

BAB 1

USULAN GAGASAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan negara dengan kondisi topografi yang beragam dan iklim tropis yang dipengaruhi oleh dua musim, yaitu musim hujan dan kemarau, dengan curah hujan yang tinggi sepanjang tahun. Berdasarkan Badan Pusat Statistik Indonesia tercatat bahwa rata-rata curah hujan dalam rentang tahun 2019 hingga 2023 mencapai 2016 mm/tahun [1], pada tahun 2023 curah hujan tercatat hingga 1562,6 mm per tahun dengan jumlah hujan sebanyak 128 hari [2]. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mengategorikan intensitas curah hujan menjadi beberapa bagian dengan representasi warna yang berbeda, yaitu warna abu-abu untuk 0 mm/jam sebagai kondisi berawan, warna hijau untuk 1 – 5 mm/jam sebagai hujan ringan, warna kuning untuk 5 – 10 mm/jam sebagai hujan sedang, warna oranye untuk 10 - 20 mm/jam sebagai hujan lebat, dan warna merah untuk > 20 mm/jam sebagai hujan sangat lebat [3].

Berdasarkan Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia, derajat kemiringan suatu wilayah dikategorikan menjadi empat kategori yaitu, 0° - 2° sebagai tanah datar, 2° - 15° sebagai wilayah landai, 15° - 40° sebagai wilayah miring, dan $> 40^{\circ}$ sebagai wilayah terjal [4]. Posisi Indonesia yang berada di persimpangan tiga lempeng tektonik utama, menjadi penyebab ketinggian dan kontur wilayah yang bervariasi, serta meningkatkan risiko bencana alam, salah satunya tanah longsor [5].

Dalam merancang simulator yang mampu mereplikasi kondisi pemicu longsor di Indonesia, kedua parameter fisik tersebut yaitu intensitas curah hujan dan derajat kemiringan lereng dianggap paling penting. Untuk memastikan relevansi hasil simulasi, sistem ini mengadopsi standar acuan dari lembaga resmi nasional. Standar dari BMKG digunakan sebagai acuan untuk mensimulasikan berbagai intensitas curah hujan, sementara klasifikasi dari BPS menjadi dasar untuk mereplikasi berbagai tingkat kemiringan lereng yang rawan longsor. Penetapan parameter dan standar ini menjadi landasan utama dalam perancangan spesifikasi teknis simulator yang akan dikembangkan.

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, tercatat total 4461 kejadian bencana longsor di Indonesia dalam rentang enam tahun terakhir sejak 2018 hingga 2023 dengan rata-rata kejadian sebanyak 743,5 [6]. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) 2024 mencatat bahwa terdapat 591 kejadian tanah longsor pada tahun 2023, menjadikan

bencana longsor sebagai bencana keempat yang paling sering terjadi di Indonesia [7]. Dikutip dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (Kementerian ESDM), tanah longsor sendiri terjadi akibat pergerakan material pembentuk lereng, seperti batuan, tanah, atau campuran yang bergerak menuruni lereng, hal ini dipicu oleh faktor geologi, air, maupun kegagalan konstruksi [8].

Kondisi Indonesia yang rawan terhadap bencana longsor ini menjadi hal yang penting untuk diperhatikan, berbagai penelitian sebagai langkah mitigasi dan kesiagaan terhadap bencana dibutuhkan. Salah satu yang bisa dilakukan adalah melakukan pengukuran dan analisis terkait pergerakan tanah. Pada tahun 2023, Program Studi Teknik Fisika Universitas Telkom bekerja sama dengan PT Kereta Api Indonesia (PT KAI) dalam penelitian pemantauan pergerakan tanah lereng di jalur kereta api. Penelitian ini melibatkan pengembangan OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*), yang mana merupakan sebuah alat yang berfungsi mendeteksi getaran dan gelombang akustik sensitivitas tinggi yang menginterogasi cahaya hamburan balik *rayleigh* yang berada dalam serat pengindraan [9]. Penelitian yang dipimpin oleh Dr. Casmika Saputra dari Telkom University ini menghasilkan sistem pemantauan berbasis serat optik dan *Wireless Sensor Networks* untuk lereng di perlintasan kereta api. Inovasi ini mendapatkan pendanaan Kedaireka 2023 dari Kemendikbudristek berkat desainnya yang portabel, kemudahan instalasi, dan kemampuan pemantauan jarak jauh melalui *Internet of Things*. Selain itu, penggunaan serat optik sebagai sensor dinilai lebih ekonomis dibandingkan metode tradisional seperti extensometer [10]. Dalam melakukan uji coba OTDR dibutuhkan sebuah media yang dapat mengondisikan kondisi lingkungan yang ada. Media yang umum digunakan adalah simulator tanah longsor. Alat ini biasanya berupa *chamber* yang diisi tanah dan dimiringkan untuk meniru kondisi lereng di Indonesia, serta dilengkapi dengan simulator curah hujan untuk meniru intensitas hujan di Indonesia [11].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Dr. Casmika Saputra sudah dihasilkan sebuah alat simulator longsor, namun alat simulator yang ada pada penelitian sebelumnya masih bersifat manual, dan hanya bisa mengondisikan kemiringan tanah saja. Kejadian longsor tidak hanya dipengaruhi oleh kemiringan tanah, namun juga hujan deras yang berkepanjangan, khususnya di daerah yang beriklim tropis [12]. Maka dari itu dibutuhkan sebuah simulator longsor yang mampu mengondisikan tidak hanya kondisi kemiringan, tetapi juga faktor lainnya seperti, intensitas curah hujan. Alat simulator longsor yang ada perlu didesain dengan sejumlah komponen yang dapat menunjang penelitian, seperti

sensor kelembapan tanah dan kamera untuk merekam kondisi percobaan. Seluruh komponen ini dikondisikan menyerupai kondisi nyata saat longsor terjadi [13].

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penulis mengusulkan inovasi dengan mengembangkan lebih lanjut simulator yang sudah ada, menjadikannya pilihan yang efisien dan berkelanjutan. Inovasi utamanya adalah transformasi dari sistem manual menjadi sebuah platform terotomatisasi penuh yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT). Simulator ini dirancang untuk mampu mengontrol kemiringan *chamber* dan menyimulasikan curah hujan secara presisi, yang seluruhnya dapat dioperasikan dari jarak jauh melalui sebuah website. Sistem ini juga akan dilengkapi fitur monitoring komprehensif, mencakup pemantauan kelembapan tanah, kondisi visual tanah melalui kamera, serta pengiriman notifikasi saat longsor terdeteksi. Selain itu, integrasi melalui protokol MQTT dan adanya fitur *digital twin* akan menyediakan representasi virtual kondisi simulator secara *real-time* di dalam website. Inovasi ini diharapkan dapat menjadi alat penelitian yang efektif untuk memudahkan peneliti dalam menganalisis pergerakan tanah dan mendukung mitigasi bencana longsor di Indonesia.

1.2 Tujuan

1. Sebagai alat penunjang penelitian yang memudahkan peneliti dalam melakukan penelitian terkait tanah dan bencana longsor.
2. Memberikan gambaran proses penelitian pada simulator longsor melalui monitoring data pada *website* serta *digital twin*.
3. Mengetahui seberapa efektif sistem kontrol dan monitoring pada simulator longsor dalam melakukan penelitian.
4. Mengetahui seberapa mudah penggunaan *website* dan *digital twin* yang terintegrasi dengan alat simulator longsor.

Penelitian ini berfokus pada perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kontrol dan monitoring pada simulator longsor. Namun, terdapat beberapa batasan yang perlu diperhatikan. Pertama, penelitian ini tidak mencakup analisis geoteknik mendalam mengenai jenis-jenis tanah yang berbeda, karena seluruh pengujian dan kalibrasi hanya menggunakan satu jenis tanah lempung berpasir. Kedua, selama implementasi, terjadi kendala teknis pada *electric hydraulic jack* yang mengalami kerusakan, akibat kurangnya *maintenance* selama 2 tahun terakhir sehingga kemampuan maksimal sistem untuk mengangkat beban *chamber* secara stabil terbatas hingga sudut 20°. Batasan lainnya adalah sistem simulasi curah hujan yang distribusinya belum sepenuhnya merata dan rentang

pengukuran sensor kelembapan tanah yang efektif hanya pada rentang 0% hingga 20% sebelum mengalami saturasi. Terakhir, sistem pengiriman data kecloud dibatasi oleh *rate limit* dari platform ThingSpeak versi gratis, yang menyebabkan terjadinya kehilangan data (*packet loss*) saat monitoring berfrekuensi tinggi.

1.3 Informasi Pendukung Masalah

Seperti yang dipaparkan pada sub-bab 1.1, tanah longsor mengakibatkan kerugian yang signifikan, baik dalam hal korban jiwa maupun kerugian materi. Pada tahun 2023, BNPB mencatat 132 korban jiwa yang diakibatkan bencana tanah longsor. Beberapa faktor pemicu terjadinya bencana tanah longsor adalah curah hujan tinggi dan topografi curam. Berdasarkan data BMKG, curah hujan tahunan pada tahun 2023 sebesar 1.562,6 mm dengan jumlah hari hujan sebanyak 128 hari. Kemiringan lereng juga mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap kerusakan tanah; untuk lahan dengan kemiringan 26-40% memiliki nilai kerusakan tanah jauh lebih tinggi dibandingkan 0-8% dan 9-15% [14]. Dikutip dari iNews Kuningan pada April 2024, sebuah kejadian longsor terjadi di jalan raya penghubung Cipasung-Selamjabe-Subang, lebih tepatnya di Desa Cimenga, Kecamatan Darma, Kuningan, Jawa Barat. Kejadian longsor ini diakibatkan oleh hujan yang cukup lebat dengan intensitas yang cukup lama, longsor ini terjadi di tebing dengan panjang 20 meter, tinggi 10 meter, dan lebar 5 meter [15]. Kombinasi antara kemiringan lereng yang tajam dan curah hujan yang tinggi dalam rentang waktu yang lama menjadikan sejumlah daerah di Indonesia rawan bencana longsor.

Dalam rangka menghadapi masalah ini, pengembangan simulator longsor dapat menjadi salah satu pendekatan yang efektif sebagai alat penunjang para peneliti longsor dalam memahami perilaku tanah dan memprediksi kejadian longsor. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Rawat dan Barthwal (2024) [16], penggunaan simulator longsor telah membantu dalam mengevaluasi efek kemiringan dan kelembapan pada stabilitas lereng. Sejalan dengan pendapat tersebut, Paswan dan Shrivastava (2023) mengungkapkan bahwa alat simulator longsor memungkinkan peneliti untuk melakukan pengukuran presisi terhadap parameter fisik seperti derajat kemiringan, kelembapan tanah, dan curah hujan, yang menjadi poin utama untuk memahami stabilitas lereng serta merancang skenario mitigasi [17]. Donnarumma menunjukkan bahwa sudut kemiringan lereng merupakan parameter indikator penting dalam analisis kerentanan longsor, khususnya di wilayah dengan kondisi geologi yang kompleks. Dalam penelitian tersebut, probabilitas kegagalan hanya dihitung pada rentang kemiringan yang sebelumnya telah mengalami fenomena

longsor, sehingga analisis lebih terfokus pada kondisi lereng yang memiliki riwayat kerusakan. Hasil evaluasi distribusi kemiringan menggunakan fungsi densitas Weibull mengidentifikasi bahwa kejadian longsor paling sering terjadi pada rentang sudut kemiringan sekitar 9° hingga 14° , yang mencerminkan tingkat keseimbangan kritis antara gaya penahan dan gaya penggerak massa tanah. [14] Sejalan dengan itu, tinjauan sistematis oleh Fernanda et al. menekankan pentingnya penentuan ambang batas curah hujan (*rainfall thresholds*) dengan mempertimbangkan berbagai tingkat probabilitas terlampaui (*exceedance probabilities*) untuk menetapkan tingkatan peringatan pada sistem peringatan dini longsor (*landslide early warning systems*). Pendekatan ini memungkinkan penilaian risiko yang tidak hanya bergantung pada satu nilai ambang tetap, tetapi juga mampu merepresentasikan tingkat ketidakpastian dan variasi kondisi lapangan. Dengan demikian, penggabungan parameter kemiringan lereng dan ambang curah hujan berbasis probabilitas dapat memberikan dasar yang lebih adaptif dan akurat dalam memprediksi serta menentukan kondisi rawan longsor pada sistem pemodelan atau simulator [15].

1.3.1 Analisis Parameter Dominan

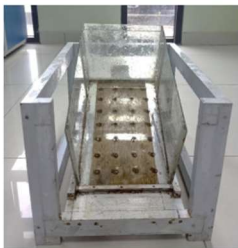
Dalam konteks simulasi untuk penelitian mitigasi, identifikasi parameter yang paling dominan dan berpengaruh sangatlah krusial untuk memastikan desain simulator fokus pada faktor-faktor pemicu utama. Berdasarkan studi literatur dan data kejadian, terdapat beberapa parameter yang saling terkait, namun dua di antaranya dapat diidentifikasi sebagai yang paling dominan. Parameter yang paling berpengaruh adalah intensitas curah hujan dan derajat kemiringan lereng. Curah hujan berperan sebagai pemicu dinamis utama. Hujan dengan intensitas tinggi dan durasi lama akan meningkatkan kadar air dalam tanah, yang menyebabkan naiknya tekanan air pori dan mengurangi kuat geser tanah, sehingga memicu pergerakan lereng. Hal ini terbukti dari berbagai kejadian longsor yang seringkali didahului oleh hujan lebat [16].

Sementara itu, kemiringan lereng adalah faktor statis fundamental yang menentukan potensi kerentanan suatu area. Lereng yang lebih terjal secara inheren memiliki stabilitas yang lebih rendah karena pengaruh gravitasi yang lebih besar. Penelitian menunjukkan bahwa lahan dengan kemiringan 26-40% memiliki tingkat kerusakan tanah yang jauh lebih signifikan dibandingkan lahan yang lebih landai. Meskipun kelembapan tanah juga merupakan parameter yang sangat penting, perannya lebih sebagai indikator kondisi atau parameter perantara. Kelembapan tanah bukanlah pemicu independen, melainkan hasil dari interaksi antara curah hujan yang turun dengan karakteristik tanah

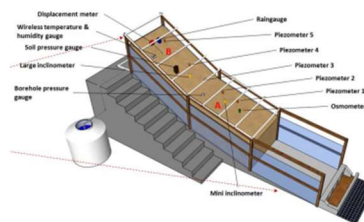
pada kemiringan tertentu. Penggunaan simulator longsor dalam penelitian pun seringkali berfokus pada evaluasi efek kemiringan dan kelembapan untuk memahami stabilitas lereng [17].

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa intensitas curah hujan adalah parameter pemicu paling dominan, yang pengaruhnya diperbesar oleh kondisi kemiringan lereng yang sudah ada sebelumnya. Oleh karena itu, kemampuan sebuah simulator untuk mengontrol kedua parameter ini secara presisi dan independen menjadi fungsionalitas inti yang paling berpengaruh untuk keberhasilan simulasi longsor.

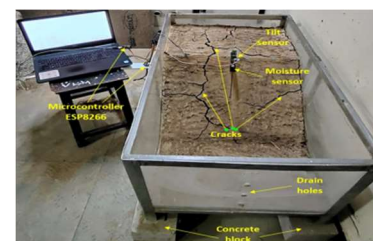
1.4 Solusi Yang Sudah Ada



Gambar 1. 1 Model Laboratorium Kecil [18]



Gambar 1.2 Platform berskala Kecil [19]



Gambar 1.3 Simulator berbasis sensor tilt MEMS [18]

Berbagai simulator longsor telah dikembangkan dengan kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Model laboratorium kecil (40 cm x 30 cm x 25 cm) efektif untuk mengukur hubungan antara kemiringan lereng, infiltrasi air, dan kedalaman bidang gelincir, tetapi pengumpulan data masih bersifat manual karena tidak ada sistem kontrol maupun sistem *monitoring* [19]. Qiao dkk. (2013) mengembangkan *platform* berskala kecil (1,5 m x 6 m) dengan sistem hujan buatan, yang memungkinkan pengujian sensor dan pengumpulan data *real-time*. Namun, *platform* ini memiliki sudut kemiringan yang tetap sehingga pengguna tidak dapat mengubah sudut kemiringan sesuai kebutuhan [20]. Simulator berbasis sensor *tilt* MEMS yang dirancang oleh Paswan dan Shrivastava (2023) menawarkan solusi berbiaya rendah untuk memantau sudut kemiringan dan kelembapan tanah. Meski efektif, alat ini memiliki kelemahan, seperti sensor yang bersifat sekali pakai, yang mana sensor diposisikan dalam satu tempat dan hanya digunakan untuk mendeteksi pergeseran tanah, dan tidak memiliki sistem kontrol sudut kemiringan maupun sistem kontrol dan *monitoring* curah hujan [18].

Beberapa simulator yang ada saat ini belum mampu mengatur sudut kemiringan dan intensitas curah hujan sesuai kebutuhan sekaligus, sehingga menyulitkan eksplorasi

skenario spesifik dalam melakukan penelitian. Oleh karena itu, pengembangan simulator yang memiliki sistem kompleks dan fleksibel sangat diperlukan untuk mendukung mitigasi bencana tanah longsor secara efektif.

1.5 Analisis Umum

Pada sub-bab ini dicantumkan beberapa aspek yang harus dipahami dalam penelitian. Aspek-aspek yang dicantumkan di bawah ini harus diidentifikasi dan ditinjau untuk mencapai hasil yang valid dan relevan. Berikut adalah aspek-aspek yang akan dibahas:

1.5.1 Aspek Teknologi

Ditinjau dari aspek teknologi, *capstone design* ini memberikan kontribusi pada bidang teknologi sebagai alat penunjang penelitian terkait longsor. Alat simulator ini dikontrol dan monitoring melalui *website* dengan dilengkapi fitur *digital twin* sebagai representasi digital kemiringan simulator longsor saat alat dioperasikan. Alat ini memiliki sistem kontrol otomatis yang dapat mengatur kemiringan sesuai dengan kategori kemiringan yang dikategorikan oleh BPS dan simulasi curah hujan dengan kategori yang ditentukan oleh BMKG seperti yang tercantum pada sub-bab 1.1. Sistem ini dilengkapi dengan pemantauan dan visualisasi terhadap perubahan kondisi tanah yang menjadi objek pengamatan pada simulator yang terintegrasi secara IoT.

Di samping itu, *capstone design* ini berfokus pada pengembangan alat yang menggunakan teknologi *digital twin*, yang memungkinkan simulasi kondisi nyata longsor melalui representasi digital dari sistem fisik. Sistem kontrol otomatis dirancang untuk mengatur kemiringan dan simulasi curah hujan, dua faktor yang dipertimbangkan dalam simulasi longsor, menggunakan algoritma cerdas yang menyesuaikan parameter yang diberikan. Selain itu, sistem pemantauan dilengkapi dengan sensor untuk mengukur kelembapan tanah, yang merupakan faktor kritis dalam memprediksi potensi longsor. Seluruh sistem terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT), memungkinkan komunikasi efisien antara perangkat dan sensor serta akses jarak jauh melalui *digital twin*. Hal ini meningkatkan fleksibilitas dan kemudahan dalam pemantauan serta pengontrolan simulator.

1.5.2 Aspek Keberlanjutan

Simulator ini dirancang sebagai alat yang efektif untuk mendukung penelitian dan pengembangan strategi mitigasi bencana longsor. Pemilihan komponen seperti akselerometer, *flow-meter*, pompa air, dan *nozzle* dilakukan dengan

mempertimbangkan efektivitas operasional dalam memenuhi kebutuhan penelitian. Komponen tersebut dipilih berdasarkan keandalan, keakuratan, dan ketersediaannya di Indonesia, memastikan kemudahan perawatan dan pemeliharaan untuk penggunaan jangka panjang.

Dari sisi integrasi, simulator dilengkapi sistem berbasis web yang memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh secara real-time, memberikan fleksibilitas tinggi dalam pengelolaan data dan analisis. Hal ini mendukung efisiensi pengelolaan, meningkatkan relevansi sistem dengan perkembangan teknologi, dan memperluas aksesibilitas bagi peneliti dan praktisi. Dengan keakuratan data dan kemudahan penggunaan, simulator ini menjadi solusi berkelanjutan yang efektif untuk memahami mekanisme longsor serta mengembangkan mitigasi yang lebih baik.

1.5.3 Aspek Ekonomi

Dalam aspek ekonomi, estimasi anggaran proyek ini memperhitungkan perbandingan antara kondisi riil dengan solusi eksisting komersial yang ada di pasar. Pemilihan mikrokontroler dan komponen lainnya dilakukan dengan mempertimbangkan biaya yang efisien, dengan fokus pada penggunaan komponen yang tidak berlebihan namun tetap mampu memberikan performa optimal. Hal ini bertujuan untuk mengurangi biaya investasi awal sambil memastikan kinerja sistem yang efektif dalam jangka panjang.

Kondisi riil di lapangan sering kali menghadirkan tantangan terkait ketersediaan dan harga komponen, yang dapat berbeda jauh dengan harga pasar komersial. Oleh karena itu, perbandingan antara solusi yang digunakan dalam proyek ini dengan sistem komersial yang sejenis sangat penting untuk menentukan keberlanjutan biaya operasional dan perawatan. Integrasi sistem dengan digital twin memungkinkan kontrol dan pemantauan jarak jauh, yang pada akhirnya dapat mengurangi kebutuhan untuk intervensi langsung dan memangkas biaya operasional dalam jangka panjang.

1.5.4 Aspek Aksesibilitas

Dengan dilengkapinya digital twin, informasi dari alat simulator dapat diakses secara *real-time* dengan memperhatikan *Quality of Service* (QoS). QoS mencakup parameter seperti *response time*, *throughput*, dan latensi, yang memastikan data dari *simulator* dikirimkan ke *digital twin* tanpa jeda signifikan. *Response time* yang optimal menjadi kunci agar dapat segera mengetahui kondisi terkini alat simulator saat terjadi

longsor, memungkinkan pengambilan keputusan secara cepat dan akurat. Penempatan alat simulator dan konfigurasi jaringan juga harus mendukung kecepatan transmisi data, guna meminimalkan gangguan yang dapat memengaruhi performa sistem pemantauan, pemasangan, serta perawatan alat.

1.5.5 Aspek Keselamatan

Alat simulator ini dibuat dengan mempertimbangkan aspek keselamatan. Beberapa diantaranya ditinjau dari posisi persebaran air untuk simulasi curah hujan yang dibuat agar tidak keluar dari wilayah *chamber* dan merusak komponen listrik yang ada, pemberian batasan beban maksimum tanah yang dapat ditampung *chamber* untuk meminimalisir kerusakan dongkrak dan batasan kemiringan maksimum *chamber* agar tidak merusak alat. Disamping itu ditinjau juga dari segi kelistrikan seperti pemosisian komponen listrik yang diberi pelindung tertutup untuk meminimalisir kerusakan, daya maksimum yang dapat dilakukan sistem.

1.6 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Untuk memastikan *capstone design* yang diusulkan dapat berfungsi secara optimal, berbagai kebutuhan sistem harus dipenuhi. Sistem yang dirancang perlu terintegrasi dengan baik, menggabungkan teknologi IoT untuk kontrol dan pemantauan jarak jauh. *Digital twin* menjadi salah satu solusi penting dalam sistem ini, karena memungkinkan para peneliti untuk mendapatkan visualisasi kondisi simulasi yang sedang dilakukan secara virtual. Dengan adanya *digital twin*, peneliti dapat memantau dan menganalisis hasil simulasi lebih efektif, serta mengoptimalkan penyesuaian kondisi eksperimen secara *real-time*.

Solusi yang ada sebelumnya, seperti simulator berbasis sensor *tilt* MEMS dan *platform* hujan buatan, telah memenuhi sebagian kebutuhan dasar, seperti pengujian sensor dan pemantauan kelembapan. Namun, masih ada beberapa kekurangan, seperti ketidakmampuan dalam mengatur sudut kemiringan dan simulasi curah hujan secara dinamis. Oleh karena itu, solusi dalam *capstone design* ini menawarkan pengembangan simulator yang memungkinkan penyesuaian langsung sudut kemiringan dan simulasi curah hujan melalui *platform website*, yang dapat dikendalikan jarak jauh.

Komponen-komponen seperti sensor kelembapan, akselerometer, dan *flowmeter* akan dipilih berdasarkan keandalan dan ketersediaan di pasaran. Pemilihan komponen ini bertujuan untuk mempermudah pemeliharaan dan penggantian suku cadang, memastikan sistem tetap efektif dan efisien dalam jangka panjang. Sistem pengendalian

juga dilengkapi dengan kemampuan pemantauan jarak jauh yang memungkinkan peneliti untuk mengontrol simulator dari lokasi lain melalui *website*.

Analisis visual berbasis kamera akan digunakan untuk memantau perubahan fisik pada tanah, membantu mendeteksi jika tanah di *chamber* sudah mengalami longsor. Teknologi ini memungkinkan penelitian yang lebih mendalam terhadap mekanisme longsor. Ketika longsor terdeteksi, sistem akan mengirimkan notifikasi ke *website* yang dapat diakses oleh pengguna untuk pengawasan dan pengambilan keputusan lebih lanjut.

Berikut adalah tabel komponen yang harus dipenuhi untuk sistem ini, yang dirancang untuk memastikan fungsionalitas dan efektivitas sistem simulator longsor:

Tabel 1. 1 Komponen yang digunakan beserta keterangan

No	Komponen dan Aplikasi	Fungsi	Jenis	Jumlah
1	Sensor Kelembapan Tanah	Mengukur kelembapan tanah untuk analisis longsor	<i>Hardware</i>	1
2	Sensor Akselerometer	Mengukur sudut kemiringan tanah atau <i>chamber</i>	<i>Hardware</i>	1
3	Sensor <i>Flowmeter</i>	Mengukur laju aliran air atau curah hujan buatan	<i>Hardware</i>	1
4	<i>Chamber</i>	Tempat untuk pengujian dan pengukuran simulasi tanah longsor	<i>Hardware</i>	1
5	<i>Shelter</i>	Menyediakan perlindungan untuk <i>chamber</i> dan sensor dari kondisi luar	<i>Hardware</i>	1
6	<i>Juction Box</i>	Panel kontrol keseluruhan sistem simulator longsor	<i>Hardware</i>	1
7	<i>Power Supply</i> 12V	Sumber tegangan listrik	<i>Hardware</i>	1
8	Kamera Analisis Visual dan <i>Streaming</i>	Memantau perubahan fisik pada tanah seperti retakan atau deformasi	<i>Hardware</i>	1

No	Komponen dan Aplikasi	Fungsi	Jenis	Jumlah
9	Sistem Kontrol Kemiringan	Mengatur kemiringan <i>chamber</i> untuk simulasi tanah longsor	<i>Hardware</i>	1
10	Sistem Kontrol Simulasi Curah Hujan	Mengatur intensitas curah hujan buatan untuk simulasi tanah longsor	<i>Hardware</i>	1
11	<i>Website</i>	<i>Platform</i> untuk memantau dan mengontrol simulator longsor secara jarak jauh	<i>Software</i>	1
12	<i>Digital Twin</i>	Merepresentasikan kondisi nyata simulator longsor secara virtual di dalam <i>website</i>	<i>Software</i>	1
13	Mikrokontroler	Mengendalikan dan memproses data dari sensor serta menghubungkan sistem dengan jaringan	<i>Hardware</i>	1
14	<i>Regulator Step Down</i>	Menurunkan tegangan listrik	<i>Hardware</i>	4
15	<i>Driver motor</i>	Mengendalikan aktuator pada sistem kontrol kemiringan dan sistem kontrol simulasi curah hujan	<i>Hardware</i>	2
16	ThingSpeak (Platform IoT)	Menyimpan, memproses, dan memvisualisasikan data sensor melalui MQTT dan API	<i>Software</i>	1
17	MQTT	Protokol komunikasi untuk mengirimkan data dari sensor ke ThingSpeak dan <i>website</i>	<i>Software</i>	1

Dengan komponen-komponen tersebut, *capstone design* ini akan dapat memenuhi kebutuhan sistem yang mendalam untuk penelitian tanah longsor, serta dapat dikendalikan dan dipantau secara efektif melalui *website* yang menyediakan antarmuka kontrol dan *monitoring* yang mudah digunakan. Dengan desain yang modular, fleksibel, dan memungkinkan pengaturan manual melalui *website*, *capstone desain* ini bertujuan untuk mengatasi kekurangan yang ada pada solusi sebelumnya, sekaligus membuka peluang pengembangan jangka panjang untuk penelitian tanah longsor di masa depan.

1.7 Solusi Sistem yang Diusulkan

Dalam mengembangkan sistem simulator longsor yang lebih efektif, berbagai kebutuhan harus dipenuhi berdasarkan analisis terhadap solusi yang telah ada. Berdasarkan perbandingan antara simulator laboratorium kecil dari Saleng dkk.(2024), platform hujan buatan dari Qiao dkk. (2013), simulator tilt MEMS dari Paswan & Shrivastava (2023), dan *capstone design* yang diusulkan, terlihat bahwa sistem yang diusulkan menawarkan solusi yang lebih lengkap dan fleksibel. Perbandingan ini disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 1.2 Perbandingan dengan solusi yang sudah ada

Aspek	Simulator Laboratorium Kecil [19]	Platform Hujan Buatan [20]	Simulator Tilt MEMS [18]	Capstone Design yang Diusulkan
Pengumpulan Data Real-time	✗	✓	✓	✓
Sistem Kontrol Kemiringan	✓	✗	✗	✓
Sistem Kontrol Curah Hujan	✗	✓	✗	✓
Sistem Monitoring Kemiringan	✗	✓	✓	✓
Sistem Monitoring Curah Hujan	✗	✓	✗	✓

Aspek	Simulator Laboratorium Kecil [19]	Platform Hujan Buatan [20]	Simulator Tilt MEMS [18]	Capstone Design yang Diusulkan
Sistem Monitoring Kelembapan	✗	✓	✗	✓
Notifikasi Kejadian Longsor	✗	✗	✗	✓
Keterhubungan Antar sistem	✗	✗	✗	✓

Sistem yang diusulkan terdiri dari dua bagian utama, yaitu sistem *software* dan sistem *hardware*. Sistem *software* mencakup *back-end* yang bertugas untuk pengolahan dan validasi data, serta *front-end* berupa *website* yang menyediakan berbagai fitur. *Website* ini memiliki fitur *digital twin* yang merepresentasikan kondisi nyata simulator, fitur untuk mengontrol sudut kemiringan dan simulator curah hujan, pemantauan kelembapan tanah secara *real-time*, serta kemampuan untuk melakukan *capture* visual tanah menggunakan kamera. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengontrol simulator secara jarak jauh dengan antarmuka yang mudah digunakan.

Sistem *hardware* dalam *capstone design* ini terbagi menjadi empat sub-sistem utama. Sub-sistem pertama adalah kontrol kemiringan *chamber*, yang dirancang untuk mengatur sudut kemiringan sesuai kebutuhan simulasi. Sub-sistem kedua adalah kontrol simulasi curah hujan, yang berfungsi untuk mengatur intensitas curah hujan buatan dalam eksperimen. Sub-sistem ketiga adalah *monitoring* kelembapan tanah, yang bertugas untuk mengukur perubahan kelembapan tanah dan memberikan data penting untuk mendeteksi potensi longsor. Sub-sistem keempat adalah analisis visual tanah, yang menggunakan kamera untuk memantau perubahan fisik pada tanah yang dapat menjadi indikator terjadinya longsor.

Seluruh sistem ini terintegrasi melalui protokol komunikasi MQTT, yang memastikan data dapat dikirim dan diterima secara *real-time* antara *hardware* dan *software*. *Capstone design* juga mengintegrasikan sistem notifikasi kejadian longsor yang akan mengirimkan pemberitahuan langsung kepada pengguna jika terjadi longsor

dan fitur streaming pada simulator longsor untuk memantau kondisi percobaan simulator longsor.

1.8 Kesimpulan dan Ringkasan CD-1

Capstone design ini berfokus pada pengembangan simulator tanah longsor berbasis teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk mendukung penelitian dan mitigasi bencana longsor di Indonesia. Longsor merupakan ancaman serius di Indonesia, mengingat tingginya curah hujan dan kondisi topografi yang curam. Oleh karena itu, diperlukan alat yang mampu mereplika kondisi longsor secara realistis untuk penelitian lebih lanjut. Dalam hal ini, Simulator longsor yang dirancang dilengkapi dengan berbagai fitur canggih, termasuk kontrol dinamis untuk kemiringan tanah, simulasi curah hujan, serta pemantauan kelembapan tanah secara *real-time*, yang semuanya terintegrasi dalam sistem berbasis *IoT* dan dapat dikendalikan melalui *website*. Fitur *digital twin* pada simulator memungkinkan simulasi kondisi nyata longsor dengan representasi digital, yang mempermudah pemantauan dan analisis kondisi tanah.

Dari segi teknologi, alat ini menggunakan berbagai sensor seperti sensor kelembapan tanah, akselerometer, dan *flowmeter*, yang semua terhubung melalui sistem *IoT* untuk memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh. Sistem ini juga dirancang secara *modular*, sehingga memudahkan proses perawatan dan memungkinkan pembaruan atau peningkatan sistem di masa depan. Selain itu, aspek keberlanjutan diperhatikan dengan memilih komponen yang akurat dan reliabel, serta mempertimbangkan efisiensi biaya operasional dengan mengoptimalkan penggunaan mikrokontroler dan memaksimalkan kontrol jarak jauh. Aspek keselamatan juga menjadi prioritas dengan adanya sistem kelistrikan yang aman.

Dengan sistem yang modular dan berbasis *IoT*, alat ini dapat mengatasi kekurangan pada solusi sebelumnya yang tidak dapat menyesuaikan kemiringan *chamber* atau simulasi curah hujan secara dinamis. Alat ini menawarkan keuntungan dalam hal pemantauan yang lebih efisien, notifikasi kejadian longsor secara *real-time*, fitur *streaming* pada simulator longsor, serta integrasi antar sistem untuk pemantauan yang lebih menyeluruh. Sistem yang diusulkan juga menyediakan *platform* berbasis *website* yang memfasilitasi pengontrolan dan pemantauan jarak jauh, dengan fitur-fitur seperti pengaturan kemiringan *chamber* dan simulasi curah hujan, pemantauan kelembapan tanah, serta analisis visual tanah menggunakan kamera. Dengan desain yang terintegrasi dan berbasis *IoT*, simulator ini tidak hanya menawarkan solusi

teknologi yang efektif tetapi juga memberikan kontribusi penting dalam mitigasi bencana longsor di Indonesia.