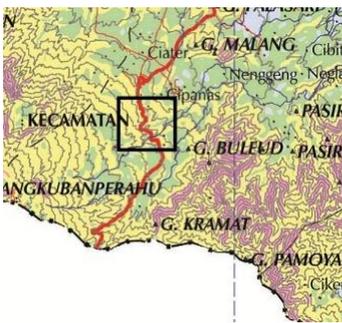


BAB III METODE PENELITIAN

A. Kondisi Geologi Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di daerah antara jalan raya Lembang, Kabupaten Bandung Barat sampai daerah Desa Cirangkong, Kecamatan Cijambe, Kabupaten Subang. Berikut adalah peta kerentanan gerakan tanah, elevasi dan koordinat lokasi penelitian yang disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Peta kerentanan gerakan tanah di lokasi penelitian

Lokasi	Peta Kerentanan Gerakan Tanah	Koordinat	Elevasi (mdpl)
Lembang		6,49° LS dan 107,36° BT	1158
Jalan raya Subang		6,44° LS dan 107,38° BT	1109

Cijambe 3		6,38° LS dan 107,43° BT	402
Cijambe 2		6, 38° LS dan 107,44° BT	505
Cijambe 1		6, 38° LS dan 107,44° BT	521

Keterangan : warna merah muda, kuning, hijau, biru mengindikasikan zona kerentanan pergerakan tanah tinggi, menengah, rendah, dan sangat rendah secara berurutan (sumber: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi).

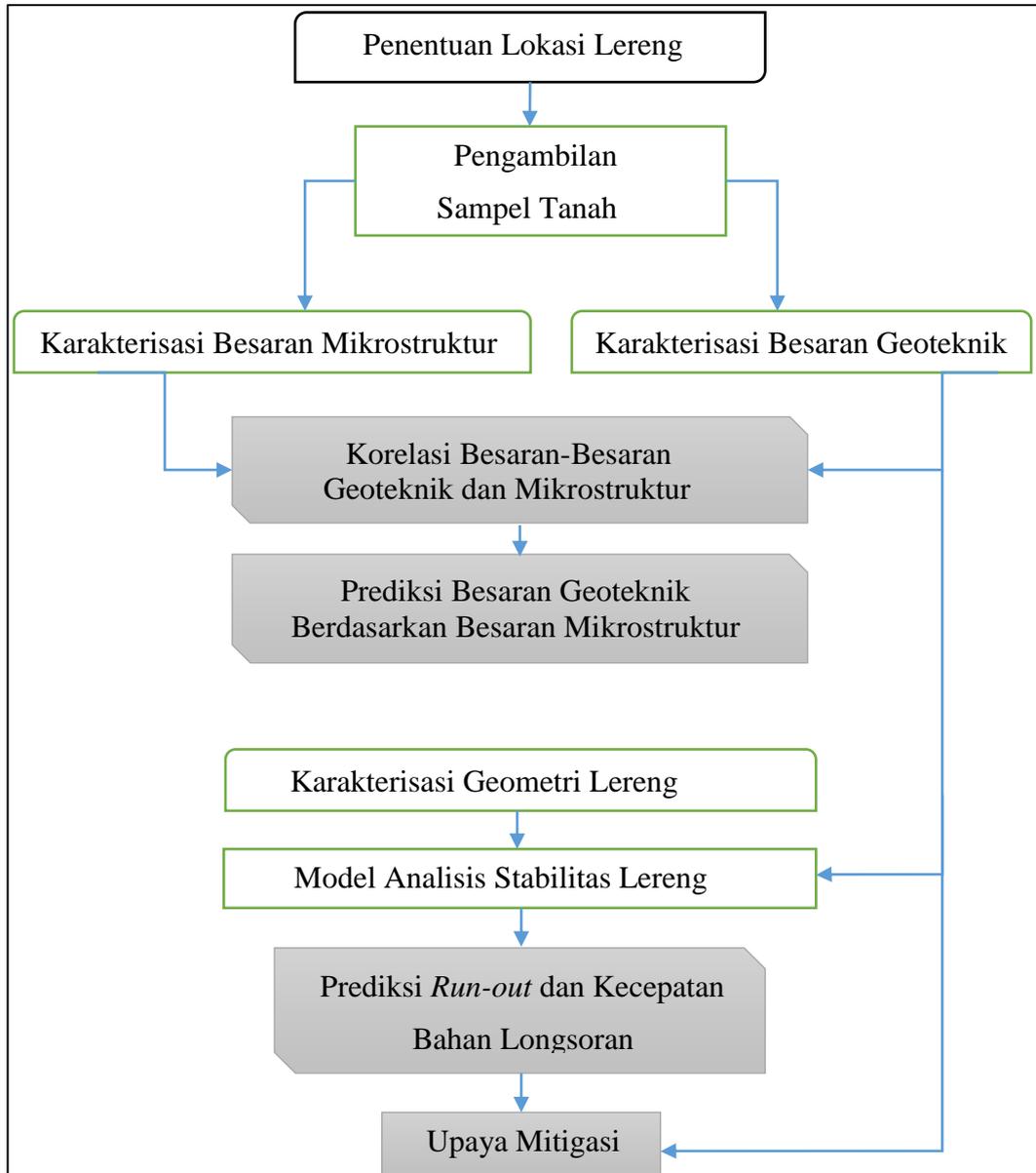
Berdasarkan sudut pandang geomorfologi, lereng/bukit dari kelima lokasi penelitian sangat terjal yaitu memiliki kisaran kemiringan sekitar 69°-76°. Sedangkan berdasarkan sudut pandang geologi, secara garis besar kelima lokasi penelitian terbagi menjadi dua wilayah yaitu Bandung barat dan Subang. Wilayah Bandung barat tersusun atas batu gamping, batu lempung, napal, dan batu pasir kuarsa (Sutikno, 2006). Sedangkan di wilayah Subang secara garis besar tersusun atas batu lempung berwarna abu-abu terang saat sedang dalam kondisi segar. Sedangkan saat dalam keadaan lapuk batu lempung akan berwarna coklat kemerahan akibat kadar dari oksida besi. Pelapisan batuan pada umumnya

memperlihatkan bentuk pelapisan dengan ketebalan 0,5m-5m dan sisipan batu pasir dengan ketebalan 0,1m - 0,2m. Hal tersebut sesuai dengan hasil pengujian tanah di laboratorium dimana jenis tanah pada kelima lokasi merupakan lempung, pasir dan lanau (campuran lempung dan pasir).

Menurut Kusratmoko (2002) faktor terjadinya longsor terbagi menjadi 4, yaitu ketinggian dan kemiringan lereng (persentase 40%), penggunaan lahan penutup tanah (persentase 30%), keadaan/jenis tanah dan batuan (persentase 20%), dan curah hujan (persentase 10%). Berdasarkan faktor diatas, ketinggian dan kemiringan lereng memiliki faktor utama. Hal tersebut sesuai dengan hasil pengukuran kemiringan lereng dari kelima tempat penelitian yang lebih dari 60°. Sedangkan penggunaan lahan dari kelima tempat penelitian telah digunakan sebagai perkebunan sehingga resapan dan daya ikat akar dengan tanah berkurang. Keadaan/jenis batuan dan tanah berdasarkan hasil pengujian merupakan jenis lempung, pasir dan lanau. Curah hujan di wilayah Bandung adalah (216 mm-305 mm) dan Subang (325 mm-468 mm). (Badan Pusat Statistika Jawa Barat, 2013).

B. Metode Penelitian

Secara garis besar penelitian ini terdiri dari pengambilan sampel tanah bidang gelincir dan tanah bahan longsor dari lima lokasi longsor yang berbeda. Sampel tanah yang diambil kemudian dilakukan uji sifat fisik tanah di laboratorium dan di *scan* dengan menggunakan alat μ -CT *Scan*. Dari hasil uji sifat fisik dan hasil pengolahan citra digital hasil *scan* kemudian digunakan untuk mengetahui korelasi antara parameter-parameter hasil uji sifat fisik dan hasil analisis mikrostruktur. Selain itu, hasil kedua uji tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik bidang gelincir longsor. Kemudian parameter yang didapat dari hasil uji fisik digunakan juga untuk memodelkan volume tanah yang tidak stabil dan prediksi *run-out* tanah longsor. Dari hasil karakterisasi lereng dibuat upaya mitigasi bencana berdasarkan peningkatan Faktor Keamanan (FK). Berikut adalah alur penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram alur penelitian

C. Pengambilan Sampel Tanah

Ada lima tempat kejadian tanah longsor yang diambil sampel tanah untuk diteliti. Setiap tempat diambil empat sampel tanah yang terdiri dari dua sampel tanah bahan longsoran dan dua sampel tanah bidang gelincir. Dari kedua sampel tanah yang berbeda kemudian digunakan untuk pengujian sifat mikrostruktur dan untuk pengujian geoteknik.

Sampel tanah diambil secara langsung dengan menggunakan alat berbahan logam yang berbentuk silinder. Sampel tanah yang diambil kemudian dibungkus

dengan *cling wrap* dan lakban kertas untuk menjaga keaslian tanah. Untuk pengujian ukuran butir dan uji rembesan diperlukan sampel tanah tambahan.



Gambar 3.2 Pengambilan sampel tanah bidang gelincir dan tanah bahan longsor.

D. Karakterisasi Besaran Geoteknik

1. Uji Untuk Menentukan Kadar Air Tanah

Kadar air merupakan perbandingan antara berat air dengan berat butiran padat dalam tanah yang dinyatakan dalam persen. Pengukuran kadar air terdiri dari tiga tahap perhitungan, yaitu :

Pengukuran berat awal.

$$W_1 = W_c + W_s + W_w$$

(3.1)

Pengukuran sampel yang telah dikeringkan.

$$W_2 = W_c + W_s$$

(3.2)

Presentase kadar air.

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} = \frac{W_w}{W_s}$$

(3.3)

dimana W_c adalah berat cawan, W_s adalah berat butiran tanah kering, W_w adalah berat air, dan w adalah kadar air.

Terdapat sepuluh sampel yang di uji yang terdiri dari lima sampel tanah bidang gelincir dan lima sampel tanah bahan longsor. Dari sepuluh sampel yang telah ditimbang berat awal (W_1) kemudian di keringkan kedalam oven yang suhunya sekitar $80^\circ - 100^\circ\text{C}$ selama 24 jam agar kandungan air yang ada dalam pori tanah menguap sepenuhnya sehingga diperoleh berat sampel tanah kering W_2 . Kemudian digunakan persamaan untuk menentukan kadar air dari setiap sampel.



Gambar 3.3 Pengukuran berat cawan, ring dan sampel tanah

2. Uji Untuk Menentukan Berat Isi dan Berat Jenis Tanah

Berat isi tanah didefinisikan sebagai berat tanah total (W_{total}) per satuan volume total (V_{total}) yang disimbolkan dengan (γ). Sedangkan berat isi kering (γ_s) adalah berat tanah kering (W_s) dibagi volume tanah total. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{W_{total}}{V_{total}} \quad (3.4)$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_{total}} \quad (3.5)$$

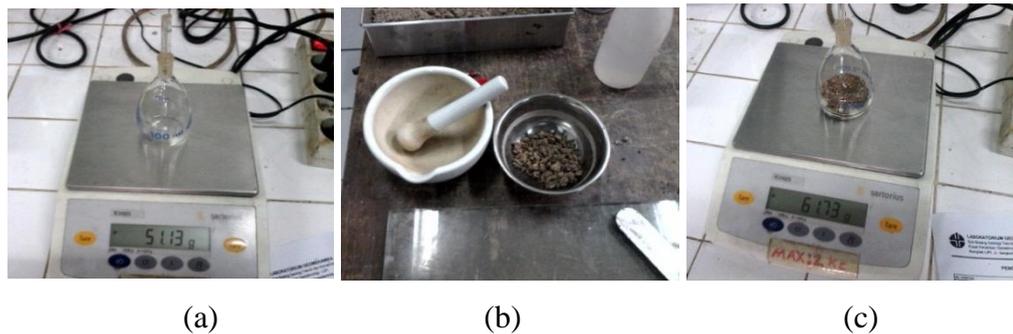
Parameter yang dibutuhkan untuk memperoleh nilai berat isi tanah (γ) dan berat isi tanah kering (γ_s) dapat ditentukan secara langsung selama proses pengukuran porositas dan derajat saturasi. Sehingga prosedur pengukurannya sama dengan prosedur pengukuran porositas dan derajat saturasi.

Berat jenis atau *specific gravity* (G_s) merupakan perbandingan antara berat isi suatu material tanah (γ_s) dan berat isi air (γ_o), dimana umumnya material acuan yaitu air murni pada temperatur 4°C dimana dalam penelitian ini material yang digunakan adalah aquades. Persamaan matematis berat jenis padatan (G_s) adalah sebagai berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} \quad (3.6)$$

Untuk mengetahui berat jenis padatan, maka dilakukan pengukuran sesuai prosedur yang telah ditetapkan seperti menyiapkan dua buah piknometer dan ditimbang beratnya (W_1) (Gambar 3.4). Kemudian menyiapkan sampel tanah sekitar 10-15 gram yang telah dikeringkan. Tanah tersebut kemudian ditumbuk hingga menjadi butiran yang berdiameter kecil agar masuk ke dalam piknometer. Piknometer yang berisi tanah lalu ditimbang kembali (W_2) sehingga didapat berat sampel tanah (W_s) dengan persamaan berikut:

$$W_s = W_2 - W_1 \quad (3.7)$$



Gambar 3.4 Gambaran umum uji untuk menentukan berat isi dan berat jenis tanah. (a) Contoh pengukuran piknometer; (b) Sampel tanah kering yang bermassa sekitar 10-15 gr dan alat penumbuk; (c) Contoh pengukuran piknometer yang berisi massa tanah yang telah dihaluskan

Setelah tanah ditimbang, kemudian ditambah dengan aquades hingga setengah penuh. Lalu piknometer tersebut dipanaskan hingga gelembung-gelembung udara yang terdapa dalam tanah keluar bersamaan dengan air yang menguap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Proses mengeluarkan udara yang terdapat dalam tanah dengan cara memanaskan piknometer

Langkah selanjutnya piknometer diisi dengan aquades hingga penuh dengan kemudian ditimbang lagi sehingga diperoleh berat air ketika mengandung tanah (W_3). Setelah itu air dan tanah dikeluarkan dari piknometer, lalu piknometer dibersihkan yang kemudian diisi dengan aquades hingga penuh kemudian menimbanginya kembali (W_4).

Berdasarkan hubungan persamaan (3.6) maka berat jenis tanah kering (G_s) dapat ditentukan.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} = \frac{\frac{w_s}{V_s}}{\frac{w_o}{V_o}} \quad (3.8)$$

Dimana γ_s adalah berat isi tanah kering, γ_o adalah berat isi aquades, W_s adalah berat tanah kering, W_o adalah berat air, V_s adalah volume tanah kering, dan V_o adalah volume air. Karena tanah dan aquades berada dalam piknometer yang sama ($V_s = V_o$), dan berat air didapat berdasarkan persamaan (3.9).

$$W_o = (W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)$$

(3.9)

maka persamaan berat jenis menjadi,

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)}$$

(3.10)

3. Uji Untuk Menentukan Porositas Tanah

Porositas (n) adalah perbandingan antara volume pori (V_{pori}) terhadap volume sampel tanah keseluruhan (V), secara matematis seperti berikut:

$$n = \frac{V_{pori}}{V} \quad (3.11)$$

Sedangkan V_{pori} didapat dari hubungan antara volume sampel tanah asli yang masih mengandung air (V_{basah}) dikurangi dengan volume tanah kering (V_{kering}), secara matematis seperti berikut:

$$V_{pori} = V_{basah} - V_{kering} \quad (3.12)$$

Karena sampel tanah asli diambil menggunakan ring, maka volume tanah asli yang masih basah diasumsikan sama dengan volume ring. Volume ring dapat dihitung secara manual dengan mengukur tinggi dan diameter ring menggunakan jangka sorong. Sedangkan volume tanah kering dihitung dengan menggunakan hubungan massa jenis yang telah diuji sebelumnya:

$$V_{kering} = \frac{W_{kering}}{\rho} \quad (3.13)$$

Dimana W_{kering} adalah berat sampel tanah kering yang dikeringkan kedalam oven selama satu hari, ρ adalah massa jenis tanah.

4. Uji Untuk Menentukan Derajat Saturasi Tanah

Derajat saturasi (S) adalah perbandingan antara volume pori yang terisi air (volume air, V_{air}) dengan volume total rongga pori tanah (V_{pori}).

$$S = \frac{V_{air}}{V_{pori}} \quad (3.14)$$

Volume air dapat diperoleh dari hubungan massa jenis.

$$V_{air} = \frac{W_{air}}{\rho} \quad (3.15)$$

Dan berat air (W_{air}) didapat dari pengurangan antara berat tanah basah (W_{basah}) dengan berat tanah kering (W_{kering}).

$$W_{air} = W_{basah} + W_{kering} \quad (3.16)$$

5. Uji Untuk Menentukan Koefisien Rembesan

Tanah terdiri dari butiran-butiran dengan rongga yang saling terhubung sehingga tanah dapat mengalir atau merembes melalui butiran walaupun dengan kecepatan yang sangat lambat. Metode yang digunakan dalam pengukuran koefisien rembesan (*hydraulic conductivity*) dalam penelitian ini adalah metode *falling head*. Dalam proses pengikisan koefisien rembesan (*hydraulic conductivity*) diperlukan sampel tanah yang telah dimasukkan kedalam ring kemudian memasukkannya ke dalam tabung (Gambar 3.6). Kemudian tanah tersebut dialiri air dan dihitung kecepatan rembesannya.

Air harus sepenuhnya melewati luas penampang sampel sehingga celah antara ring dengan tabung harus tertutup rapat. Cara agar tidak ada celah antara ring dengan tabung adalah dengan memberikan cairan lilin diantara kedua sisi.



(a)

(b)

Gambar 3.6 Persiapan pengukuran koefisien rembesan (a) contoh sampel tanah dalam ring yang dimasukkan ke dalam tabung (b) contoh permukaan dalam tabung yang telah dilapisi oleh parafin cair

Secara umum, metode ini mengukur koefisien rembesan dengan mengalirkan air menuju tabung yang berisi sampel tanah sehingga melewati sampel tanah tersebut dengan menghitung perubahan ketinggian air per satuan waktu. Berikut adalah gambaran dari uji koefisien rembesan seperti terlihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Komponen alat pengujian koefisien rembesan menggunakan metode *falling head*.

Secara matematis, persamaan koefisien rembesan (*hydraulic conductivity*) adalah sebagai berikut:

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (3.17)$$

Dimana a adalah luas penampang buret, L adalah panjang sampel tanah, A adalah luas penampang sampel tanah, t adalah durasi waktu perpindahan air dari atas buret hingga melewati sampel tanah, h_1 adalah tinggi awal air dalam buret, dan h_2 adalah tinggi akhir dalam buret setelah beberapa waktu (t).

6. Uji Untuk Menentukan Distribusi Ukuran Butir

Ukuran butir tanah sangat beragam, sehingga diperlukan dua metode untuk menghitung distribusi ukuran butir tanah. Distribusi ukuran butir kasar ($>0,074$ mm) ditentukan dengan menggunakan metode pengayakan. Sedangkan distribusi ukuran butir halus ($<0,074$ mm) dilakukan dengan pengujian hidrometer. Pada metode pengayakan, alat yang digunakan adalah susunan saringan yang berbeda-beda ukurannya dan kemudian sampel butiran kering ditaruh pada ayakan yang paling atas. Sebelumnya ayakan tersebut masing-masing telah diukur beratnya. Kemudian saringan digetarkan dan butiran-butiran akan tertinggal pada masing-masing saringan sesuai dengan ukuran butirnya. Lalu butiran tanah yang tersaring diatas saringan diukur beratnya bersamaan dengan saringan tersebut sehingga didapat berat butiran yang tertahan. Proses tersebut diperlihatkan pada Gambar

3.8. Dari hasil tersebut, kemudian dibuat tabel presentase massa komulatif tanah yang tertahan disetiap nomor saringan dan digambarkan menjadi grafik butiran.

Untuk menguji ukuran butir halus ($<0,075\text{mm}$) diperlukan hukum Stokes yang berbunyi semua butiran yang ukurannya sama akan menurun dengan kecepatan yang sama dimana kecepatannya sebanding dengan kuadrat dari ukuran butirannya. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$v = \left(\frac{D}{K} \right)^2 \quad (3.18)$$

Dimana v merupakan kecepatan turunnya butir, D merupakan ukuran butir, dan K merupakan konstanta yang bergantung pada suhu dan berat jenis butir tanah.

Kemudian kita dapat mengetahui kuran butir dengan menggunakan persamaan (3.19).

$$D = K \sqrt{v} = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (3.19)$$

dimana L merupakan kedalaman ketika turun dan t adalah waktu.

(nilai untuk memperoleh nilai kedalaman efektif L terdapat pada Lampiran 1. dan nilai konstanta K terdapat pada Lampiran 2).



1 set saringan



butiran yang tertahan



Gambar 3.8 Proses penyaringan menggunakan alat pengayak (Firmansyah, dkk, 2015)

Perhitungan persentase seluruh sampel tanah yang terdapat dalam campuran aquades + gliserin + tanah dapat menggunakan persamaan berikut:

$$P = \frac{R_c \times a}{w_s} \times 100\% \quad (3.20)$$

dimana R_c merupakan pembacaan hidrometer terkoreksi, a merupakan faktor koreksi berat jenis (Lampiran 3), w_s merupakan berat sampel tanah.

Kemudian persamaan untuk menentukan pembacaan hidrometer terkoreksi adalah sebagai berikut:

$$R_c = R_{terbaca} + C_T \quad (3.21)$$

Dimana $R_{terbaca}$ merupakan nilai yang terbaca langsung dari hidrometer dan C_T merupakan koreksi suhu (Lampiran 4). Maka persentase diameter butiran yang mengendap terhadap sampel keseluruhan dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$P_A = \frac{P \times F_{200}}{100} \quad (3.22)$$

dimana F_{200} merupakan persentase yang lolos saringan nomor 200. Berikut adalah gambaran proses pengukuran ukuran butir dengan menggunakan metode hidrometer seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Gambaran umum mengenai prosedur analisis hidrometer (Firmansyah, dkk, 2015)

7. Uji Untuk Menentukan Batas Cair, Batas Plastis dan Batas Susut

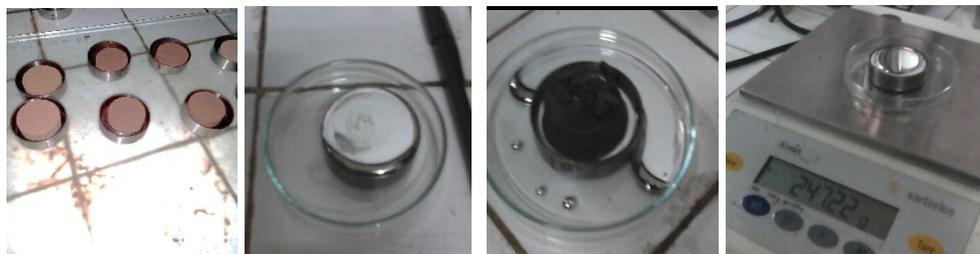
Batas cair didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis. Proses pengujiannya adalah dengan mencampur tanah dengan air kemudian diaduk hingga membentuk adonan. Kemudian diletakkan kedalam alat uji yang bernama Casagrande yang dapat dilihat pada Gambar 3.10.

Mangkuk dapat bergerak naik turun yang digerakkan oleh alat pemutar. Naik turunnya mangkuk tersebut menimbulkan ketukan. Jumlah ketukan ini yang akan menjadi standar hitungan. Kadar air yang diperoleh dan jumlah ketukan diplot ke grafik. Kemudian nilai kadar air pada ketukan 25 adalah batas cair tanah yang diuji. Untuk menentukan kadar air tanah, maka cara yang sama dilakukan seperti pada pembahasan pada bagian sebelumnya.



Gambar 3.10 Adonan tanah yang telah diletakkan kedalam alat Casagrande.

Batas susut merupakan batas kadar air dimana volume tanah tidak berubah (menyusut lagi) ketika terjadi penurunan kadar air. Prosedur pengujian diawali dengan membuat adonan tanah dengan air yang kemudian dimasukkan secara penuh kedalam cawan kecil yang terlebih dahulu diukur berat sebelum dan setelah diberi adonan tanah dan air. Kemudian adonan tersebut dimasukkan kedalam oven selama satu hari. Setelah di oven kemudian diukur berat cawan dan adonan kering maka langkah selanjutnya adalah menghitung kadar airnya. Gambaran umum dari pengujian batas susut secara umum tertera pada Gambar 3.11



Gambar 3.11 Gambaran umum proses uji batas susut.

Persamaan batas susut adalah sebagai berikut:

$$SL = w - \left[\left(\frac{V - V_0}{W_0} \right) \times 100\% \right] \quad (3.23)$$

Dimana SL adalah batas susut, w adalah kadar air, W_0 adalah berat tanah kering, V adalah volume tanah basah, dan V_0 adalah volume tanah kering. Kadar air dan berat tanah kering telah didapat pada proses menghitung kadar air.

Selanjutnya adalah mencari volume tanah basah dan volume tanah kering. Hal tersebut berguna untuk mengetahui besar perubahan volume yang menyusut. Langkah pertama adalah dengan membersihkan cawan dari tanah kering. Kemudian cawan tersebut diisi dengan air raksa hingga penuh. Ratakan permukaan air raksa pada cawan dengan menggunakan plat yang rata. Letakkan cawan berisi air raksa diatas disk yang telah diukur beratnya. Timbang berat ketiga benda tersebut. Setelah itu letakkan tanah kering yang telah mengeras diatas cawan yang berisi air raksa. Tekan tanah tersebut dengan plat yang terdapat tiga ujung dibawahnya. Tekan hingga tanah kering berada di dasar cawan dan air raksa menutupi bagian atas dari tanah kering. Kemudian timbang berat air raksa yang tumpah dan berada di dalam disk. Dengan kenggunakan hubungan massa jenis, volume tanah basah dapat dihitung seperti pada persamaan dibawah ini.

$$V = \frac{W_r}{\rho_r}$$

(3.24)

$$V_0 = \frac{W_{rk}}{\rho_r}$$

(3.25)

Dimana W_r adalah berat air raksa, W_{rk} adalah berat air raksa yang tumpah kedalam disk, dan ρ_r adalah massa jenis air raksa yaitu 13,6 gram/cm³.

Batas plastis adalah kadar air minimum dimana suatu tanah masih dalam keadaan plastis. Cara pengujian batas plastis adalah dengan menggulung adonan campuran tanah dan air membentuk seperti cacing diatas plat kaca sampai berdiameter 3 mm menjadi retak. Artinya tanah menjadi retak ketika berdiameter 3 mm. Kemudian tanah tersebut dimasukkan kedalam cawan dan diukur berat. Kemudian di oven selama satu hari dan diukur kembali beratnya. Setelah itu dilakukan perhitungan untuk menentukan kadar air. Secara umum proses pengujian batas plastis tertera pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Proses pembentukan adonan tanah membentuk seperti cacing.

8. Uji Untuk Menentukan Kuat Geser Langsung

Parameter hasil dari uji kuat geser langsung digunakan untuk analisis stabilitas lereng. Parameter tersebut adalah sudut geser dan kohesi. Pengujian kuat geser langsung memerlukan tanah yang tidak terganggu yang telah dicetak kedalam ring khusus untuk uji kuat geser dengan menggunakan alat *extruder*. Tanah tersebut kemudian diukur beratnya sebelum dimasukkan kedalam kotak geser dengan melepas ring. Setelah itu, tanah dimasukkan kedalam kotak geser yang terdiri dari dua bagian, yaitu bagian atas dan bagian bawah. Kemudian sampel tanah yang berada dalam kotak geser dijenuhkan dengan air selama satu hari. Batu pori diletakkan di atas dan dibawah sampel tanah agar air dapat bergerak secara bebas. Pada alat uji kuat geser tersebut terdapat gantungan yang nanti akan diberi beban vertikal sebanyak tiga kali dalam waktu yang berbeda. Yang pertama adalah 5 kg, 10 kg, dan 15 kg. Setiap pemberian beban kemudian diberi gaya horizontal pada bagian bawah kotak, sementara bagian atasnya tetap diam. Gaya horizontal diberikan dengan cara memutar tuas pada alat uji kuat geser dengan melihat perpindahan geser harus 0,2 mm setiap 15 detik. Kemudian baca hasil penunjuk dial. Catat hingga pembacaan dial konstan pada suatu nilai. Setelah terdapat nilai yang konstan, maka ulangi langkah tersebut dengan beban vertikal yang berbeda. Dari hasil ketiga percobaan dengan beban yang berbeda kemudian dibuat suatu grafik linier yang pada akhirnya dapat menunjukkan nilai kohesi dan sudut geser berdasarkan persamaan Mohr-Coulomb seperti berikut.

$$t = c + \sigma \tan \phi$$

(3.26)

Dimana t adalah kuat geser, c adalah kohesi tanah, σ adalah tegangan normal, dan ϕ adalah sudut geser.

E. Karakterisasi Besaran Mikrostruktur

Karakterisasi besaran mikrostruktur menghasilkan besaran mikrostruktur seperti derajat anisotropi, nilai eigen, fraktal dan porositas. Namun yang digunakan untuk korelasi dan prediksi dengan besaran geoteknik adalah besaran porositas. Dalam penelitian ini terdapat tiga tahapan dalam mengkarakterisasi struktur mikrostruktur tanah dengan menggunakan alat μ -CT *scan* yaitu tahap *scanning*, tahap rekontruksi, dan tahap analisis.

1. Tahap Scanning

Pada tahap ini, tanah diletakkan kedalam sebuah penampang kemudian diletakkan didalam alat μ -CT *scan*. Sinar X yang merambat lurus ke segala arah kemudian diarahkan agar sinar X menembus sampel dengan energi tertentu. Kemudian ketika sinar X menembus sampel, terdapat sebagian energi yang diserap oleh sampel, sehingga intensitas sinar X tereduksi dan membentuk sebuah gambar bayangan yang tertangkap oleh detektor. Hasil dari tahapan ini adalah berupa rangkaian data gambar 2D (*2D raw image data*) yang merupakan hasil proyeksi sampel dan tersimpan di komputer.

2. Tahap Rekontruksi

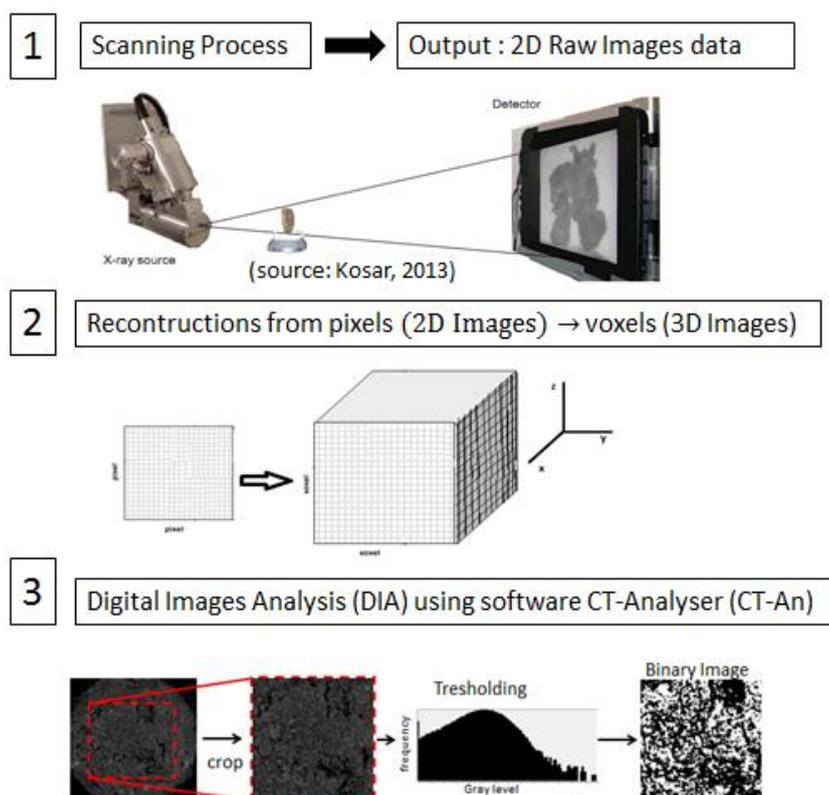
Kemudian dilanjutkan dengan tahap rekontruksi dengan menggunakan *software* NRecon, dimana rangkaian data gambar yang dihasilkan pada proses *scanning* belum berada dalam koordinat ruang kartesian (x,y,z) sehingga perlu dilakukannya rekontruksi gambar dalam hal ini yaitu membuat tumpukan gambar 2D dalam arah z . Sehingga akan diperoleh stuktur pori sampel batuan yang berukuran *voxel*.

3. Tahap Analisis

Pada tahap analisis diperlukan bantuan *software* CTAn (*Computed Tomography Analyser*). Tahapan ini merupakan tahapan terakhir dari μ -CT *scan*, dimana terdapat analisis secara kualitatif dan secara kuantitatif. Analisis secara kualitatif berupa pemaparan struktur pori yang diperoleh dari sampel seperti

ukuran butir yang terlihat lebih besar atau lebih kecil, sebaran pori, dan lain sebagainya.

Sedangkan analisis secara kuantitatif diperlukan metode analisis citra (*image processing*) untuk mengkuantisasi parameter-parameter batuan seperti porositas, derajat anisotropi, dan lain-lain. Berdasarkan gambar hasil tahap rekonstruksi, setelah gambar tersusun dari bilangan biner (0 dan 1) maka parameter seperti porositas, permeabilitas, luas permukaan spesifik dapat dihitung menggunakan bantuan *software* CTAn. Sedangkan untuk visualisasi dapat menggunakan *software* CT Voxel (CTVox). Untuk proses lengkapnya mengenai DIA menggunakan *software* CTAn dan CTVox terdapat pada lampiran 5 dan 6.



Gambar 3.13 Tiga tahapan utama dalam proses analisis mikrostruktur menggunakan CTAn (Firmansyah, dkk, 2015)

F. Korelasi dan Prediksi Besaran Geoteknik Berdasarkan Mikrostruktur

Korelasi dilakukan antara besaran geoteknik dengan besaran mikrostruktur untuk mendapatkan hubungan dari kedua besaran tersebut. Besaran geoteknik yang dipakai untuk korelasi adalah porositas, koefisien rembesan dan berat isi tanah kering. Sedangkan besaran mikrostruktur yang digunakan untuk korelasi

adalah porositas. Lima data dari besaran geoteknik dan besaran mikrostruktur kemudian dibuat grafik linier hingga didapat hubungan antara kedua besaran tersebut. Dalam penelitian Yunlai, dkk (2010) mengatakan bahwa hubungan antara permeabilitas dan porositas adalah kunci dari persamaan konstruktif untuk pemodelan aliran fluida dan dapat menjadi kuantifikasi yang fundamental untuk mempelajari proses geologi.

Dalam memprediksi besaran geoteknik berdasarkan porositas hasil *scan*, digunakan data dari lima lereng yang berpotensi longsor untuk memprediksi besaran geoteknik seperti porositas, sudut geser, berat isi tanah basah, berat isi tanah kering, berat jenis, dan batas cair. Data yang digunakan untuk objek prediksi adalah data hasil penelitian yang dilakukan oleh Firmansyah, dkk (2015).

G. Prediksi *Run-out* dan Volume Bahan Longsoran

1. Analisis Stabilitas Lereng Untuk Prediksi Volume dan Geometri Lereng

Parameter yang dibutuhkan untuk analisis stabilitas lereng adalah kuat geser dan berat isi yang telah didapat dari uji mekanika tanah di laboratorium. Kuat geser adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butiran tanah terhadap desakan dan tarikan (Hardiyatmo, 1994). Kuat geser sebanding dengan tegangan normal yang bekerja pada bidang geser. Kuat geser juga dipengaruhi oleh gaya kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya. Menurut Terzaghi, dkk (1996) kuat geser juga dipengaruhi oleh tegangan efektif sebagai pengaruh tegangan air pori sehingga persamaannya menjadi:

$$t = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (3.27)$$

Dimana : t = kuat geser (kg/cm^2)

c' = kohesi tanah efektif (kg/cm^2)

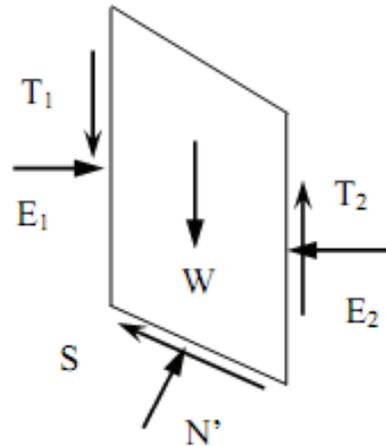
u = tekanan air pori (kg/cm^2)

σ = tagangan norma efektif (kg/cm^2)

ϕ = sudut gesek efektif ($^\circ$)

Setelah didapat parameter kuat geser dan berat isi, kemudian dilanjutkan dengan menganalisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode *Morgenstern-Price Method* (MP-M) yang pertama kali diusulkan oleh Morgenstern & Price (1965). Metode ini berdasarkan pendekatan penjumlahan gaya tangensial dan gaya normal terhadap bagian dasar dari sebuah irisan dan

penjumlahan momen gaya dari sebuah pusat lingkaran terhadap bagian dasar setiap irisan. Hubungan-hubungan antara gaya normal (N) dan gaya antar irisan (E,T) dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Diagram gambar antar irisan menggunakan metode Morgenstern-Price (Krishna, 2006)

dimana w merupakan berat dari sebuah irisan, S merupakan gaya gesekan pada bagian dasar irisan, T merupakan gaya geser antar irisan dalam arah vertikal, E merupakan gaya normal antar irisan dalam arah horizontal, N merupakan total gaya normal yang bekerja pada bagian dasar irisan.

Sehingga ungkapan dari Faktor Keamanan lereng (*factor of safety*, FK) berdasarkan pendekatan gaya (F_f) dan pendekatan momen (F_m) terdapat pada persamaan dibawah ini:

$$F_f = \frac{\sum [\{ c'l + (N - ul) \tan \phi \} \sec \alpha]}{\sum \{ W - (T_2 - T_1) \} \tan \alpha + \sum (E_2 - E_1)} \quad (3.28)$$

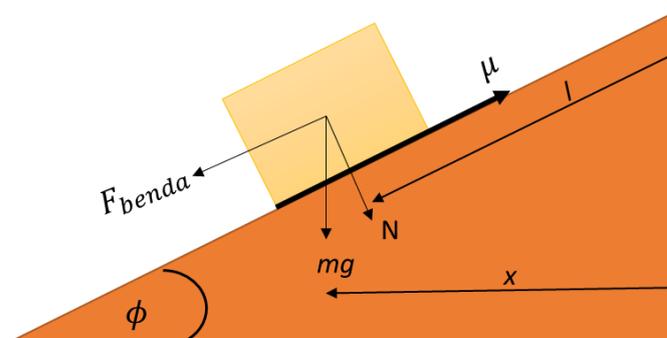
$$F_m = \frac{\sum (c'l + (N - ul) \tan \phi)}{\sum W \sin \alpha} \quad (3.29)$$

Dimana c' adalah kohesi, ϕ adalah sudut geser, α adalah inklinasi dari permukaan bidang geser, dan l adalah lebar irisan secara berurutan. Suatu lereng dikatakan stabil apabila nilai faktor keamanan FK >1, kondisi kritis apabila nilai FK~1 dan telah bergerak ketika FK < 1. Dari analisis stabilitas lereng dengan anggapan lereng dalam keadaan kritis (FK~1), dihasilkan informasi seperti

geometri dan volume massa tidak stabil yang digunakan untuk memprediksi *run-out* pusat massa bahan longsoran.

2. Penerapan Hukum *Coulomb* Sederhana Untuk Prediksi *Run-out*

Untuk memprediksi *run-out* tanah longsor diperlukan informasi volume tanah yang tidak stabil, dan geometri area tersebut. Selanjutnya pergerakan tanah dapat ditentukan menggunakan sebuah pendekatan geometri sederhana dengan menghitung energi potensial awal yang dimiliki oleh massa tanah yang tidak stabil.



Gambar 3.15 Model gesekan *Coulomb* sederhana

Dari Gambar 3.15 koefisien gesek dapat diturunkan berdasarkan hubungan kesetimbangan gaya ketika benda tepat akan bergerak, seperti berikut:

$$F_{benda} = F_{gesek}$$

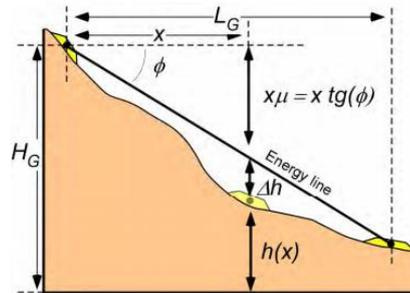
$$mg \sin(\phi) = \mu N$$

$$mg \sin(\phi) = \mu mg \cos(\phi)$$

$$\mu = \tan(\phi) \quad (3.30)$$

Dimana m = massa benda, g = percepatan gravitasi, ϕ = sudut gesek semu, N = gaya normal, dan μ = koefisien gesek.

Jaboyedoff & Labiouse (2011) menggunakan hukum gesekan *Coulomb* untuk memprediksi *run-out* tanah dengan menganggap bahwa massa tanah bergerak hanya dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan gaya gesek bidang gelincir statis seperti ilustrasi yang dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Ilustrasi pergerakan pusat massa tanah (Jaboyedoff, dkk, 2008)

Dimana H_G = tinggi awal pusat massa tanah, x = jarak pusat massa tanah setelah berpindah, $h(x)$ = tinggi pusat massa pada jarak x , L_G = jangkauan maksimum.

Berdasarkan hukum kekekalan energi, posisi awal massa tanah memiliki energi potensial sebesar $E_P = mgH_G$, yang selanjutnya akan diubah menjadi energi kinetik yang hilang akibat gesekan seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 E_{gesek} &= F_{gesek} \cdot l \\
 &= \mu |N| \cdot l \\
 &= \mu mg \cos(\phi) l \rightarrow l = \frac{x}{\cos(\phi)} \\
 &= \mu mg x \\
 E_{gesek} &= mgx \tan(\phi) \tag{3.31}
 \end{aligned}$$

Dengan menganggap pusat massa telah bergerak pada posisi x seperti pada gambar, maka perubahan kecepatan untuk setiap posisi dapat diturunkan berdasarkan hukum kekekalan energi seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 mg(H_G - h(x)) &= \frac{1}{2}mv(x)^2 + mgx \tan(\phi) \\
 v(x)^2 &= 2g(H_G - h(x) - x \tan(\phi)) \text{ misalkan } \Delta h = (H_G - h(x) - x \tan(\phi)) \\
 v(x) &= \sqrt{2g\Delta h} \tag{3.32}
 \end{aligned}$$

Untuk memperoleh jarak jangkauan maksimum (*run-out*), maka $v(x_{maks}) = 0$ pada Persamaan (3),

$$\begin{aligned}
 mg(H_G - h(x_{maks})) &= 0 + mgx_{maks} \tan(\phi) \\
 L_G = x_{maks} &= \frac{(H_G - h(x_{maks}))}{\tan(\phi)} \tag{3.33}
 \end{aligned}$$

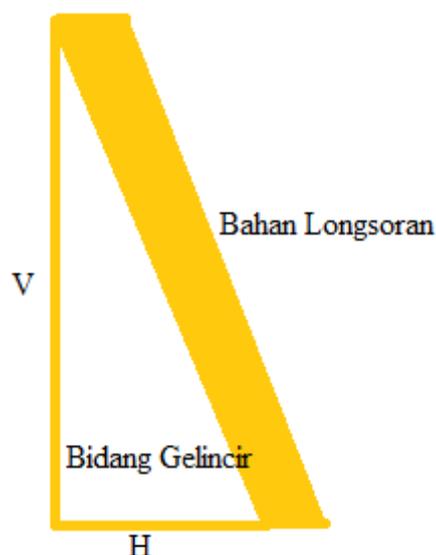
Untuk kondisi dimana tanah telah berada permukaan $h(x_{max}) = 0$ maka persamaan (3.33) dapat disederhanakan menjadi,

$$L = \frac{H}{\tan(\phi)} \quad (3.34)$$

Persamaan (3.34) merupakan persamaan umum untuk memprediksi *run-out* tanah longsor berdasarkan model diskrit dengan pendekatan pusat massa.

H. Pemodelan Upaya Mitigasi Bencana Tanah Longsor Berdasarkan Karakteristik Tanah

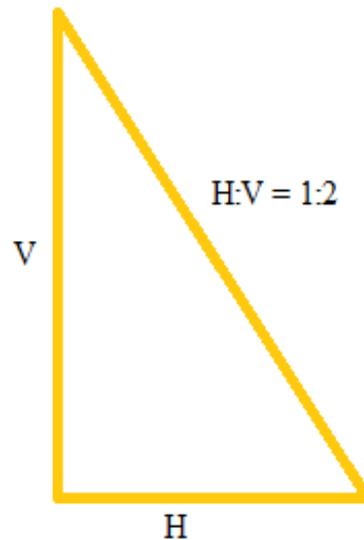
Upaya mitigasi bencana tanah longsor dilakukan dengan menggunakan pemodelan berdasarkan karakteristik tanah. Pada penelitian ini, pengurangan massa tanah dan penambahan dinding beton sebagai penahan lereng dimodelkan untuk mendapatkan lereng yang stabil ($FK > 1,25$). Parameter geoteknik yang digunakan adalah nilai kohesi, sudut geser dan berat isi tanah bidang gelincir dan bahan longsor. Parameter tersebut didapat dari hasil karakterisasi besaran geoteknik. Sedangkan karakteristik dinding beton dimodelkan berdasarkan literatur dengan tebal 25 cm, nilai kohesi 64,68 kPa, nilai sudut geser $34,4^\circ$ dan berat isi 2.400 kN/m^3 .



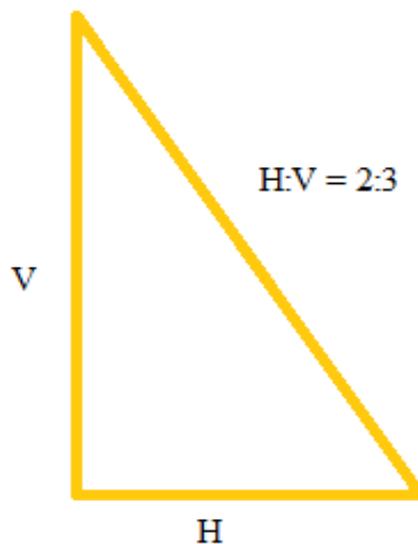
Gambar 3.17 Pemodelan pengurangan massa bahan longsor

Setelah itu, dimodelkan pengurangan massa bahan longsor, pengurangan massa dengan perbandingan $H:V=1:2$, $H:V=2:3$ dan penambahan dinding beton

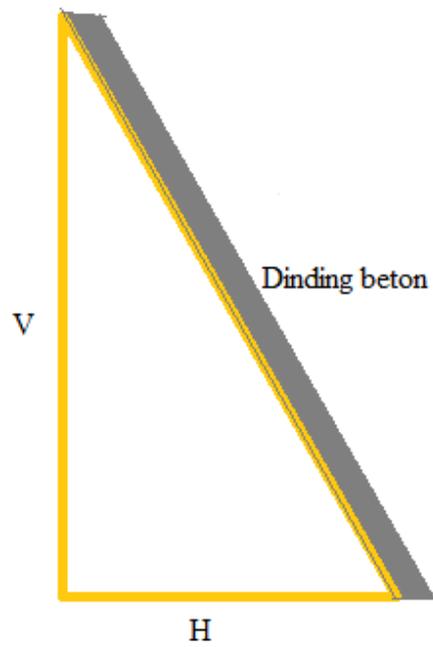
sebagai penahan pada permukaan lereng. Berikut adalah gambaran dari pemodelan untuk mitigasi bencana tanah longsor seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.17 sampai Gambar 3.20.



Gambar 3.18 Pemodelan pengurangan massa dengan perbandingan $H:V = 1:2$.



Gambar 3.19 Pemodelan pengurangan massa dengan perbandingan $H:V = 2:3$.



Gambar 3.20 Pemodelan penambahan dinding beton.

