

BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Pratinjau Hasil Simulasi

Simulasi pengaruh intensitas dan kemiringan lereng terhadap aliran debris pasir merapi dilakukan dengan menggunakan *flume* berukuran p x l x t berturut-turut 3 x 1,5 x 0,15 m sebagai model dari bentuk kemiringan lereng pada Gunung Merapi dan *Artificial Rainfall Aparatus* sebagai alat simulator hujan. Penelitian menggunakan skenario satu intensitas hujan yaitu 25 mm/jam dengan lima variasi kemiringan lereng yaitu 15, 20, 25, 30, dan 35 derajat. Intensitas hujan sebesar 25 mm/jam merupakan hujan kala ulang 5 tahunan yang terjadi pada area lereng Gunung Merapi (Iswardoyo, 2012). Untuk mendapatkan intensitas hujan tersebut, dilakukan dengan cara mengkalibrasi alat *Artificial Rainfall Aparatus* dengan menggunakan sensor hujan dan penakar hujan manual. Hasil kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5. 1 Hasil Kalibrasi Artificial Rainfall Apparatus

Tekanan Pompa (%)	Katup yang Dibuka (SV)	Intensitas (mm/jam)
45	1, 3, 5, 7, 8	25
53	1, 3, 5, 7, 8	35
45	1, 3, 6, 7, 8	55
55	1, 3, 4, 5, 7, 8	65
65	1, 3, 4, 5, 7, 8	75

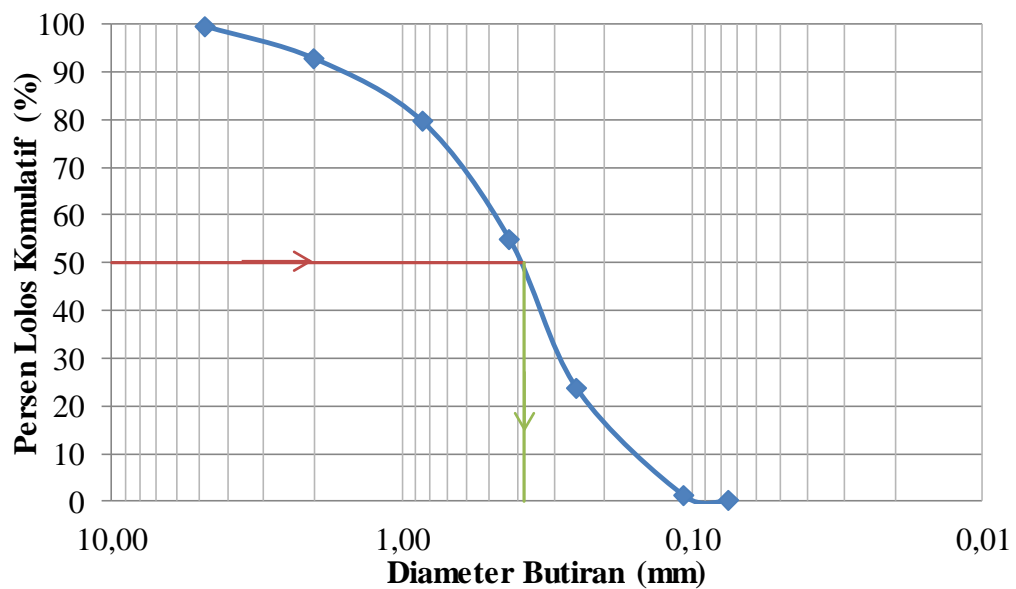
Variasi kemiringan lereng dengan kemiringan 15, 20, 25, 30, dan 35 derajat dipilih sebagai subjek analisis simulasi karena pada kemiringan tersebut merupakan daerah produksi aliran debris dan merupakan beberapa sampel kemiringan yang ada pada hulu sungai Gendol yang berada pada lereng Gunung Merapi. Visualisasi topografi dari daerah yang ditinjau tersebut disajikan dalam bentuk penampang melintang melalui *Google Earth* yang dapat dilihat pada lampiran.

Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan, pasir yang digunakan merupakan pasir dengan ukuran material D_{50} sebesar 0,38 mm dan menurut

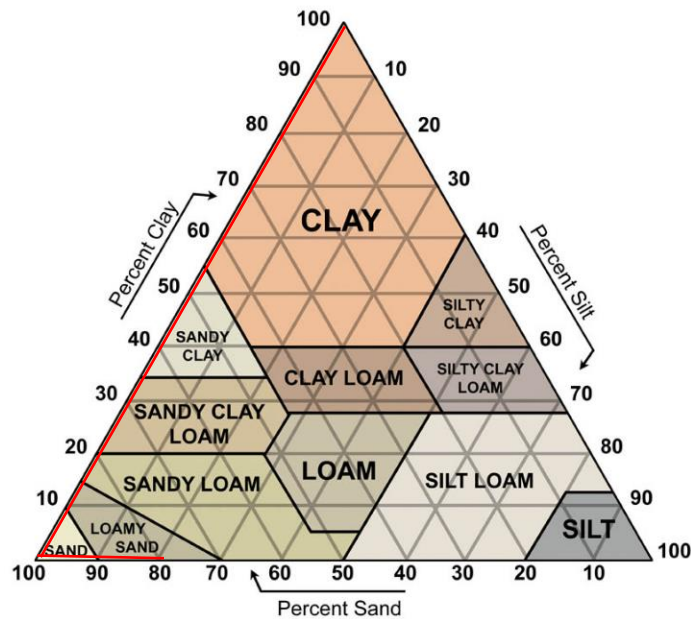
klasifikasi USDA pada Gambar 5.2 termasuk pasir murni karena 79,56% fraksi lolos saringan no.20 dan lolos saringan no.200 kurang dari 0%. Data sedimen pasir dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan Gambar 5.1.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Analisis Saringan

No Saringan	Diameter Bukaan (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Lolos (gr)	Persentase Tertahan (%)	Persentase Lolos (%)
4	4,75	1,43	298,6	0,5	99,52
10	2	20,34	278,3	6,8	92,74
20	0,85	39,5	238,8	13,2	79,58
40	0,425	74,43	164,3	24,8	54,77
60	0,25	93,44	70,9	31,1	23,63
140	0,106	67,82	3,1	22,6	1,03
200	0,075	2,89	0,2	1,0	0,06
pan		0,19	0,0	0,1	0,00
Jumlah		300,0			



Gambar 5. 1 Grafik Grain Size Analysis Rata-Rata



Gambar 5. 2 Klasifikasi Berdasarkan USDA

Penggunaan *flume* yang hanya memiliki panjang tiga meter, maka simulasi hanya dilakukan sampai dengan terjadinya longsor saja, karena longsor menjadi *early warning* terjadinya aliran debris. Pengukuran DEM (*Digital Elevated Model*) juga dilakukan pada setiap selesai simulasi guna mengetahui bentuk longsor yang divisualisasikan dengan menggunakan *software* SURFER.

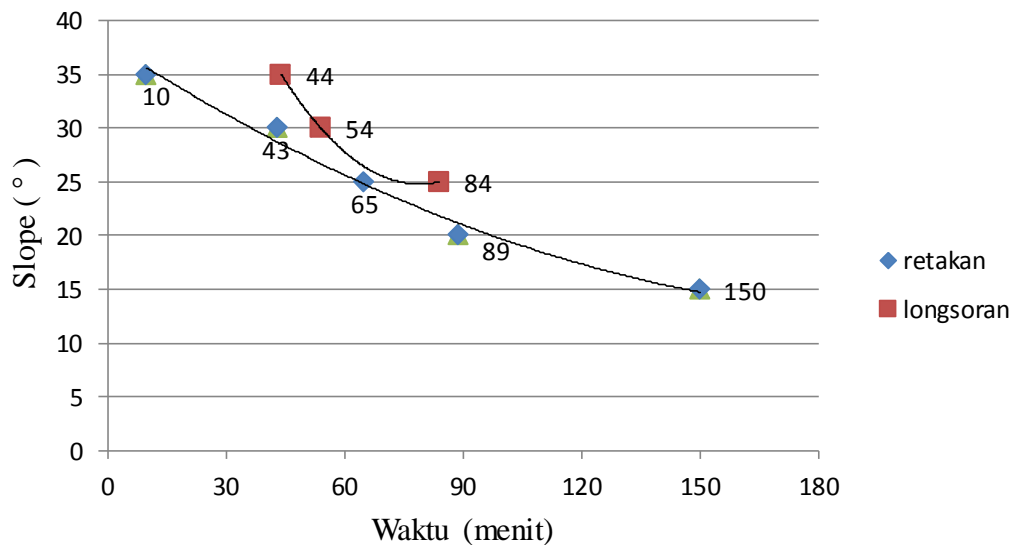
Terdapat dua topik yang akan dibahas pada bab 5, yaitu pola hubungan antara intensitas dan kemiringan lereng, dan analisa *Digital Elevation Model* (DEM). Pada subbab pola hubungan antara intensitas hujan dan kemiringan lereng akan membahas tentang tipe aliran sedimen, dinamika aliran debris, dan konsentrasi sedimen. Analisa DEM yang akan di bahas mengenai bentuk morfologi permukaan sedimen sebelum dan sesudah *running* dan pola retakan sebagai *Early Warning* terjadinya aliran debris.

5.2 Pola Hubungan Antara Intensitas Hujan dan Kemiringan Lereng

Pola hubungan antara intensitas hujan dan kemiringan lereng Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 5.3 dan Gambar 5.3.

Tabel 5. 3 Hasil Simulasi

Intensitas Hujan (mm/jam)	slope (°)	Waktu Pengamatan (menit)	Kejadian	Waktu (menit)
25	15	150	Retakan	150
	20	122	Retakan	89
	25	92	Retakan	65
			Longsor	84
	30	60	Retakan	43
			Longsor	54
	35	50	Retakan	10
			Longsor	44

**Gambar 5. 3 Grafik Hubungan Antara Kemiringan Lereng terhadap Waktu**

Dari grafik tersebut, dapat dicari nilai koefisien korelasi dan persamaan regresi, dengan analisis sebagai berikut.

Tabel 5. 4 Rekapitulasi Data Retakan

No	Waktu (sumbu x)	Slope (sumbu y)	XY	X^2	Y^2
1	150	15	2.250	22.500	225
2	89	20	1.780	7.921	400
3	65	25	1.625	4.225	625
4	43	30	1.290	1.849	900
5	10	35	350	100	1.225
Jumlah	357	125	7.295	36.595	3.375

1. Persamaan Regresi (metode Matriks)

Persamaan normal :

$$\sum y = n \times a + b \sum x \quad (\text{Persamaan 1})$$

$$\sum yx = a \sum x + b \sum x^2 \quad (\text{Persamaan 2})$$

$$125 = 5a + 357b \quad (\text{Persamaan 1})$$

$$7295 = 357a + 36.595b \quad (\text{Persamaan 2})$$

$$\begin{aligned} |A| &= \begin{vmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 5 & 357 \\ 357 & 36.595 \end{vmatrix} \\ &= 55.526 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{\begin{vmatrix} \sum y & \sum x \\ \sum xy & \sum x^2 \end{vmatrix}}{|A|} \\ &= \frac{\begin{vmatrix} 125 & 357 \\ 7.295 & 36.595 \end{vmatrix}}{55.526} \end{aligned}$$

$$= 35,48$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{\begin{vmatrix} n & \sum y \\ \sum x & \sum yx \end{vmatrix}}{|A|} \\ &= \frac{\begin{vmatrix} 5 & 125 \\ 357 & 7.295 \end{vmatrix}}{55526} \end{aligned}$$

$$= -0,1468$$

$$y = a + bx$$

$$y = 35,48 - 0,1468x$$

2. Koefisien Korelasi (metode *Pearson*)

$$\begin{aligned} r &= \frac{n \cdot \sum XY - (\sum X \cdot \sum Y)}{\sqrt{\{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2\} \cdot \{n \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \\ &= \frac{5 \times 7.295 - (357 \times 125)}{\sqrt{\{5 \times 36.595 - (357)^2\} \times \{5 \times 3.375 - (125)^2\}}} \\ &= -0,9783 \end{aligned}$$

$$r^2 = 0,9570$$

Koefisien korelasi antara *slope* dan waktu kejadian retakan sebesar - 0,9783. Berdasarkan Tabel 3.3 nilai tersebut masuk kedalam korelasi yang sangat

kuat antara X dan Y, dan merupakan jenis korelasi negatif. Karena $r^2 = 0,9570$ maka dapat dikatakan bahwa 95,7% nilai Y dapat dijelaskan oleh hubungan linearnya dengan nilai X. Model regresi linear sederhana yang diperoleh adalah $y = 35,48 - 0,1468x$. Untuk data longsor dapat dilihat pada Tabel 5.5

Tabel 5. 5 Rekapitulasi Data Longsor

No	Waktu (sumbu x)	Slope (sumbu y)	XY	X^2	Y^2
1	84	25	2.100	7.056	625
2	54	30	1.620	2.916	900
3	44	35	1.540	1.936	1.225
Jumlah	182	90	5.260	11.908	2.750

1. Persamaan Regresi (metode Matriks)

Persamaan normal :

$$\sum y = n \times a + b \sum x \quad (\text{Persamaan 1})$$

$$\sum yx = a \sum x + b \sum x^2 \quad (\text{Persamaan 2})$$

$$90 = 3a + 182b \quad (\text{Persamaan 1})$$

$$5.260 = 182a + 11.908b \quad (\text{Persamaan 2})$$

$$\begin{aligned} |A| &= \begin{vmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 3 & 182 \\ 182 & 11.908 \end{vmatrix} \\ &= 2.600 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{\begin{vmatrix} \sum y & \sum x \\ \sum yx & \sum x^2 \end{vmatrix}}{|A|} \\ &= \frac{\begin{vmatrix} 90 & 182 \\ 5.260 & 11.908 \end{vmatrix}}{2.600} \\ &= 44 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{\begin{vmatrix} n & \sum y \\ \sum x & \sum yx \end{vmatrix}}{|A|} \\ &= \frac{\begin{vmatrix} 3 & 90 \\ 182 & 5.260 \end{vmatrix}}{55.526} \end{aligned}$$

$$= -0,2308$$

$$y = a + bx$$

$$y = 44 - 0,2308x$$

2. Koefisien Korelasi (metode *Pearson*)

$$\begin{aligned} r &= \frac{n \cdot \sum XY - (\sum X \cdot \sum Y)}{\sqrt{\{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2\} \cdot \{n \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \\ &= \frac{3 \times 5260 - (182 \times 90)}{\sqrt{\{3 \times 11908 - (182)^2\} \cdot \{3 \times 2750 - (90)^2\}}} \\ &= -0,9608 \end{aligned}$$

$$r^2 = 0,9231$$

Koefisien korelasi antara *slope* dan waktu kejadian longsor sebesar - 0,9608 Berdasarkan Tabel 3.3 nilai tersebut masuk kedalam korelasi yang sangat kuat antara X dan Y, dan merupakan jenis korelasi negatif. Karena $r^2 = 0,9231$ maka dapat dikatakan bahwa 92,3% nilai Y dapat dijelaskan oleh hubungan linearnya dengan nilai X. Model regresi linear sederhana yang diperoleh adalah $y = 35,48 - 0,1468x$.

5.2.1 Tipe Aliran Sedimen

Analisis tipe aliran sedimen dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan (3.1) untuk aliran debris, persamaan (3.2) untuk aliran hiperkonsentrasi dan persamaan (3.4) untuk aliran sedimen transport.

$$\text{Persamaan (3.1):} \quad \tan \theta_d = \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{1}{K}\right)} \tan \phi$$

$$\text{Persamaan (3.2):} \quad \tan \theta_h \geq \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h_0}{d}\right)} \tan \phi$$

Dengan: θ : Kemiringan sungai arus deras ($^\circ$)

C_* : Konsentrasi sedimen pada dasar sungai arus

Deras (0,6)

σ : Berat jenis pasir (ton/m^3)

ρ : Berat jenis air yang mengalir (ton/m^3)

ϕ : Sudut geser dalam lapisan sedimen

h_0 : Kedalaman air (m)

d : Diameter butiran (m)

K : Konstanta *experiment* Takahashi besarnya 0,85 – 1

Berikut adalah analisis perhitungan sudut kritik aliran untuk menentukan tipe aliran sedimen pada pasir sungai gendol dengan intensitas hujan 25 mm/jam :

$$\sigma = 2,6 \text{ ton}/m^3 \text{ (Rahmat, 2008), (Haryono, 2012), (Takahashi, 1991)}$$

$$\rho = 1 \text{ ton}/m^3$$

$$\tan \phi = 0,7 \text{ (Rahmat, 2008)}$$

$$h_0 = 0$$

$$d = 0,00038 \text{ m}$$

$$D = 0,15 \text{ m}$$

Penyelesaian :

$$1. \quad \tan \theta_d = \frac{0,6 \times (2,6-1)}{0,6 \times (2,6-1) + 1 \times \left(1 + \frac{1}{0,85}\right)} \times 0,7$$

$$= 0,214$$

$$\theta_d = 12,1^\circ$$

$$2. \quad \tan \theta_h = \frac{0,6 \times (2,6-1)}{0,6 \times (2,6-1) + 1 \times \left(1 + \frac{0}{0,00038}\right)} \times 0,7$$

$$= 0,343$$

$$\theta_h = 18,9^\circ$$

$$3. \quad \tau_c = (\sigma - \rho) \times g \times d_m \times 0,05$$

$$= (2,6 - 1) \times 9,81 \times 0,00038 \times 0,05$$

$$= 0,000298 \text{ ton}/m^2$$

$$\text{Asumsi } \tau_c = \tau_0$$

$$\tau_0 = \rho \times g \times R \times \sin \theta$$

$$= 1 \times 9,81 \times 0,125 \times \sin \theta$$

$$0,000298 = 1,226 \sin \theta$$

$$\sin \theta = 2,431 \times 10^{-4}$$

$$\theta = 0,0139^\circ$$

Rekapitulasi mengenai tipe aliran sedimen dapat dilihat pada Tabel 5.7.

5.2.2 Dinamika Aliran Debris

Dinamika aliran debris dipengaruhi oleh tegangan geser yang terjadi pada sedimen debris. Jika tegangan geser (τ) sama dengan perlawanan geser (τ_1) maka

sedimen akan dalam keadaan diam atau seimbang, dan jika tegangan geser (τ) lebih besar dari perlawanan geser (τ_1), maka sedimen debris akan bergerak. Selain menggunakan analisis secara teoritis, analisis juga menggunakan hasil pengujian di laboratorium atau secara nyata.

1. Analisis Konsentrasi Aliran Debris Teoritis

Analisis dinamika aliran debris secara teoritis dapat diselesaikan dengan (persamaan 3.3) sebagai berikut.

$$\text{Nilai } \theta \leq 20^\circ, \text{ maka } C_d = \frac{\rho_w \cdot \tan \theta}{(\rho_s - \rho_w)(\tan \phi - \tan \theta)}$$

Kemiringan $> 20^\circ$ dapat diselesaikan dengan (persamaan 3.4).

$$\text{Untuk nilai } \theta > 20^\circ, \text{ maka } C_d = 0,9 C_*$$

Namun jika nilai C_d yang didapat $>$ dari $0,9C_*$ maka nilai yang dipakai adalah nilai dari $0,9C_*$.

Dengan :

- C_d : Konsentrasi aliran debris
- θ : Kemiringan sungai arus deras ($^\circ$)
- ρ_s : Berat jenis sedimen (ton/m^3)
- ρ_w : Berat jenis air (ton/m^3)
- ϕ : Sudut geser dalam lapisan sedimen ($^\circ$)
- C_* : Konsentrasi sedimen pada dasar sungai arus deras (0,6)

a. Kemiringan 15°

$$C_d = \frac{1 \times 0,268}{(2,6 - 1)(0,7 - 0,268)}$$

$$= 0,388$$

$$\tau = g \cdot \sin \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) + (\rho_w \cdot (D + h_0)))$$

$$= 9,81 \times \sin 15^\circ \times ((0,388 \times (2,6 - 1) \times 0,15) + (1 \times (0,15 + 0)))$$

$$= 0,6171 \text{ ton}/\text{m}^2$$

$$\tau_1 = g \cdot \cos \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) \cdot \tan \phi)$$

$$= 9,81 \times \cos 15^\circ \times ((0,388 \times (2,6 - 1) \times 0,15) \times 0,7)$$

$$= 0,6172 \text{ ton}/\text{m}^2$$

b. Kemiringan 20°

$$C_d = \frac{1 \times 0.364}{(2,6 - 1)(0,7 - 0,364)}$$

$$= 0,677 > 0,9 C_*$$

$$C_d = 0,54$$

$$\tau = g \cdot \sin \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) + (\rho_w \cdot (D + h_0)))$$

$$= 9,81 \times \sin 20^\circ \times ((0,54 \times (2,6 - 1) \times 0,15) + (1 \times (0,15 + 0)))$$

$$= 0,938 \text{ ton/m}^2$$

$$\tau_1 = g \cdot \cos \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) \cdot \tan \phi)$$

$$= 9,81 \times \cos 20^\circ \times ((0,54 \times (2,6 - 1) \times 0,15) \times 0,7)$$

$$= 0,836 \text{ ton/m}^2$$

c. Kemiringan 25°

$$C_d = 0,9 \times 0,6$$

$$= 0,54$$

$$\tau = g \cdot \sin \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) + (\rho_w \cdot (D + h_0)))$$

$$= 9,81 \times \sin 25^\circ \times ((0,54 \times (2,6 - 1) \times 0,15) + (1 \times (0,15 + 0)))$$

$$= 1,159 \text{ ton/m}^2$$

$$\tau_1 = g \cdot \cos \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) \cdot \tan \phi)$$

$$= 9,81 \times \cos 25^\circ \times ((0,54 \times (2,6 - 1) \times 0,15) \times 0,7)$$

$$= 0,807 \text{ ton/m}^2$$

d. Kemiringan 30°

$$\tau = g \cdot \sin \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) + (\rho_w \cdot (D + h_0)))$$

$$= 9,81 \times \sin 30^\circ \times ((0,54 \times (2,6 - 1) \times 0,15) + (1 \times (0,15 + 0)))$$

$$= 1,371 \text{ ton/m}^2$$

$$\tau_1 = g \cdot \cos \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) \cdot \tan \phi)$$

$$= 9,81 \times \cos 30^\circ \times ((0,54 \times (2,6 - 1) \times 0,15) \times 0,7)$$

$$= 0,771 \text{ ton/m}^2$$

$$= 9,81 \times \sin 25^\circ \times ((0,86 \times (2,6-1) \times 0,15) + (1 \times (0,15+0)))$$

$$= 1,476 \text{ ton/m}^2$$

$$\tau_1 = g \cdot \cos \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) \cdot \tan \phi)$$

$$= 9,81 \times \cos 25^\circ \times ((0,86 \times (2,6-1) \times 0,15) \times 0,7)$$

$$= 1,285 \text{ ton/m}^2$$

b. Kemiringan 30°

Waktu pengujian = 60 menit

Waktu longsor = 54 menit

Lama aliran = 6 menit

Volume sedimen = 86.400 cm^3

Volume aliran air = $\left(\frac{2,5 \times 150 \times 300}{60}\right) \times 6$

$$= 11.250 \text{ cm}^3$$

Total Volume = $86.400 + 11.250$

$$= 97.650 \text{ cm}^3$$

Cd = $\frac{86.400}{97.650}$

$$= 0,885$$

$$\tau = g \cdot \sin \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) + (\rho_w \cdot (D + h_0)))$$

$$= 9,81 \times \sin 30^\circ \times ((0,885 \times (2,6-1) \times 0,15) + (1 \times (0,15+0)))$$

$$= 1,777 \text{ ton/m}^2$$

$$\tau_1 = g \cdot \cos \theta ((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) \cdot \tan \phi)$$

$$= 9,81 \times \cos 30^\circ \times ((0,885 \times (2,6-1) \times 0,15) \times 0,7)$$

$$= 1,263 \text{ ton/m}^2$$

c. Kemiringan 35°

Waktu pengujian = 50 menit

Waktu longsor = 44 menit

Lama aliran = 6 menit

Volume sedimen = 102.600 cm^3

$$\text{Volume aliran air} = \left(\frac{2,5 \times 150 \times 300}{60} \right) \times 6$$

$$= 11.250 \text{ cm}^3$$

$$\text{Total Volume} = 102.600 + 11.250$$

$$= 113.850 \text{ cm}^3$$

$$C_d = \frac{102.600}{113.850}$$

$$= 0,901$$

$$\begin{aligned} \tau &= g \cdot \sin \theta \left((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) + (\rho_w \cdot (D + h_0)) \right) \\ &= 9,81 \times \sin 35^\circ \times ((0,901 \times (2,6-1) \times 0,15) + (1 \times (0,15+0))) \\ &= 2,061 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= g \cdot \cos \theta \left((C_d \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D) \right) \cdot \tan \phi \\ &= 9,81 \times \cos 35^\circ \times ((0,901 \times (2,6-1) \times 0,15) \times 0,7) \\ &= 1,217 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

5.2.3 Digital Elevation Model (DEM)

Pada setiap pengujian dilakukan pengukuran *Digital Elevation Model* (DEM) guna mengetahui bentuk permukaan sedimentasi setelah dilakukan penelitian. Data DEM yang diambil berupa data koordinat titik titik permukaan sedimentasi lalu divisualisasikan dengan menggunakan *software* SURFER. Berikut adalah hasil analisis DEM.

1. Kemiringan 15°

Pada kemiringan 15° didapat data koordinat DEM yang dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut.

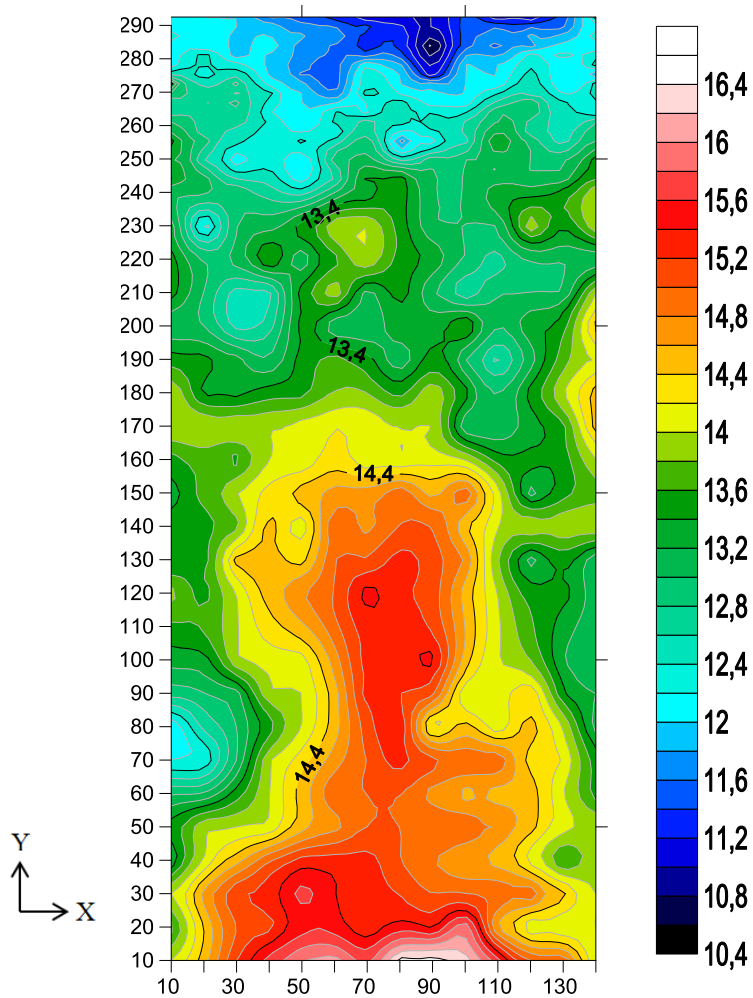
Tabel 5. 6 Data Koordinat DEM pada Kemiringan 15°

X,Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
Y1	14	14,5	15,2	15,7	16	16,1	15,7	16,5	16,5	16,3	15,7	15	15	14
Y2	13,5	14,4	15	15,1	15,5	15,5	15,2	15,5	15,3	16	14,5	14	14	14
Y3	14	14,7	15,2	15,3	15,7	15,4	15,3	15,2	15	15	15	15	14,5	14
Y4	13,2	14	14,5	15	15,3	15,3	15,3	15	14,8	14,6	14,5	14,1	13,5	13,9
Y5	13,5	14	14	14	14,5	14,7	15	15	15	15	14,8	14,5	14,1	14
Y6	13	13	13,5	14	14,5	15	15	15	14,7	14,5	14,5	14,5	14	13,5
Y7	12,2	12,2	13	14	14,3	14,7	15	15,3	15,1	15	15	14,3	14,2	13,5
Y8	12	12,7	13	13,5	14	14,5	15,1	15,4	14	14,5	14	14,5	14	13,1
Y9	12,9	13	13,1	14	14	14,5	15,3	15,2	15,1	14	14,1	14,4	13,4	13,2
Y10	13,3	13,3	14	14,1	14,1	14,7	15,3	15,2	15,5	14,5	14	13,8	13,2	13
Y11	13,9	13,5	14	14,5	14,8	15	15,5	15,2	15,1	14,5	14	13,5	13,5	13,1
Y12	13,4	13,5	14,5	14,5	14,3	15	15	15,3	15,1	14,8	13,8	13,1	13,5	13
Y13	13,5	13,5	13,7	14,5	14	15	14,7	15	15	14,4	14	14	14	14
Y14	13,3	13,7	14	14,3	14,5	14,7	14,7	15	14,5	15	14,1	13,1	13,5	13,7
Y15	13,5	13,7	13,5	14	14	14,3	14	14	14,1	14	13,5	13,5	13,5	14
Y16	14	14	14	14	14,1	14,2	14,2	14	14	13	13	13,3	13,5	14,5
Y17	14	13,3	13,3	13,5	13,5	13,8	13,8	13,5	14	13,5	13	13,5	14	14,5
Y18	13,5	13,5	13,3	13	13,5	13,7	13,5	13	13,5	13	12,5	13,1	13,7	14
Y19	13	13	12,5	12,7	13,5	13	13	13,4	13,3	13,7	13	13,4	13,5	14,5
Y20	13,5	13	12,5	12,5	13,5	14	13,1	13,5	13	12,6	13	13	13	14
Y21	13,5	13	13,1	13,7	13	13,5	14	13,5	13,4	13	12,7	13	13	13
Y22	13,3	12	13	13,1	13,5	14	14	13,5	13	13	13	14	13,4	14

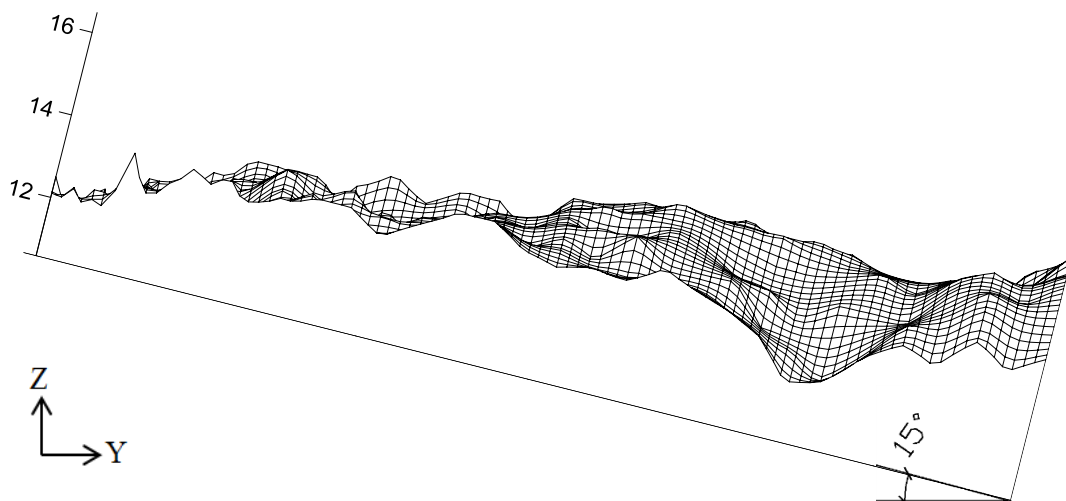
Lanjutan Tabel 5.6 Data Koordinat DEM pada Kemiringan 15°

Y23	13	13,1	13	12,7	12,5	13	13,2	13,5	13	13	13,4	13,3	13,5	14
Y24	13,5	13,1	12,5	12,5	12	12,5	13,5	13,5	13	13	13	13	13	13,5
Y25	13,2	12,5	12	12,3	12	13	13	12,5	13	13	13	13	13	13,5
Y26	13,5	13	12,5	12,3	12,5	12,5	13	11,6	12	12,5	13,5	13	12,5	13
Y27	13	12,5	12,5	12,3	12	12	12,5	12,5	12,6	12,7	13	12,5	12,5	13
Y28	13	13	13	12,5	12	13	13	12,5	12,5	12,5	13	13	12,5	12,5
Y29	12,5	12,5	12,5	12	12	12	11,5	12,5	12,3	12,3	13	13	12,4	12
Y30	12,7	13	13	12,5	12	12	12,5	12,5	12	12	12,5	13	12,5	12,5
Y31	13	12,5	12,5	12,5	12	11,5	12,5	12,1	12,1	12	12,4	12,4	12,1	12,5
Y32	13,5	12,7	12,9	12,1	11,9	11,5	12,3	12	12	12	12	12,5	12	12,5
Y33	12,6	12,1	12,5	11,9	11,5	11,5	12,3	12	11	12	12	12,5	12	11,7
Y34	12,1	12,5	12,5	12,1	11,8	11,5	12,5	12	11	12	12	12,3	12	12,5
Y35	12,1	12,4	11,8	11,7	11,5	11,6	11,5	11,5	10,9	12	12	12,5	12,1	12,5
Y36	12,3	12,6	12	12,3	12	11,6	11,5	11,5	10,6	11,5	11,5	12	12,5	12,1
Y37	11,9	11,5	11,9	12	11,5	11,5	11	11,2	10,5	11,5	11,5	11,5	11,7	12
Y38	12,5	12,5	12	12	12	12	11,5	11,5	11	11,5	12	12	12	12,5
Y39	12	12	12	12	11,6	11,5	11,5	11,2	11	11,5	11,5	11,5	11,4	12
Y40	12,1	12	12	11,5	11,5	11,3	11	11	11	11,5	11	11	11,5	12,5

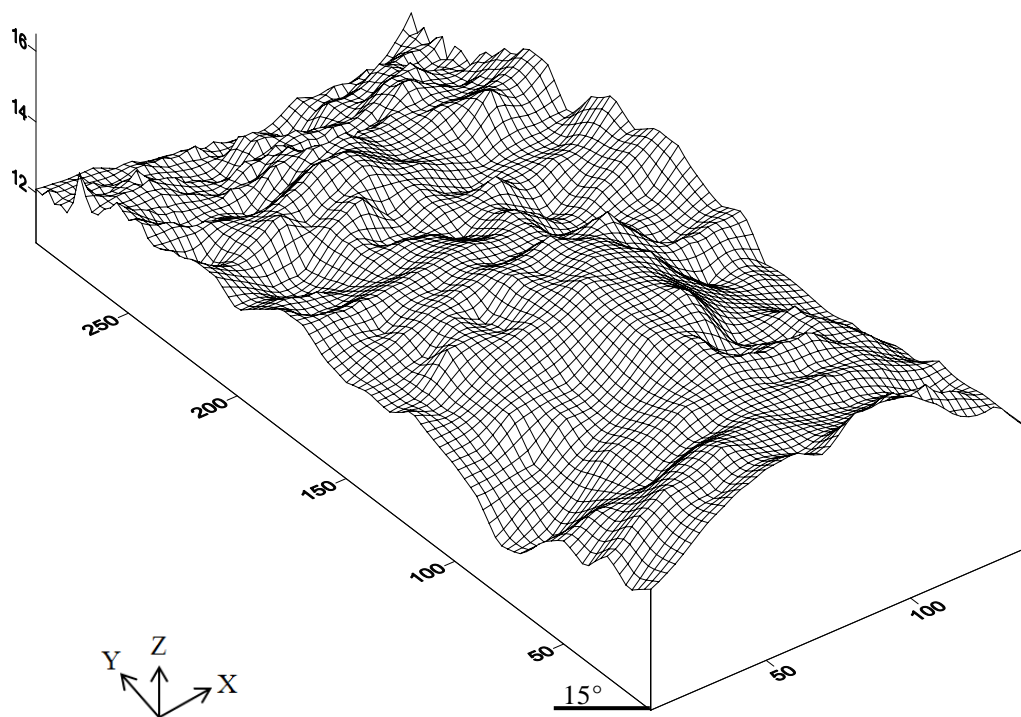
Dari data koordinat tersebut lalu diolah dengan menggunakan surfer dan menghasilkan data kontur, tampak dua dimensi, dan tampak tiga dimensi seperti pada Gambar 5.4, hingga Gambar 5.7. Satuan yang digunakan pada sumbu x, y dan data ketinggian adalah centimeter (cm).



Gambar 5. 4 Kontur Permukaan Sedimen Setelah Pengujian pada Kemiringan 15°



Gambar 5. 5 Tampak Dua Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian pada Kemiringan 15°



Gambar 5. 6 Tampak tiga Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian pada Kemiringan 15°

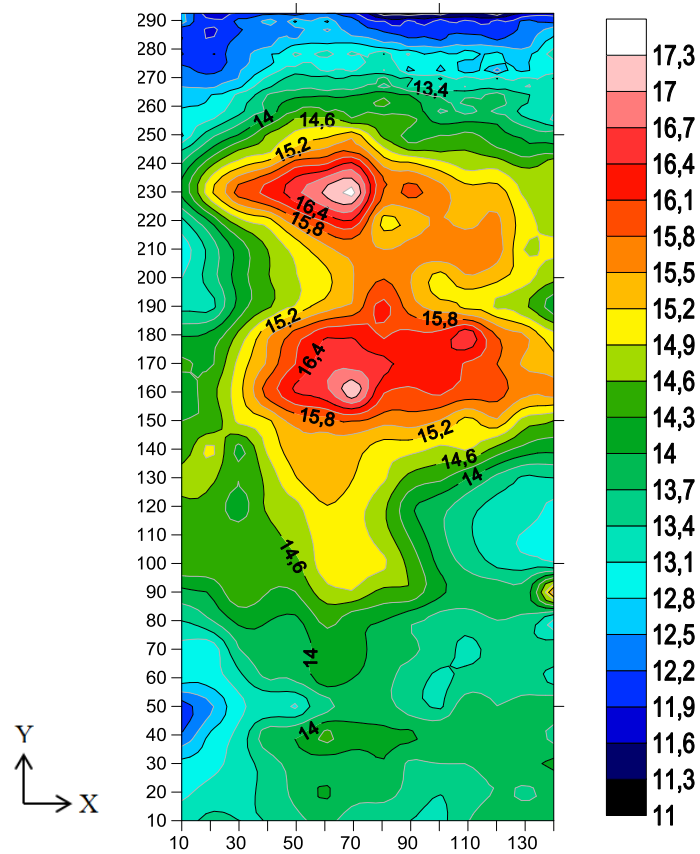


Gambar 5. 7 Kondisi Sedimen Pada Kemiringan 15° Setelah Running pada Kemiringan 15°

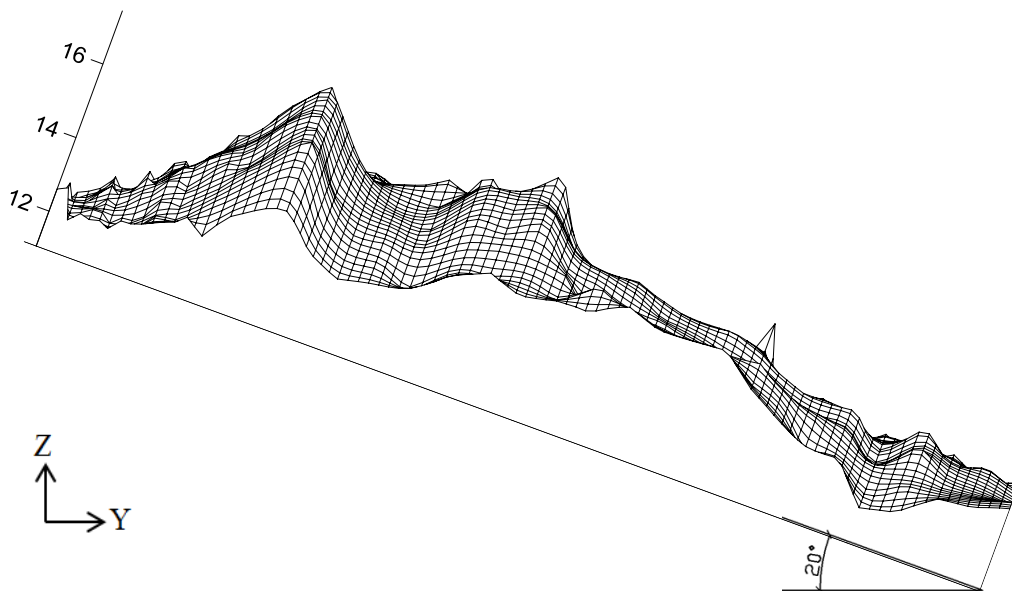
2. Kemiringan 20°

Pada kemiringan 20° didapat data koordinat DEM yang dapat dilihat pada halaman lampiran.

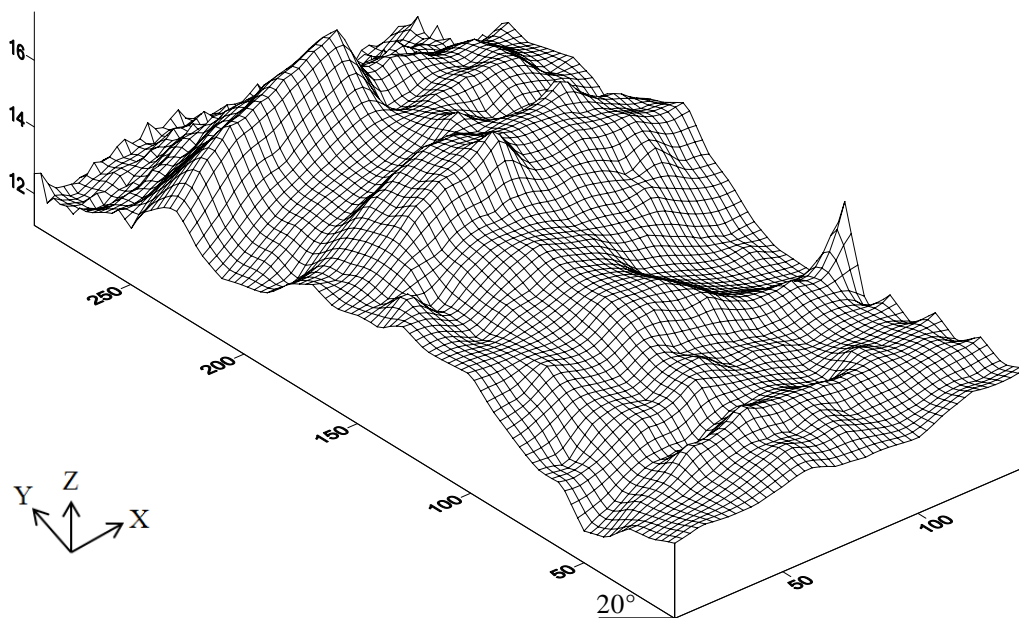
Dari data koordinat tersebut lalu diolah dengan menggunakan surfer dan menghasilkan data kontur, tampak dua dimensi, dan tampak tiga dimensi seperti pada Gambar 5.8 hingga Gambar 5.11. Satuan yang digunakan pada sumbu x, y dan data ketinggian adalah centimeter (cm).



Gambar 5. 8 Kontur Permukaan Sedimen Setelah Pengujian pada Kemiringan 20°



Gambar 5.9 Tampak Dua Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian pada Kemiringan 20°



Gambar 5.10 Tampak Tiga Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian pada Kemiringan 20°

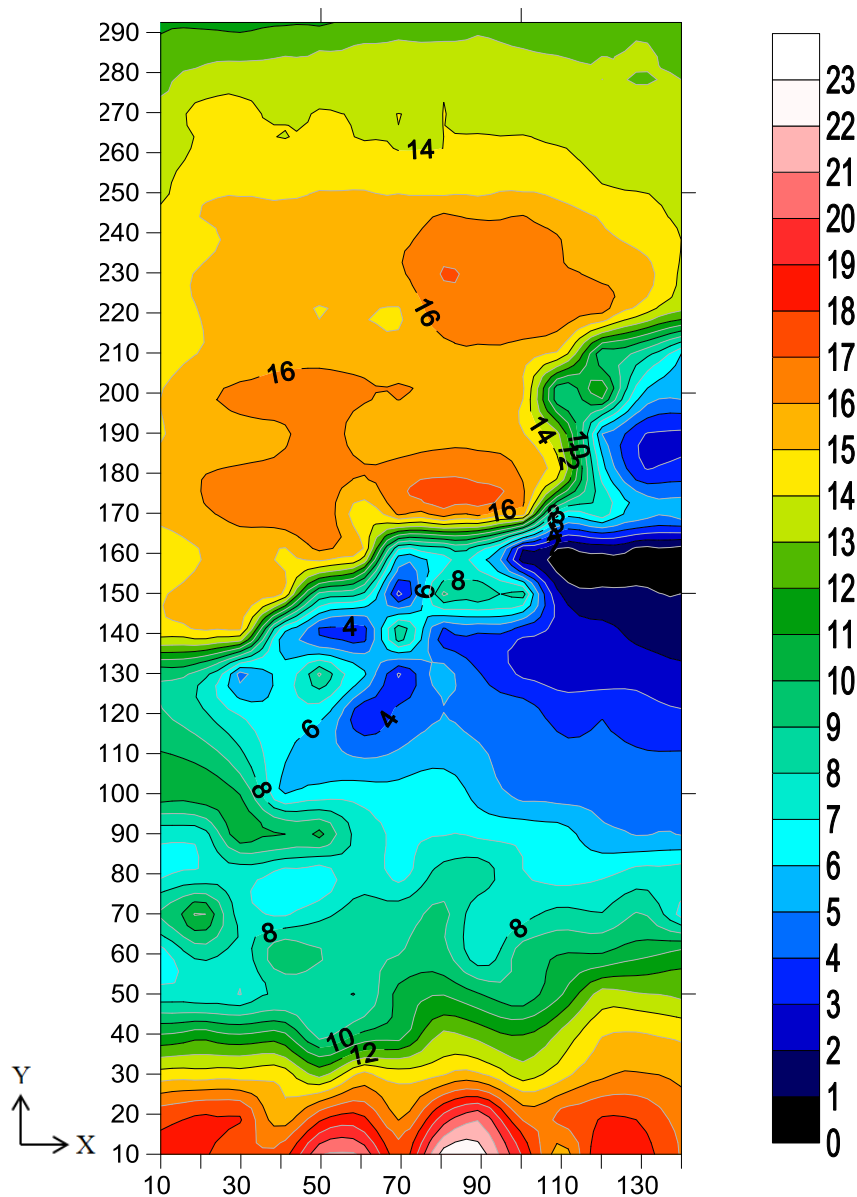


Gambar 5. 11 Kondisi Sedimen Pada Kemiringan 20° Setelah Running pada Kemiringan 20°

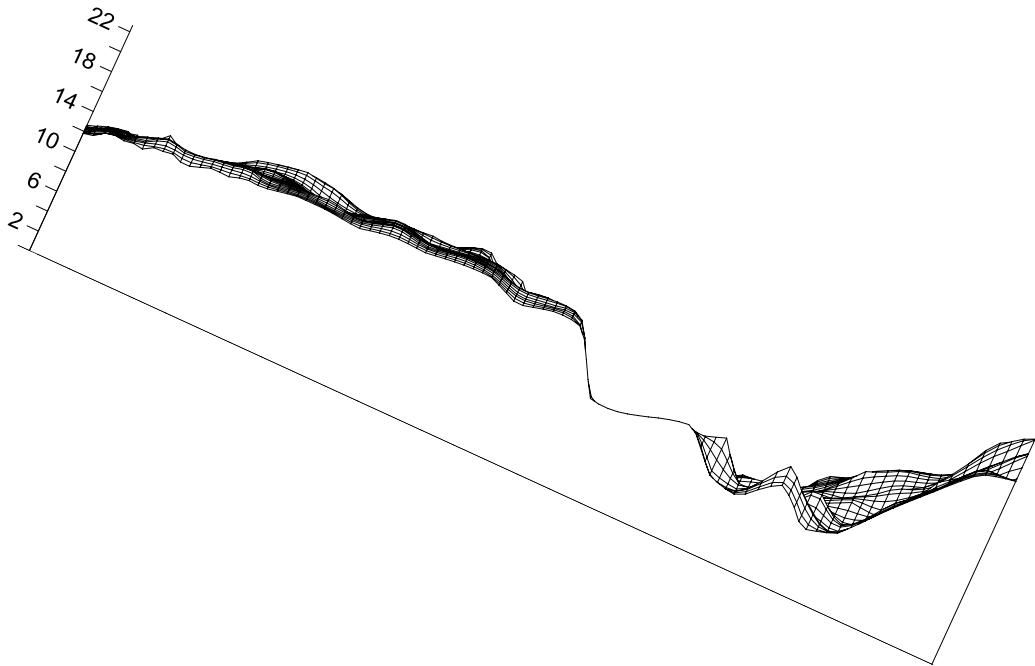
3. Kemiringan 25°

Pada kemiringan 25° didapat data koordinat DEM yang dapat dilihat pada halaman lampiran.

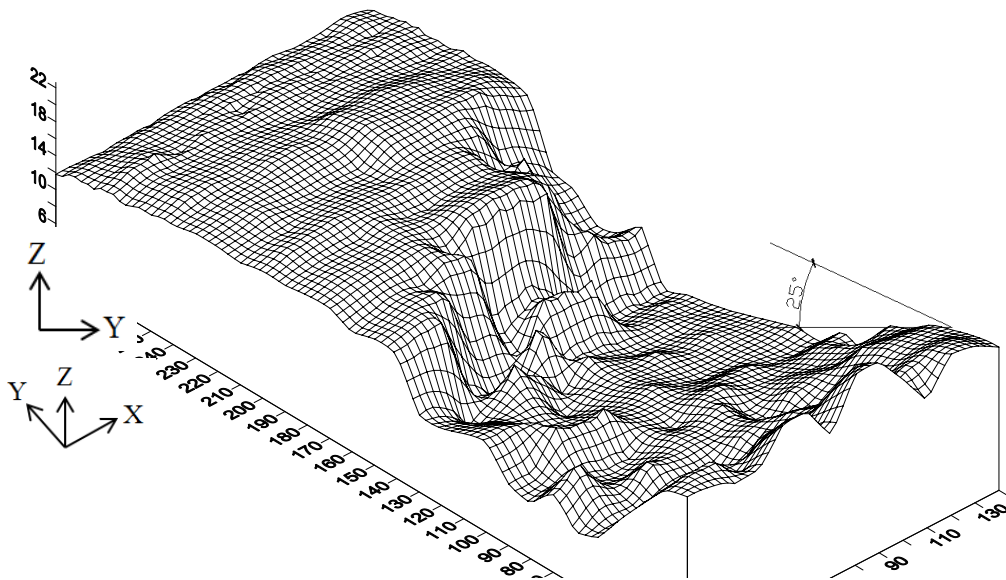
Dari data koordinat tersebut lalu diolah dengan menggunakan surfer dan menghasilkan data kontur, tampak dua dimensi, dan tampak tiga dimensi seperti pada Gambar 5.12 hingga Gambar 5.15. Satuan yang digunakan pada sumbu x, y dan data ketinggian adalah centimeter (cm).



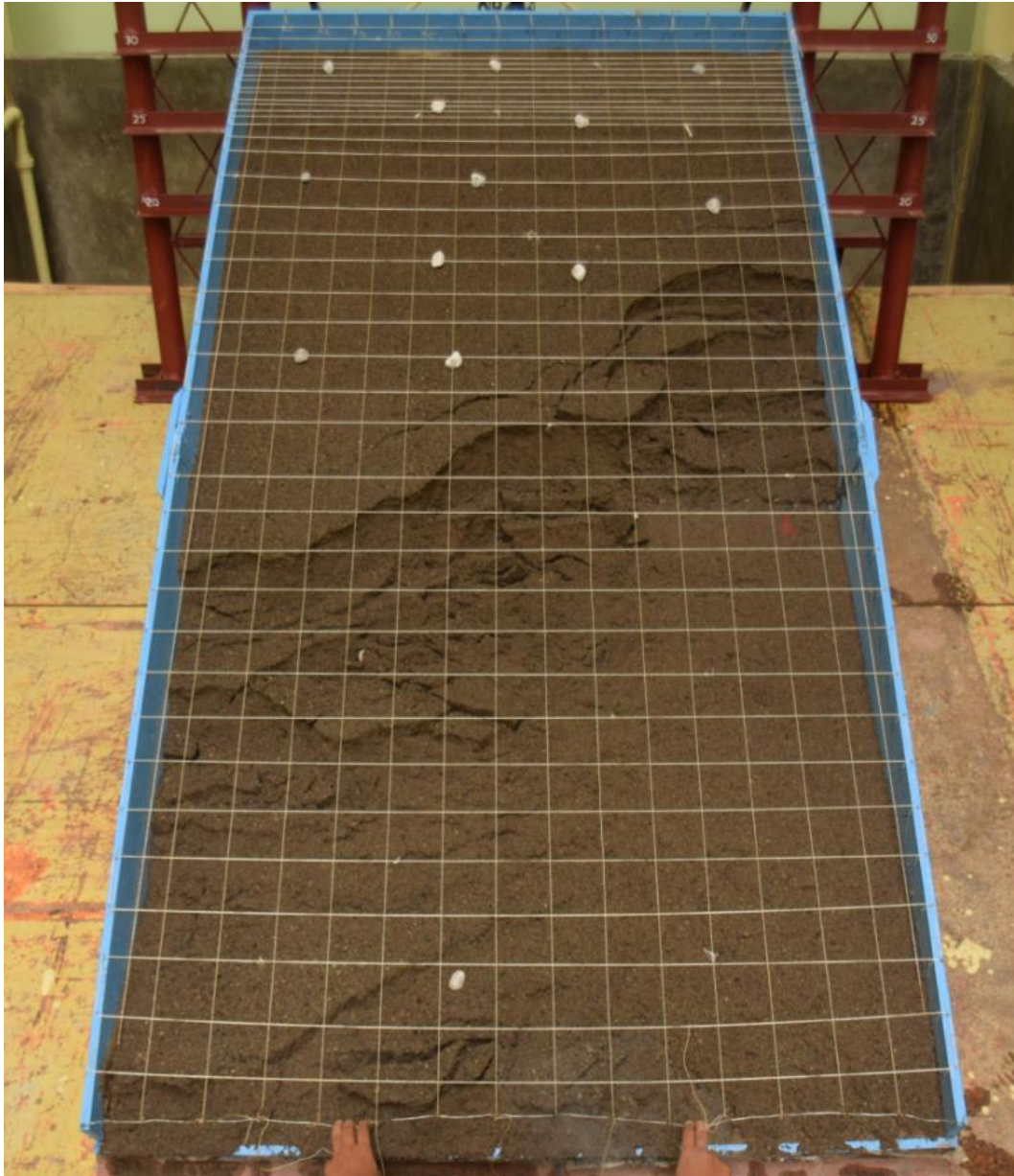
Gambar 5. 12 Kontur Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Pada Kemiringan 25°



Gambar 5. 13 Tampak Dua Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian



Gambar 5. 14 Tampak Tiga Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Kemiringan 25°

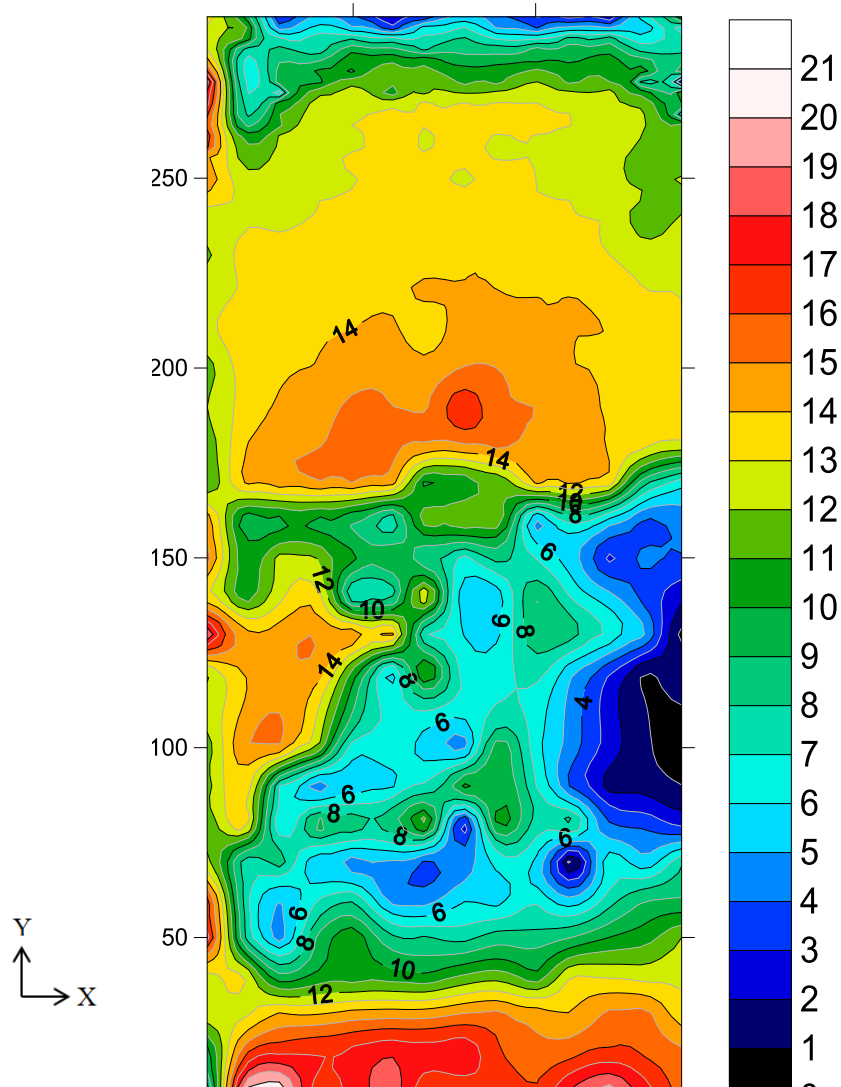


Gambar 5. 15 Kondisi Sedimen Pada Kemiringan 25° Setelah Running

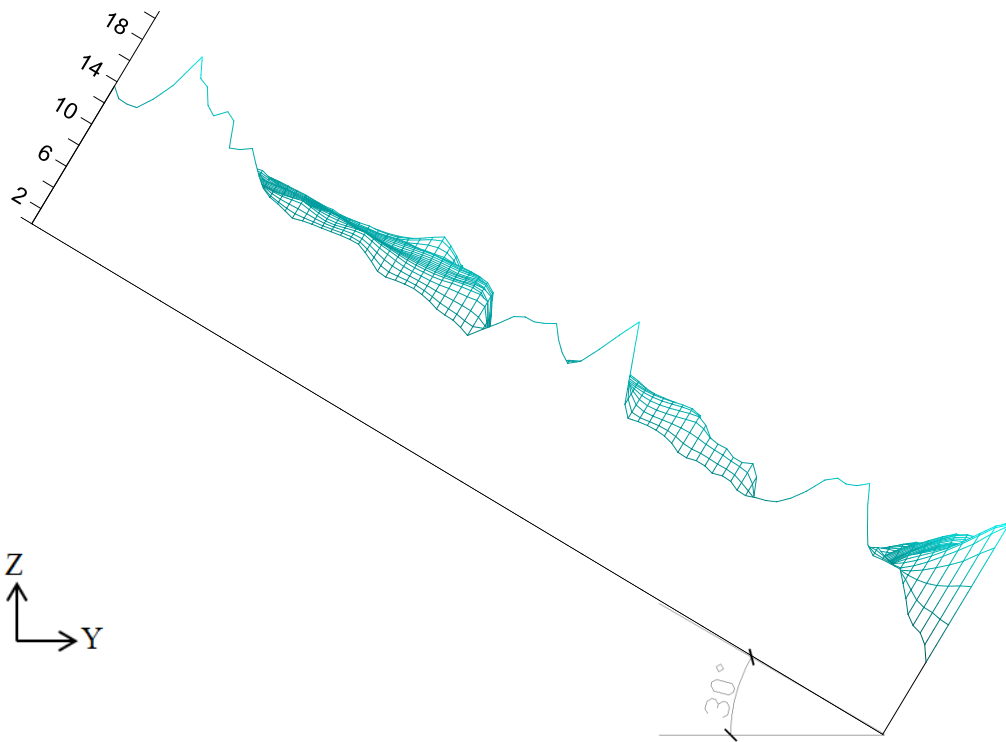
4. Kemiringan 30°

Pada kemiringan 30° didapat data koordinat DEM yang dapat dilihat pada halaman lampiran.

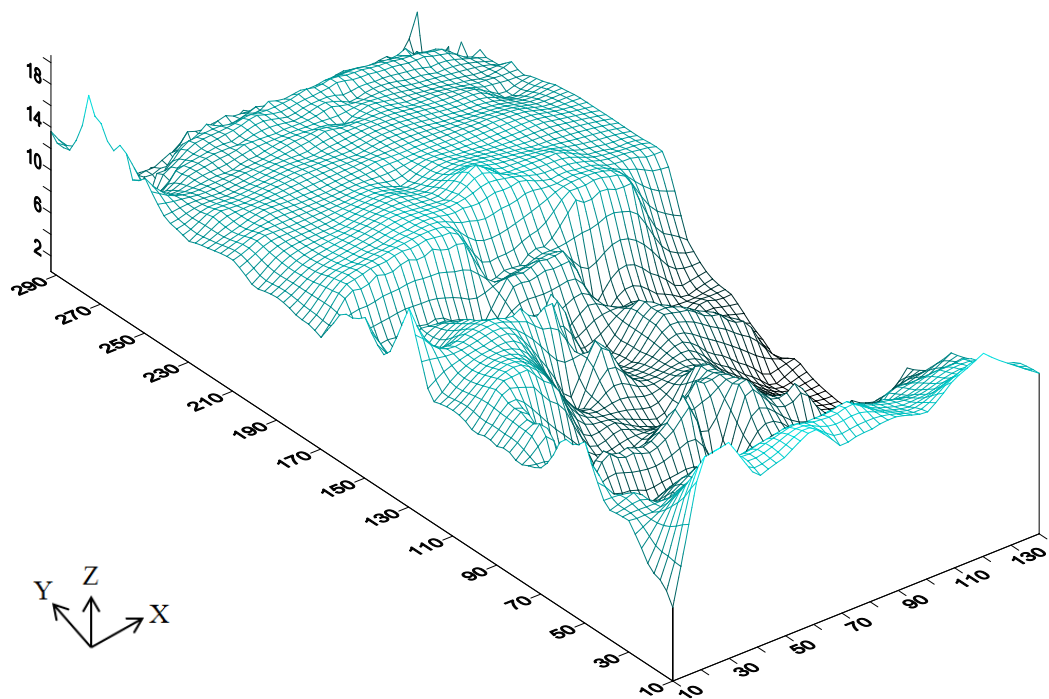
Dari data koordinat tersebut lalu diolah dengan menggunakan surfer dan menghasilkan data kontur, tampak dua dimensi, dan tampak tiga dimensi seperti pada Gambar 5.16 hingga Gambar 5.19. Satuan yang digunakan pada sumbu x, y dan data ketinggian adalah centimeter (cm).



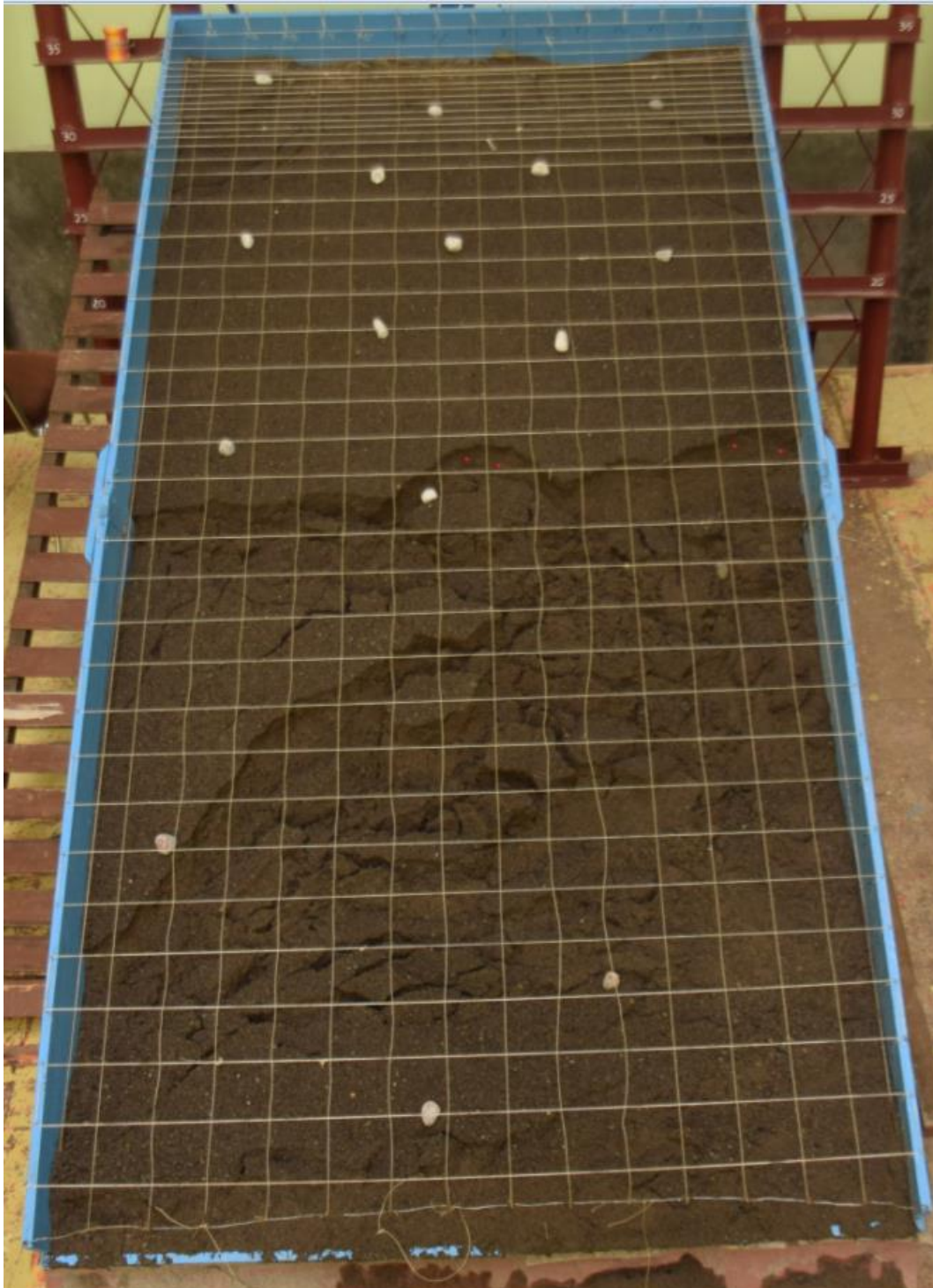
Gambar 5.16 Kontur Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Pada Kemiringan 30°



Gambar 5. 17 Tampak Dua Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Kemiringan 30°



Gambar 5. 18 Tampak Tiga Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Kemiringan 30°

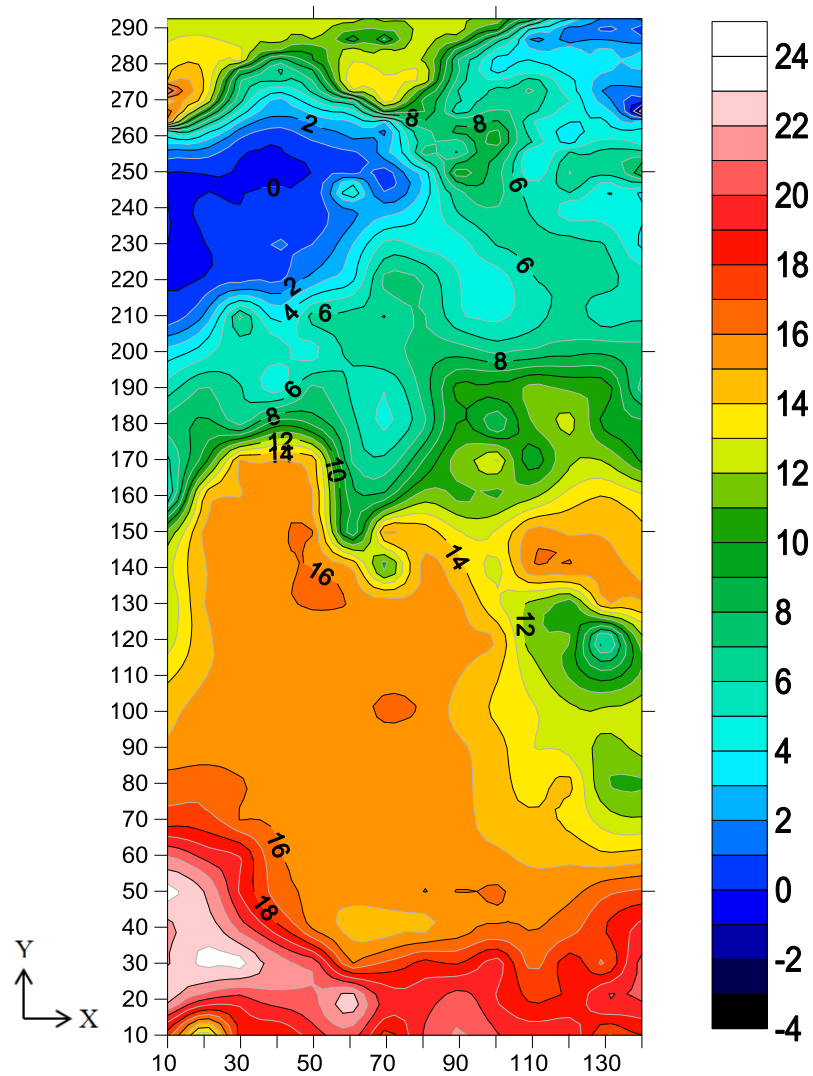


Gambar 5. 19 Kondisi Sedimen Pada Kemiringan 30° Setelah Running

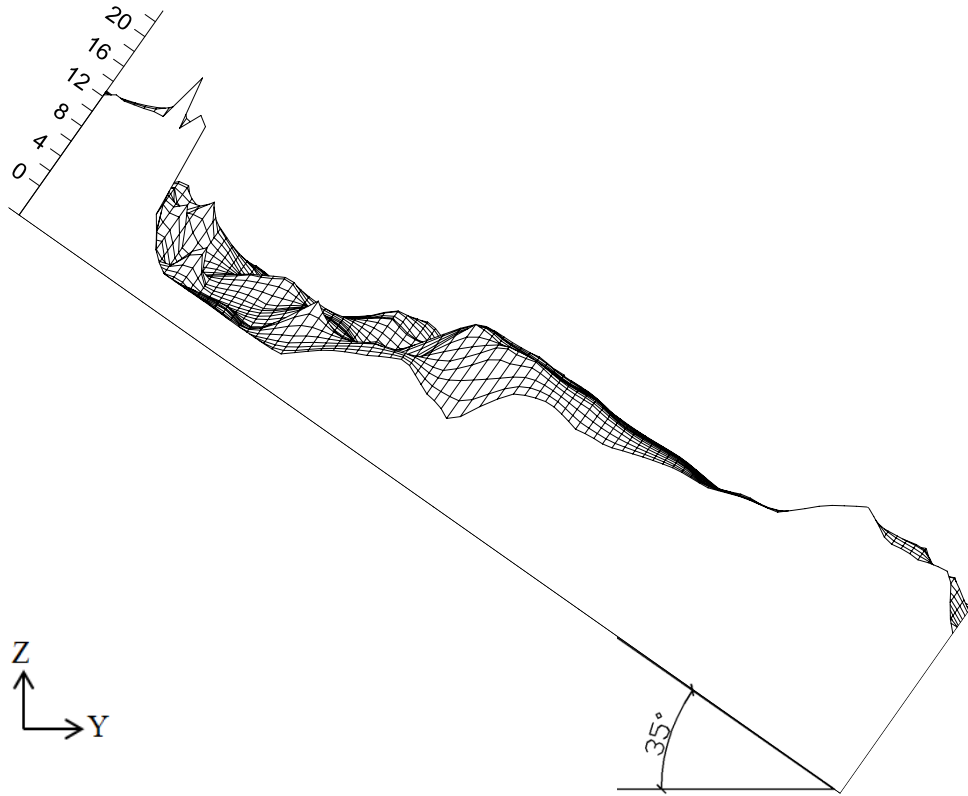
5. Kemiringan 35°

Pada kemiringan 35° didapat data koordinat DEM yang dapat dilihat pada halaman lampiran.

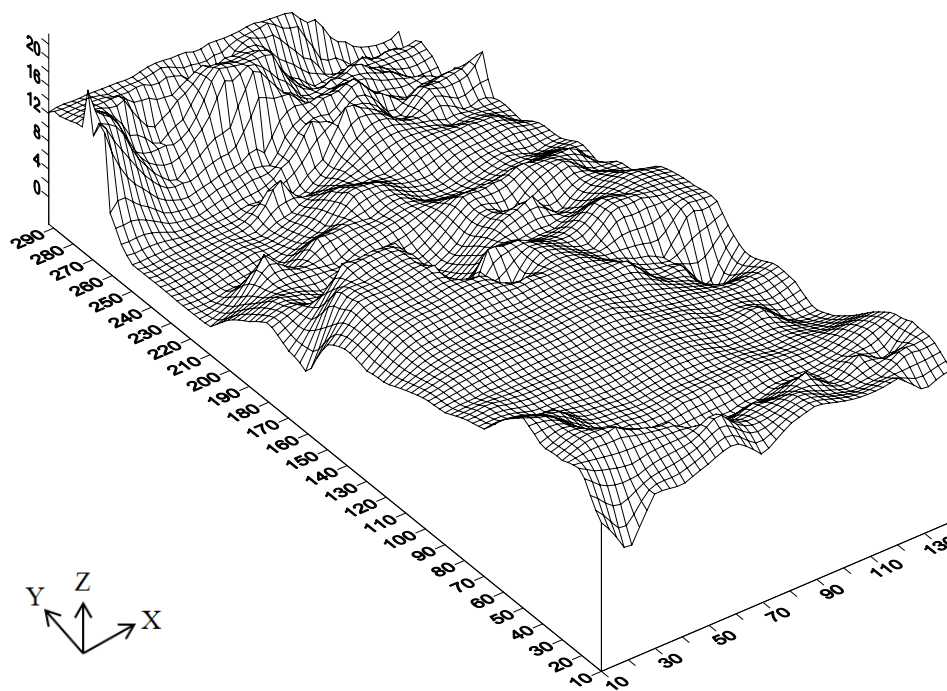
Dari data koordinat tersebut lalu diolah dengan menggunakan surfer dan menghasilkan data kontur, tampak dua dimensi, dan tampak tiga dimensi seperti pada Gambar 5.20 hingga Gambar 5.23. Satuan yang digunakan pada sumbu x, y dan data ketinggian adalah centimeter (cm).



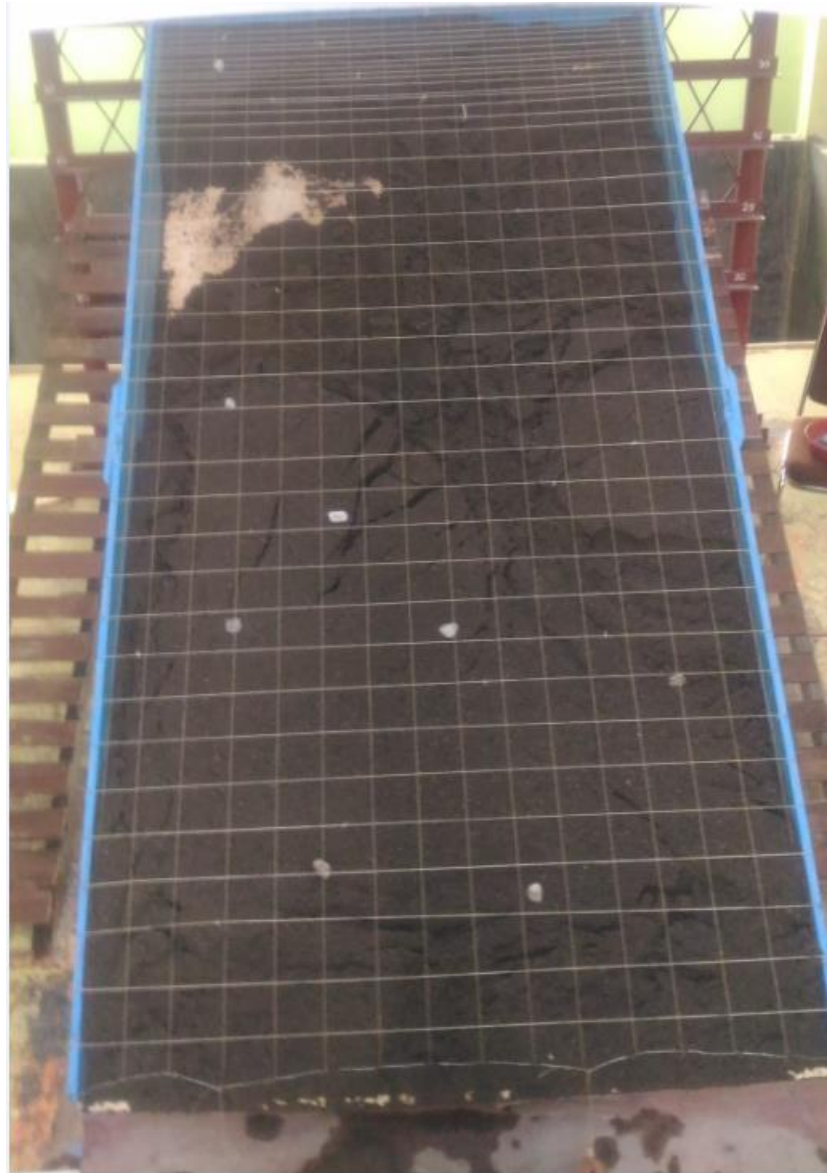
Gambar 5. 20 Kontur Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Pada Kemiringan 35°



Gambar 5. 21 Tampak Dua Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Pada Kemiringan 35°



Gambar 5. 22 Tampak Tiga Dimensi Permukaan Sedimen Setelah Pengujian Pada Kemiringan 35°



Gambar 5. 23 Kondisi Sedimen Pada Kemiringan 35° Setelah Running

5.3 Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis beberapa parameter diatas maka akan dibahas beberapa permasalahan yang menjawab rumusan masalah sebagai berikut.

5.3.1. Pembahasan Hubungan Antara Intensitas Hujan dan Kemiringan Lereng

Berdasarkan Gambar 5.3 dapat diketahui bahwa hasil penelitian menunjukkan sebuah pola hubungan semakin besar nilai kemiringan maka semakin cepat pula waktu terjadinya aliran debris. Berdasarkan Tabel 3.1 tentang

parameter hujan, intensitas hujan sebesar 25 mm/jam termasuk kedalam jenis hujan yang sangat lebat. Intensitas hujan 25 mm/jam berarti dalam luasan satu meter persegi pada tempat yang datar tertampung air setinggi 25 mm pada durasi waktu 1 jam. Intensitas hujan 25mm/jam dapat menimbulkan banjir, pemicu tanah longsor, dan efek negatif pada tanaman.

Pada kemiringan 15° dalam rentang waktu penelitian 150 menit, hanya terjadi retakan yang sangat kecil, dan hampir tidak terlihat secara kasat mata, namun berdasarkan analisis pada subbab 5.3.2 tegangan geser yang pada sedimen lebih besar dari pada tegangan geser yang menahan, artinya pada kemiringan 15° dapat berpotensi terjadi aliran debris dengan durasi hujan yang lebih lama. Lalu pada kemiringan 20° mulai terjadi retakan pada menit ke 89, namun tidak terjadi longoran hingga menit ke 150. Pada kemiringan tersebut sudah mulai terlihat pertanda longoran penyebab aliran debris berupa munculnya retakan dalam kurun waktu kurang dari 150 menit durasi hujan.

Pada kemiringan 25° , 30° , dan 35° terjadi longoran yang ditandai oleh munculnya retakan yang tertangkap kamera. Pada kemiringan 25° terjadi retakan pada menit ke 65 disusul dengan longoran pada menit ke 84, lalu pada kemiringan 30° terjadi retakan pada menit ke 43 disusul dengan longoran pada menit ke 54, sedangkan pada kemiringan 35° terjadi retakan pada menit ke 30 dan disusul dengan longoran pada menit ke 44.

5.3.2 Pembahasan Tipe Aliran Sedimen

Penentuan tipe aliran sedimen dapat diketahui berdasarkan nilai tangen. Pada subbab 5.2.1, telah dilakukan analisis perhitungan nilai tangen. Hasil analisis perhitungan tipe aliran sedimen dapat dilihat pada Tabel 5.7 dan klasifikasi tipe aliran dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut.

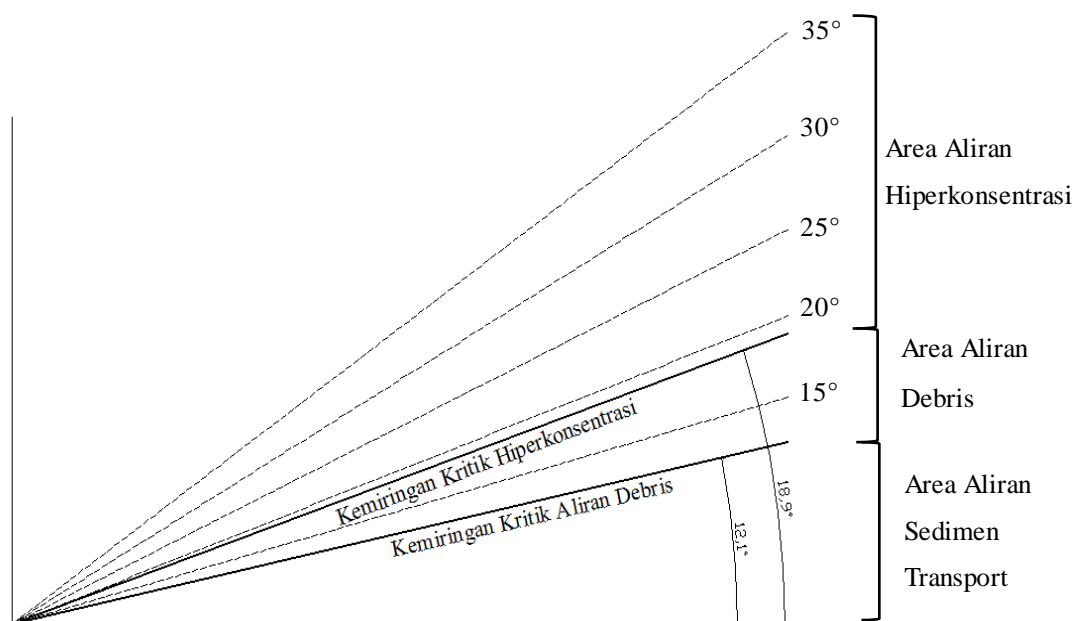
Tabel 5. 7 Rekapitulasi Hasil Analisis Tipe Aliran Sedimen

Kemiringan (θ)	$\tan \theta$	$\tan \theta_d$	$\tan \theta_h$
15°	0,268	0,214	0,343
20°	0,364	0,214	0,343
25°	0,466	0,214	0,343
30°	0,577	0,214	0,343
35°	0,7	0,214	0,343

Tabel 5. 8 Klasifikasi Tipe Aliran Berdasarkan Analisis

Tipe Aliran	Syarat	15°	20°	25°	30°	35°
Debris	$\tan \theta \geq \tan \theta_d$	√	–	–	–	–
Hiperkonsentrasi	$\tan \theta_h \leq \tan \theta$	–	√	√	√	√
Sedimen Individu	$\tan \theta < \tan \theta_d$	–	–	–	–	–

Kemiringan kritis tipe aliran dapat dilihat Gambar 5.24



Gambar 5. 24 Posisi Kemiringan Lereng yang Diuji Terhadap Kemiringan Kritis Aliran Debris dan Hiperkonsentrasi Hasil Analisis

Pada perhitungan nilai $\tan \theta_d$ didapatkan hasil sebesar 0,214 sedangkan nilai $\tan \theta$ pada kemiringan 15° hingga 35° sebesar 0,268; 0,364; 0,466; 0,577; dan 0,7 dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa nilai $\tan \theta \geq \tan \theta_h$, hal tersebut berarti pada kemiringan 20° hingga 35° dapat digolongkan tipe aliran sedimen hiperkonsentrasi dan pada kemiringan 15° nilai $\tan \theta > \theta_d$ maka pada kemiringan tersebut kemungkinan yang terjadi adalah aliran debris. Pergerakan transport sedimen bermula pada kemiringan 0,0134° sehingga pada area kemiringan 12,1° hingga 0,0134° merupakan area transport sedimen, dan pada kemiringan dibawah 0,0134° sedimen cenderung diam.

5.3.3 Pembahasan Dinamika Aliran Debris

Pergerakan sedimen berupa longsor maupun aliran debris disebabkan karena tegangan geser (τ) lebih besar dari perlawanan geser (τ_1), dan bila tegangan geser (τ) sama dengan atau lebih kecil dari perlawanan geser (τ_1) maka sedimen akan dalam keadaan diam.

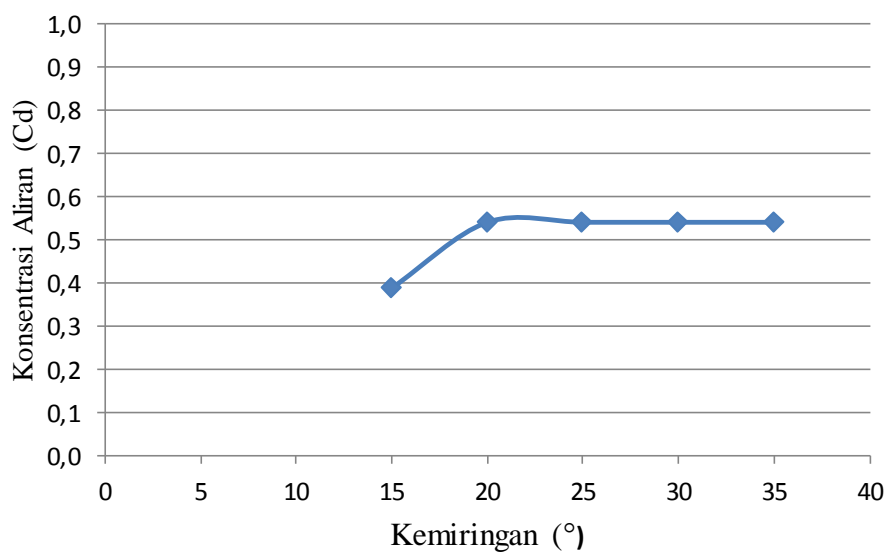
1. Dinamika Aliran Debris Teoritis

Berdasarkan data penelitian, didapatkan hasil analisis konsentrasi aliran debris (persamaan 3.6 dan 3.7), tegangan geser (persamaan 3.8) dan perlawanan geser (persamaan 3.9) yang dapat dilihat pada Tabel 5.9.

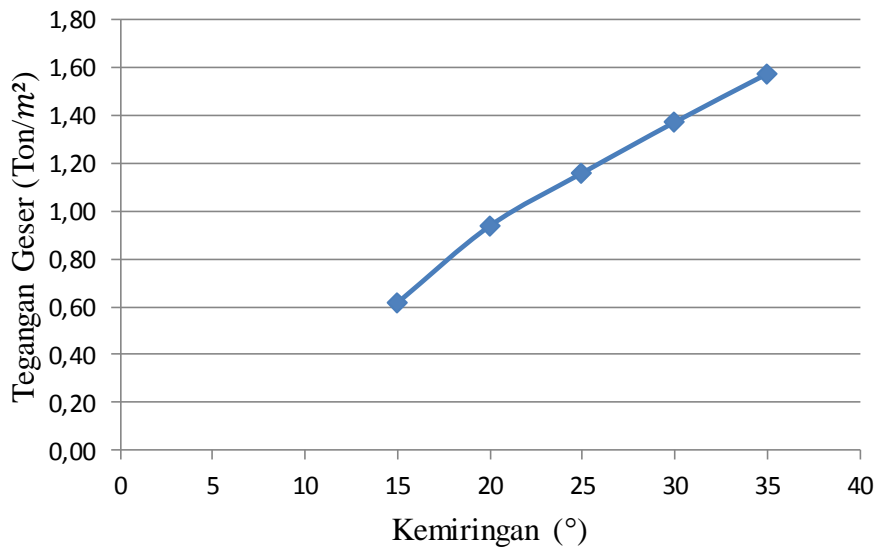
Tabel 5.9 Rekapitulasi Hasil Analisis Dinamika Aliran Debris Teoritis

Kemiringan ($^{\circ}$)	Konsentrasi Aliran Debris (Cd)	Tegangan Geser (τ) Ton/m ²	Perlawanan Geser (τ_1) Ton/m ²
15	0,388	0,617	0,618
20	0,54	0,938	0,836
25	0,54	1,159	0,807
30	0,54	1,371	0,771
35	0,54	1,573	0,72

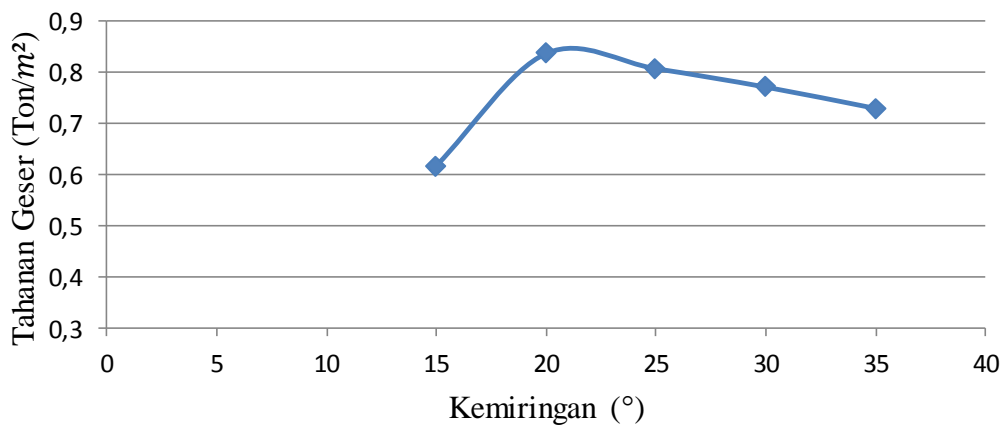
Grafik hasil analisis dinamika aliran debris dapat dilihat pada Gambar 5.25 hingga Gambar 5.27 berikut.



Gambar 5.25 Hubungan Konsentrasi Aliran Debris Teoritis vs Kemiringan Alur



Gambar 5. 26 Hubungan Tegangan Geser Teoritis vs Kemiringan Alur



Gambar 5. 27 Hubungan Perlawanan Geser Teoritis vs Kemiringan Alur

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi kemiringan aliran maka berbanding lurus dengan nilai konsentrasi aliran debris, tegangan geser, namun tidak dengan perlawanan gesernya, karena semakin miring alur aliran maka tingkat kestabilan akan meningkat lalu pada titik tertentu akan mengalami penurunan seiring meningkatnya kemiringan aliran. Berdasarkan rumus yang dikemukakan oleh Takahashi untuk menentukan konsentrasi aliran maka secara teoritis pada kemiringan 20°, 25°, 30°, dan 35° memiliki nilai konsentrasi yang sama.

Pada tegangan yang terjadi, berdasarkan hasil analisis perhitungan dapat diketahui bahwa pada kemiringan 15° memiliki nilai tegangan yang terjadi bernilai lebih kecil dari tahanan gesernya, hal tersebut memungkinkan keadaan sedimen bergerak namun tidak sebagai pergerakan aliran debris melainkan transport. Pada kemiringan 25° hingga 35° memiliki nilai tegangan geser (τ) lebih besar dari nilai perlawanan geser (τ_1), hal tersebut berarti pada pengujian tersebut pergerakan sedimen dapat terjadi karena pengaruh kemiringan aliran.

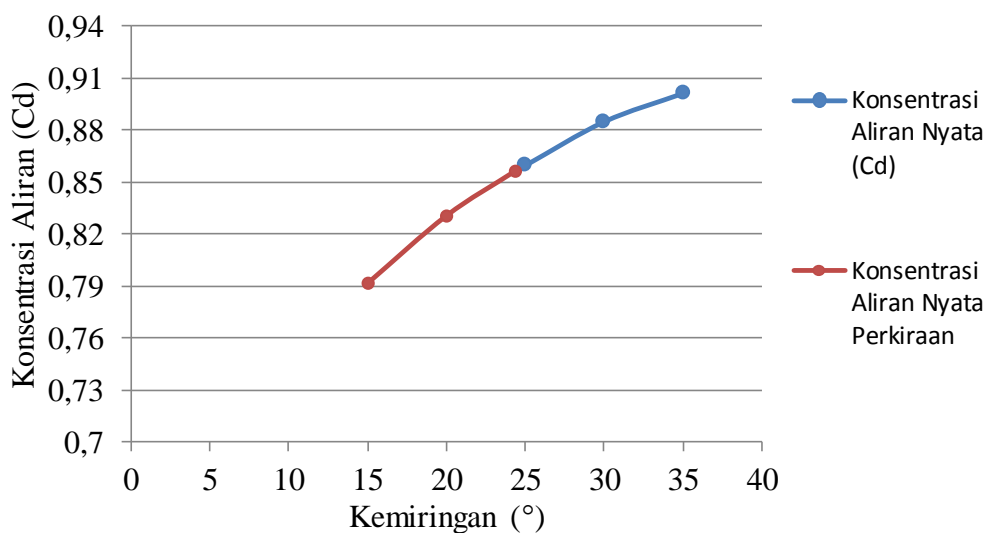
2. Dinamika Aliran Debris Nyata

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, didapatkan hasil analisis konsentrasi aliran (Cd), tegangan geser, dan perlawanan geser yang dapat dilihat pada Tabel 5.10.

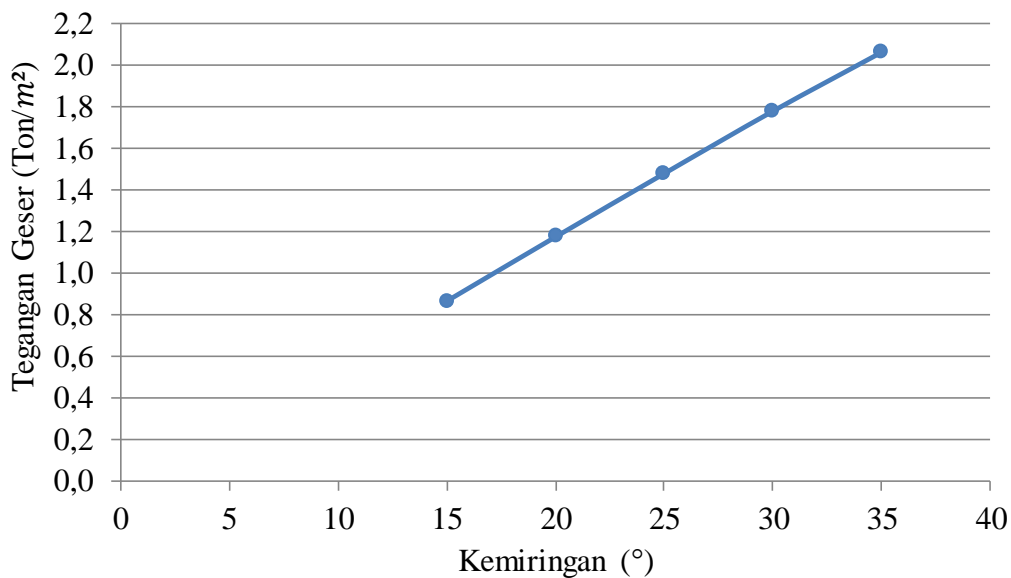
Tabel 5. 10 Rekapitulasi Hasil Analisis Dinamika Aliran Debris Nyata

Kemiringan ($^\circ$)	Konsentrasi Aliran (Cd)	Tegangan Geser (τ)	Perlawanan Geser (τ_1)
15	0,792	0,863	1,260
20	0,831	1,172	1,286
25	0,859	1,477	1,284
30	0,885	1,777	1,263
35	0,901	2,061	1,217

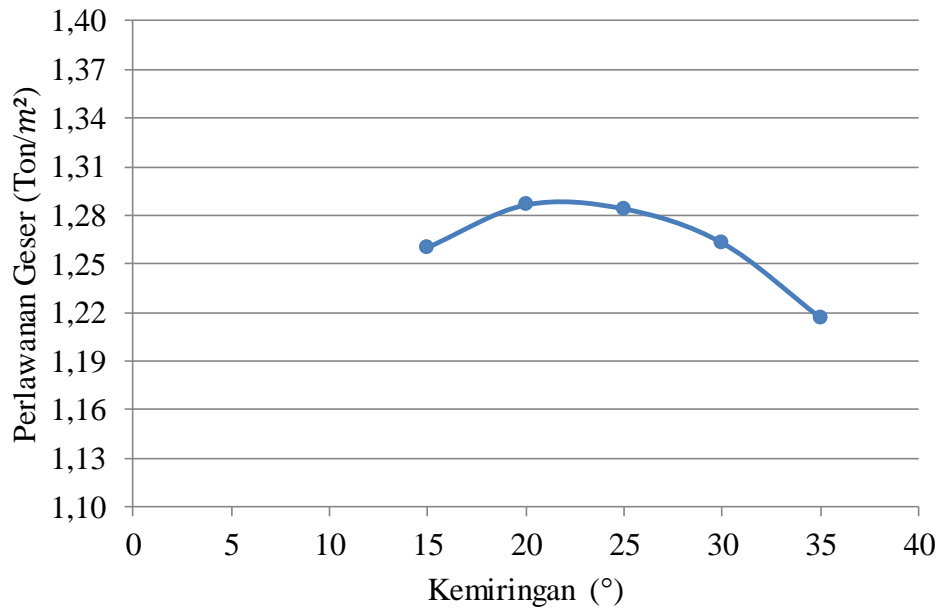
Grafik hasil analisis dinamika aliran debris dapat dilihat pada Gambar 5.28 hingga Gambar 5.30 berikut.



Gambar 5. 28 Hubungan Konsentrasi Aliran Debris Nyata Vs Kemiringan Alur



Gambar 5. 29 Hubungan Tegangan Geser Nyata Vs Kemiringan Alur



Gambar 5.30 Hubungan Tahanan Geser Nyata Vs Kemiringan Alur

Pada analisis konsentrasi aliran debris nyata, perhitungan hanya dapat dilakukan pada kemiringan 25, 30, dan 35 derajat, dikarenakan pada analisis tersebut dibutuhkan data berupa sedimen yang longsor dan terlimpas ke dalam bak penampungan. Sedangkan pada kemiringan 15 dan 20 derajat tidak terjadi longsor sehingga hanya dapat dilakukan prediksi nilai konsentrasi aliran yang mungkin terjadi pada kemiringan tersebut.

3. Perbandingan Hasil Analisis Dinamika Aliran Debris Teoritis dan Nyata

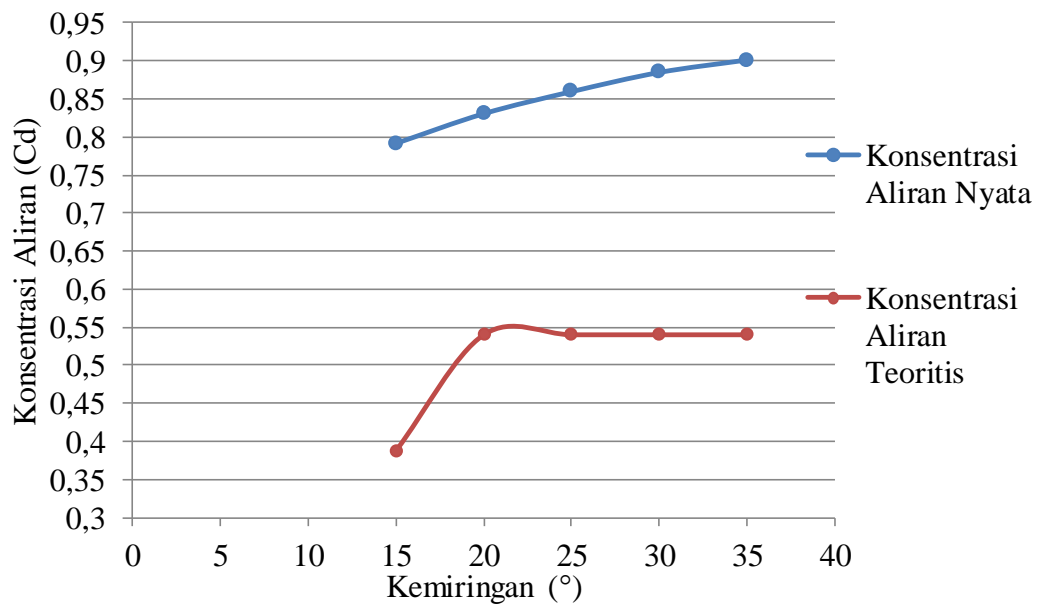
Terdapat hasil yang berbeda antara analisis dinamika teoritis dan nyata, perbedaan hasil analisis tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.11 dan Gambar 5.31 hingga Gambar 5.33.

Tabel 5.11 Perbandingan Hasil Analisis Dinamika Aliran Debris Teoritis dan Nyata

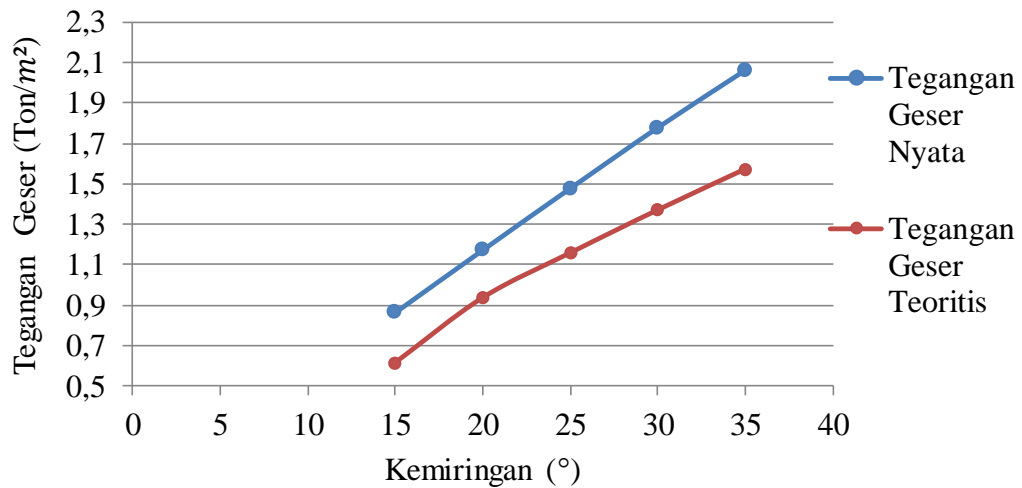
Parameter	Sudut (°)	Teoritis	Nyata
Konsentrasi Aliran (Cd)	15	0,388	0,792
	20	0,540	0,831
	25	0,540	0,859
	30	0,540	0,885
	35	0,540	0,901

Lanjutan Tabel 5. 11 Perbandingan Hasil Analisis Dinamika Aliran Debris Teoritis dan Nyata

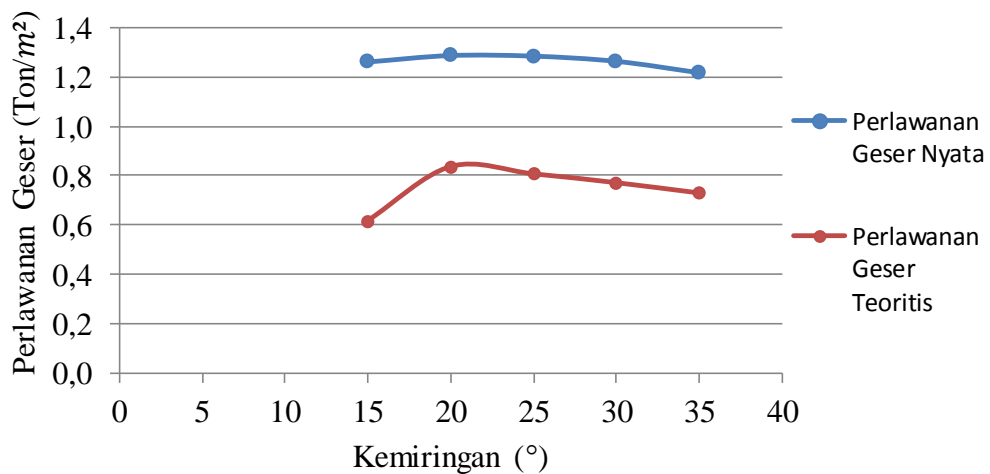
Parameter	Sudut (°)	Teoritis	Nyata
Tegangan Geser (ton/m ²)	15	0,617	0,863
	20	0,938	1,172
	25	1,159	1,477
	30	1,371	1,777
	35	1,573	2,061
Perlawanan Geser (ton/m ²)	15	0,617	1,260
	20	0,836	1,286
	25	0,807	1,284
	30	0,771	1,263
	35	0,729	1,217



Gambar 5. 31 Perbandingan Hasil Analisis Antara Konsentrasi Aliran Nyata dan Teoritis



Gambar 5. 32 Perbandingan Hasil Analisis Antara Tegangan Geser Nyata dan Teoritis



Gambar 5. 33 Perbandingan Antara Perlawanan Geser Nyata dan Teoritis

Berdasarkan Gambar 5.30 dapat dilihat perbedaan hasil analisis antara konsentrasi aliran teoritis dan konsentrasi aliran nyata. Pada analisis teoritis menggunakan batasan nilai C_d tidak lebih besar dari nilai $0,9C_{*}$, hal tersebut berdasarkan penelitian JICA (2002)., sehingga pada kemiringan 20, 25, 30, dan 35 derajat memiliki nilai konsentrasi yang sama, namun hal berbeda terlihat ketika analisis dilakukan dengan data nyata dilaboratorium. Berdasarkan hasil pengujian, semakin tinggi kemiringan lereng, maka aliran yang melimpas memiliki konsentrasi aliran debris yang semakin besar.

5.3.4 Pembahasan *Digital Elevation Model* (DEM)

Pengukuran data DEM dilakukan untuk mengetahui perbedaan permukaan sedimen sebelum dan setelah penelitian. Pengukuran dilakukan dengan membentangkan benang searah sumbu x dan searah sumbu y, dengan interval tiap bentang sebesar 10 cm. Pada kemiringan 25°, 30°, dan 35° terjadi perubahan yang sangat signifikan dikarenakan terjadi longsor selama rentang waktu penelitian. Pada kemiringan 15° dan 20° meskipun tidak terjadi longsor, namun terjadi perubahan kontur permukaan dikarenakan adanya infiltrasi yang menyebabkan tanah mengalami penjuhan dan mengalami penurunan ketinggian walaupun tidak sampai bergeser.

Selama proses penelitian, terjadi fenomena yang sama dari keseluruhan pengujian, yaitu proses longsor diawali dengan infiltrasi air ke dalam permukaan sedimen. Air yang terinfiltrasi kedalam sedimen, akan menyebabkan terjadinya tegangan permukaan pada butiran sedimen, hal tersebut membuat sedimen kehilangan daya dukung dan akhirnya terjadi retakan dan longsor. Berdasarkan mekanisme terjadinya longsor yang dijelaskan pada bab landasan teori, proses pembentukan aliran debris termasuk dalam *Mobilized debris flow*.

Pada kemiringan 25, 30, dan 35 derajat, bentuk longsor yang terjadi menyerupai bentuk tubuh aliran debris pada Gambar 3.7 yaitu terjadi penggelembungan material sedimen di bagian ujung *flume* sedangkan pada bagian tengah dan atas *flume* mengalami penyusutan material sedimen karena adanya longsor.