada pada kisaran 1,00 – 1,69.

Dari hasil klasifikasi gerakan tanah, overlay peta berdasarkan parameter yang digunakan pembobotan, maka daerah penelitian didominasi oleh zona dengan potensi kerentanan sedang, sebagaimana Gambar 6






Gambar 6. Peta Kerentanan Gerakan Tanah di Kawasan Wisata Situ Rawa Gede

Berdasarkan hasil analisis kerentanan gerakan tanah yang disajikan pada Gambar 6 maka pada Gambar 7, daerah penelitian diklasifikasikan ke dalam tiga tingkat kerentanan, yaitu kerentanan rendah, sedang, dan tinggi, dengan total 13 titik lokasi berpotensi terjadi gerakan tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa zona kerentanan sedang mendominasi wilayah penelitian, dengan jumlah 10 titik lokasi atau sekitar 77% dari total data. Dominasi zona kerentanan sedang ini mengindikasikan bahwa sebagian besar wilayah penelitian memiliki kondisi fisik yang cukup rentan terhadap gerakan tanah apabila dipicu oleh faktor eksternal, seperti curah hujan tinggi atau perubahan penggunaan lahan.

Pada zona kerentanan rendah, tercatat sebanyak 2 titik lokasi atau sekitar 15% dari total data. Zona ini umumnya berada pada area dengan kemiringan lereng yang relatif landai dan kondisi lingkungan yang lebih stabil. Jenis gerakan tanah yang teridentifikasi pada zona ini didominasi oleh *Debris Slide (DS)*, yang menunjukkan pergerakan material tanah dan batuan dalam skala terbatas dengan tingkat bahaya yang relatif rendah dibandingkan zona lainnya.

Sementara itu, zona kerentanan tinggi hanya mencakup 1 titik lokasi atau sekitar 8% dari total data, namun memiliki tingkat bahaya yang paling signifikan, sebagaimana pada Tabel 3. Pada zona ini teridentifikasi jenis gerakan tanah berupa *Soil Flow (SF)*, yang umumnya terjadi pada kondisi tanah yang sangat jenuh air dan memiliki potensi kerusakan yang lebih besar. Meskipun secara persentase jumlahnya kecil, keberadaan zona kerentanan tinggi tetap perlu mendapat perhatian khusus karena berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap keselamatan dan infrastruktur di sekitarnya.

Tabel 3. Nilai Total Kerentanan Gerakan Tanah Daerah Penelitian

Simbol	Keterangan	Jenis Gerakan Tanah					Jumlah	(%)
		Debris Creep	Debris Flow	Debris Slide	Rock Falls	Soil Flow		
	Kerentanan Rendah	-	-	2	-	-	2	15
	Kerentanan Sedang	1	2	6	1	-	10	77
	Kerentanan Tinggi	-	-	-	-	1	1	8
	<b>Total</b>						<b>13</b>	<b>100</b>

Ditinjau dari jenis gerakan tanah, *Debris Slide (DS)* merupakan tipe yang paling dominan dan terutama berkembang pada zona kerentanan sedang. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik litologi yang mudah lapuk, jenis tanah dengan daya serap air tinggi, serta kemiringan lereng sedang hingga curam menjadi faktor utama yang memicu gerakan tanah di daerah penelitian. Jenis gerakan tanah lain seperti *Debris Creep (DC)*, *Debris Flow (DF)*, dan *Rock Falls (RF)* juga ditemukan, namun dalam jumlah yang lebih terbatas.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa daerah penelitian berada pada kondisi kerentanan gerakan tanah yang cukup signifikan, dengan dominasi zona kerentanan sedang, seperti pada Gambar 7. Temuan ini memperkuat hasil analisis spasial sebelumnya dan menegaskan pentingnya penerapan upaya mitigasi, khususnya melalui pemantauan kondisi lereng dan penempatan alat pendeteksi dini pada zona kerentanan sedang hingga tinggi. Dengan demikian, Tabel 3 ini tidak hanya menggambarkan distribusi kerentanan gerakan tanah, tetapi juga menjadi dasar penting dalam perencanaan mitigasi bencana dan pengambilan keputusan di kawasan penelitian.



Gambar 7. Peta Titik Daerah Potensi Longsor di Kawasan Situ Rawa Gede

**3.7. Analisis Penentuan Lokasi Penempatan Alat Pendeteksi Dini Longsor**

Berdasarkan peta zona rawan longsor, dilakukan penentuan lokasi penempatan alat pendeteksi dini longsor pada area dengan tingkat kerawanan tinggi dan sedang yang berdekatan dengan aktivitas wisata dan jalur pengunjung. Lokasi penempatan alat dipilih dengan mempertimbangkan tingkat risiko, aksesibilitas, serta keamanan alat di lapangan.

Pendekatan ini memastikan bahwa penempatan alat pendeteksi dini tidak bersifat acak, melainkan berbasis analisis spasial yang terintegrasi dengan kondisi lapangan. Dengan demikian, sistem peringatan dini yang dirancang diharapkan mampu memberikan informasi awal yang efektif untuk mendukung keselamatan pengunjung dan pengelola kawasan wisata Situ Rawa Gede.

Berdasarkan gambar 6 diatas terlihat bahwa daerah penelitian memiliki morfologi perbukitan dengan lereng curam yang dominan berada di bagian utara hingga timur laut Situ Rawa Gede. Lereng-lereng tersebut secara topografis mengarah ke bagian selatan, yaitu menuju kawasan danau Situ Rawa Gede serta area permukiman dan jalur akses wisata di sekitarnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa potensi pergerakan tanah pada lereng hulu berisiko langsung berdampak pada kawasan wisata dan infrastruktur di bagian bawah lereng.

Sebaran titik potensi gerakan tanah menunjukkan pola yang mengelompok (clustering) pada lereng bagian utara dan timur laut, khususnya pada titik-titik seperti *DC1*, *SF1*, *DS5*, *DS8*, *DF1*, *DS4*, dan *RF1*. Titik-titik tersebut berada pada lereng dengan kemiringan relatif curam dan dekat dengan jalur jalan, yang meningkatkan tingkat kerentanan akibat kombinasi faktor alami dan aktivitas manusia. Oleh karena itu, area ini ditetapkan sebagai zona prioritas utama untuk penempatan alat pendeteksi dini longsor.

Penempatan alat pendeteksi dini direkomendasikan pada posisi lereng hulu (*upslope*) dari titik-titik potensi longsor, dengan orientasi sensor menghadap arah aliran massa tanah, yaitu dari utara–timur laut ke selatan–barat daya. Penempatan pada posisi hulu bertujuan untuk mendeteksi perubahan kondisi tanah, khususnya peningkatan kadar air tanah, sebelum terjadinya pergerakan massa tanah yang berpotensi mencapai kawasan wisata Situ Rawa Gede.

Pada bagian tengah lereng yang menghadap langsung ke Situ Rawa Gede, terutama di sekitar titik *DF2* dan *DS3*, penempatan alat pendeteksi dini juga diperlukan sebagai sistem peringatan tambahan. Area ini berfungsi sebagai zona transisi antara lereng curam dan area dataran rendah, sehingga berpotensi menerima dampak langsung dari material longsor yang berasal dari bagian hulu.

Sementara itu, titik *DS1* yang berada di bagian barat daya daerah penelitian menunjukkan potensi gerakan tanah yang relatif terpisah dari klaster utama. Penempatan alat pada area ini bersifat selektif dan dipertimbangkan terutama untuk kepentingan perlindungan permukiman dan lahan pertanian, meskipun tingkat ancamannya terhadap kawasan wisata relatif lebih rendah dibandingkan area lereng utara.

Alat pendeteksi dini bencana longsor ditempatkan pada 7 titik lokasi sebagaimana pada Tabel 4 :

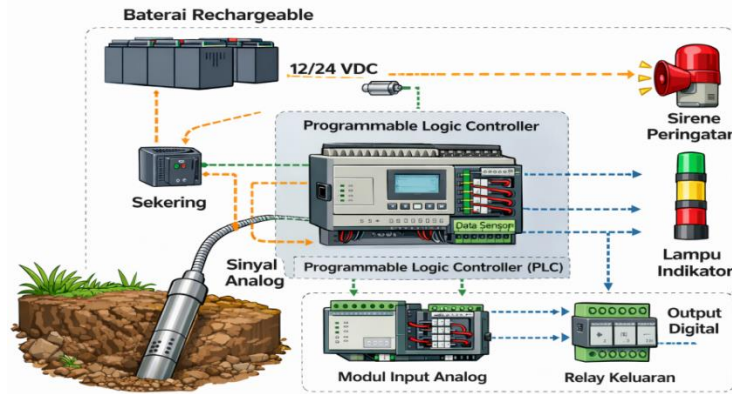
Tabel 4. Perlindungan permukiman dan Lahan Pertanian

No	Lokasi Umum	Zona Kerentanan	Jenis Gerakan Tanah	Penempatan
1	Lereng Utara Situ Rawa Gede (sekitar <i>DC1</i> )	Tinggi	<i>Debris Creep</i>	Lereng curam, dekat jalur aliran longsor menuju kawasan wisata
2	Lereng Timur Laut (sekitar <i>SF1-DS5</i> )	Tinggi	<i>Debris Slide</i>	Klaster potensi longsor, dekat akses jalan wisata
3	Lereng Timur (sekitar <i>DS8-RF1</i> )	Sedang–Tinggi	<i>Rock Falls</i>	Lereng terjal, risiko terhadap jalur transportasi
4	Lereng Tenggara (sekitar <i>DF1-DS4</i> )	Sedang	<i>Soil Flow</i>	Tanah mudah jenuh air, berada di hulu permukiman
5	Lereng Tengah Menghadap Situ (sekitar <i>DF2</i> )	Sedang	<i>Debris Slide</i>	Zona transisi, potensi dampak langsung ke danau
6	Lereng Selatan Situ Rawa Gede (sekitar <i>DS2-DS3</i> )	Sedang	<i>Debris Slide</i>	Area wisata dan fasilitas public
7	Lereng Barat Daya (sekitar <i>DS1</i> )	Rendah - Sedang	<i>Debris Slide</i>	Perlindungan permukiman dan lahan pertanian

**3.8. Desain Alat Pendeteksi Bencana Longsor**

Desain alat pendeteksi dini bencana longsor dikembangkan menggunakan *Programmable Logic Controller (PLC)* sebagai pusat pengendali utama. Pemilihan *PLC* didasarkan pada keunggulannya dalam hal keandalan, stabilitas operasi, serta kemudahan integrasi dengan berbagai jenis sensor dan aktuator di lingkungan lapangan.

Sistem dirancang untuk memantau perubahan kondisi tanah secara kontinu melalui sensor kelembaban tanah (*soil moisture sensor*) sebagai indikator utama peningkatan kadar air tanah yang berpotensi memicu ketidakstabilan lereng, sebagaimana pada Gambar 8.



Gambar 8. Desain Arsitektur Alat Deteksi Dini Bencana Longsor

Secara umum, sistem terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu sensor kelembaban tanah, PLC, modul input analog, catu daya, serta perangkat keluaran berupa sirine dan lampu peringatan. Sensor kelembaban tanah berfungsi mengubah kondisi kadar air tanah menjadi sinyal listrik analog yang kemudian diproses oleh modul input PLC. Nilai sinyal tersebut dikonversi menjadi data digital yang selanjutnya dibandingkan dengan nilai ambang batas (*threshold*) yang telah ditentukan berdasarkan hasil analisis kandungan air pada tanah berdasarkan data dari penelitian - penelitian sebelumnya dan karakteristik tanah setempat. Setelah itu perangkat output akan memberikan tanda peringatan berupa lampu atau sirine yang menyala.

**a. Logika Kerja Sistem**

Logika kerja sistem dirancang dalam bentuk program ladder diagram yang sederhana namun andal. Sistem bekerja dalam tiga kondisi utama, yaitu kondisi normal, kondisi waspada, dan kondisi bahaya. Pada kondisi normal, nilai kelembaban tanah berada di bawah ambang batas pertama sehingga sistem hanya melakukan pemantauan tanpa mengaktifkan alarm. Ketika nilai kelembaban tanah melewati ambang batas pertama, sistem masuk ke kondisi waspada dan mengaktifkan indikator visual berupa lampu peringatan. Ambang batas kandungan air tanah didasarkan pada kelembaban volumetrik tanah (*Volumetric Water Content, VWC*), yaitu persentase volume air terhadap volume total tanah dari hasil beberapa penelitian sebelumnya yakni sebagaimana tabel 5 berikut ini :

Tabel 5. Klasifikasi Ambang Batas Kandungan Air Tanah (*Soil Moisture*)[27, 28]

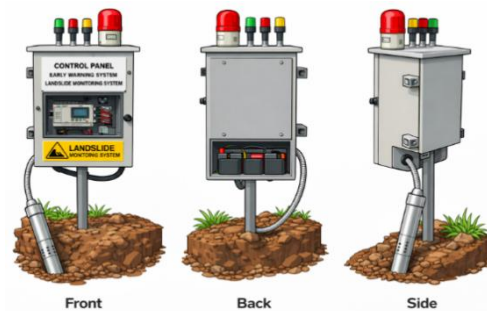
Kategori Kondisi	Rentang VWC (%)	Kondisi Fisik Tanah	Implikasi terhadap Lereng	Status Sistem
Aman	< 30–35 %	Tanah kering – lembab	Lereng relatif stabil	Normal
Normal	35 – 50 %	Lereng relatif stabil	Kestabilan mulai menurun	Siaga
Waspada	> 50 – 65 %	Tanah lembab tinggi	Kestabilan mulai menurun	Waspada
Bahaya	> 65 – 80 %	Tanah lembab tinggi	Potensi longsor meningkat	Bahaya

Apabila nilai kelembaban tanah terus meningkat dan melewati ambang batas kedua, sistem secara otomatis masuk ke kondisi bahaya. Pada kondisi ini, PLC mengaktifkan sirine peringatan sebagai sistem peringatan dini agar pengelola kawasan dan masyarakat sekitar dapat segera melakukan tindakan mitigasi. Mekanisme ini memungkinkan sistem memberikan peringatan secara bertahap sesuai dengan tingkat risiko yang terdeteksi.

**b. Desain dan Sistem Arsitektur Alat**

Sistem pendeteksi dini bencana longsor, sebagaimana Gambar 9, dirancang sebagai sistem pemantauan lapangan mandiri (*stand-alone field monitoring system*) yang berfungsi untuk memantau kondisi kelembaban tanah dan memberikan peringatan dini ketika nilai ambang batas terlampaui. Desain alat terdiri atas tiga

subsistem utama, yaitu subsistem sensor (input), subsistem pengolah data (*processing unit*) dan subsistem peringatan dan catu daya (*output dan power supply*).



Gambar 9. Sistem Pemantauan Longsor 3D

Seluruh subsistem ditempatkan di dalam panel kontrol tahan cuaca yang dipasang pada tiang di lokasi lereng, sedangkan sensor kelembaban tanah ditanam pada kedalaman tertentu sesuai zona gelincir potensial. Desain alat mempertimbangkan kondisi lapangan dengan karakteristik menggunakan panel yang tahan air dan debu, konstruksi kokoh terhadap getaran dan cuaca ekstrem, sensor terlindung dari gangguan mekanis dan sistem mudah dipelihara dan diganti komponennya. Berikut adalah gambar desain alat pendeteksi dini bencana longsor yang direncanakan.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis deskriptif dan pemetaan menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG), dapat disimpulkan bahwa kawasan wisata Situ Rawa Gede memiliki variasi tingkat kerentanan gerakan tanah yang dipengaruhi oleh kemiringan lereng, jenis tanah, satuan batuan, serta kondisi penggunaan lahan. Zona dengan kemiringan lereng curam, jenis tanah bertekstur lepas, dan litologi batuan sedimen lapuk menunjukkan tingkat kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan zona lainnya.

Integrasi analisis spasial SIG dengan data kondisi lapangan memungkinkan identifikasi zona rawan longsor secara lebih objektif dan terukur, sehingga penentuan lokasi penempatan alat pendeteksi dini tidak dilakukan secara acak, melainkan didasarkan pada hasil analisis ilmiah. Titik-titik penempatan alat yang direkomendasikan berada pada zona dengan kerentanan sedang hingga tinggi, khususnya pada lereng-lereng di bagian hulu dan sepanjang jalur aliran permukaan yang berpotensi mengalami peningkatan kadar air tanah.

Desain alat pendeteksi dini longsor berbasis sensor *soil moisture* dan *PLC* secara teoritis dapat digunakan sebagai parameter utama peringatan dini sebelum terjadinya pergerakan tanah serta memiliki keandalan dalam kondisi lapangan. Sistem yang dibangun direncanakan untuk mampu mengklasifikasikan kondisi tanah ke dalam kategori aman, siaga, waspada, dan bahaya berdasarkan nilai ambang batas kelembaban tanah yang ditetapkan. Dengan demikian, desain sistem ini memberikan dasar konseptual bagi pengembangan sistem peringatan dini yang bersifat preventif, meskipun efektivitasnya masih memerlukan pengujian dan validasi lapangan pada penelitian selanjutnya.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis analisis deskriptif dan Sistem Informasi Geografis (SIG) dapat digunakan sebagai dasar perancangan dan penempatan alat pendeteksi dini longsor. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan awal dalam pengembangan sistem peringatan dini di kawasan wisata rawan longsor lainnya serta mendukung upaya mitigasi bencana berbasis sains dan teknologi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Proposal Rencana Usaha Kemitraan (RUK) Pilot Inkubasi Inovasi Desa - Pengembangan Ekonomi Lokal (PIID-PEL) Agrowisata Kopi Situ Rawa Gede Desa Sirnajaya, Kecamatan Sukamakmur, Kabupaten Bogor," in *Pemerintah Desa Sirnajaya*, ed, 2019.
- [2] "Kecamatan Sukamakmur dalam Angka Tahun 2019," in *Pemerintah Kabupaten Bogor*, ed, 2019.
- [3] I. K. Dewi, N. Waskitaningsih, L. S. Mulyawati, and G. Afdurrafik, "Pemberdayaan Bumdes Sinar Makmur di Desa Sirnajaya melalui Perancangan Kawasan Situ Rawa Gede," *Rudence: Rural Development for Economic Resilience*, vol. 2, no. 1, pp. 1-14, 2022.
- [4] P. Faras Yuan, "Studi Kelayakan Situ Rawa Gede Agrowisata Kopi Sebagai Daerah Tujuan Wisata di Kecamatan Sukamakmu," ed. Jakarta.

- [5] A. Iit, "PEMETAAN ZONA KERENTANAN GERAKAN TANAH SERTA KAJIAN KESTABILAN LERENG UNTUK JALUR TREK AGROWISATA," Bogor.
- [6] "Pedoman Teknis Analisis Aspek Fisik Dan Lingkungan, Ekonomi, Serta Sosial Budaya Dalam Penyusunan Rencana Tata Ruang," in *Kementerian PUPR*, ed, 2007.
- [7] A. A. Riansyah, "ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA VILLA FUMIDA DESA KUTA KAMPUNG BABAKAN MEGAMENDUNG BOGOR," ed. Semarang.
- [8] J. Zhang, F. Hu, Q. Zhang, J. Wang, W. Deng, L. Zhang, and X. Shao, "Evaluation of the effects of rainfall infiltration boundaries on the stability of unsaturated soil slopes using the particle flow code," *Water*, vol. 16, no. 24, 2024.
- [9] I. R. Rabani, "Analisis Perbandingan Kestabilan Lereng Jenuh dan Lereng Tidak Jenuh yang Dipengaruhi Infiltrasi Hujan= Comparative Analysis of Saturated and Unsaturated Slopes Stabilities Affected by Rainfall Infiltration," ed, 2023.
- [10] Z. D. Putri, "Analisis Kerawanan Longsor Dengan Aplikasi Sistem Informasi Geografis (Sig) Di Kabupaten Padang Pariaman," 2023.
- [11] I. Madani *et al.*, "Analisis Spasial Tingkat Kerawanan Tanah Longsor di Kecamatan Wagir, Kabupaten Malang Melalui Sistem Informasi Geografis," *Jurnal Geosaintek*, vol. 9, no. 2, pp. 80-87, 2023.
- [12] R. J. Sianturi, M. Nabilla, T. A. Fadila, N. Haerudin, and R. Mulyasari, "Analisis Tingkat Kerawanan Tanah Longsor di Kabupaten Lampung Utara Dengan Memanfaatkan Informasi Spasial Berbasis SIG," *Indonesian Journal of Spatial Planning*, vol. 6, no. 1, pp. 10-16, 2025.
- [13] S. Fitri and A. Asrizal, "Using Sensors with Internet of Things for Landslide Detection System: A Systematic Literature Review," *Journal of Experimental and Applied Physics*, vol. 3, no. 2, 2025.
- [14] K. Ambika, N. Alzaben, A. G. Alghamdi, and S. Venkatraman, "Integrated geotechnical and remote sensing-based monitoring of unstable slopes for landslide early warning using IoT and sensor networks," *J South Am Earth Sci*, vol. 164, p. 105666, 2025.
- [15] K. Gupta and N. Satyam, "Integrating real-time sensor data for improved hydrogeotechnical modelling in landslide early warning in Western Himalaya," *Eng Geol*, vol. 338, p. 107630, 2024.
- [16] C. Prakasam, R. Aravinth, S. K. Varinder, and B. Nagarajan, "Design and Development of Real-time landslide early warning system through low cost soil and rainfall sensors," *Mater Today Proc*, vol. 45, pp. 5649–5654, 2021.
- [17] W. Jitsujaritwong, S. Chankhiao, H. Phumrint, and P. Rangsiwanichpong, *Landslide early warning system based on microcontroller with soil moisture sensors*. 2021.
- [18] (2007). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 22/PRT/M/2007 tentang Pedoman Penataan Ruang Kawasan Rawan Bencana Longsor*.
- [19] S. Aldiansyah, I. Madani, and D. S. W. Ningsih, "GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Shannon Entropy Models in Kulawi District, Indonesia," *European Journal of Forest Engineering*, no. Advanced Online Publication, pp. 115-128, 2025.
- [20] A. Haddad and S. A. Salim, "IMPLEMENTASI WIRELESS SENSOR NETWORK PADA PENDETEKSI TANAH LONGSOR BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) DAN LORA," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 8, no. 1, pp. 179-187, 2025.
- [21] M. F. Hasan, E. Sonalitha, and R. H. Romadhon, "Monitoring Early Warning System (EWS) pada bencana banjir dan tanah longsor berbasis LoRa (Long Range) RA-02," *JE-UNISLA*, vol. 9, no. 2, pp. 144-158, 2024.
- [22] M. Ulfah and A. S. Irtawaty, "Inovasi Peringatan Dini Tanah Longsor Dengan Pemanfaatan Sensor Hygrometer Berbasis Internet of Things Menggunakan Solar Energi Sebagai Upaya Mitigasi Bencana," *Jurnal Surya Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 27-33, 2024.
- [23] M. Donnini, F. Bucci, M. Santangelo, M. Cardinali, and P. Reichenbach, "The effect of different landslide mapping approaches on the geomorphological assessment of landslide hazard," *EGUsphere*, vol. 2025, pp. 1-38, 2025.
- [24] K. Bhuyan *et al.*, "Landslide topology uncovers failure movements," *Nature communications*, vol. 15, no. 1, p. 2633, 2024.
- [25] (1986). *Pedoman Penyusunan Pola Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah*.

- [26] H.-S. Yun, S.-W. Moon, and Y.-S. Seo, "Effects of Breccia and Water Contents on the Mechanical Properties of Fault-core-zone Materials: an Experimental Investigation Using Artificial Specimens," 2022.
- [27] S. Segoni, A. Rosi, D. Lagomarsino, R. Fanti, and N. Casagli, "Brief communication: Using averaged soil moisture estimates to improve the performances of a regional-scale landslide early warning system," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 3, pp. 807-812, 2018.
- [28] L. I. N. Khansa, D. A. Sabrina, B. S. C. Yostya, Y. P. Hidayat, A. B. Sekaranom, and A. A. Prabowo, "Analisis Thresholds Curah Hujan Pemicu Longsor Di Kulon Progo DIY Berdasarkan Data Komposit GSMaP Pada Periode OND Tahun 2020-2022," *Megasains*, vol. 15, no. 2, pp. 23-37, 2024.