

Effek Tegangan Geser dan Keseragaman Butiran terhadap Tebal Armour Layer pada Kondisi Statis di Dasar Saluran

Cahyono Ikhsan

Prodi Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret. Jl. Ir Sutami 36.a Surakarta 57126
Email: cahyono1970@yahoo.co.id

Adam Pamudji Raharjo

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281 Email: adam@tsipil.ugm.ac.id

Djoko Legono

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281 Email: legono@tsipil.ugm.ac.id

Bambang Agus Kironoto

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281 Email: kironoto@tsipil.ugm.ac.id

Abstrak

Pembentukan struktur surface selama degradasi dipengaruhi secara langsung oleh gerakan bedload yang terangkat dan grain size. Studi tentang degradasi dasar saluran ternyata mampu mengidentifikasi fluktuasi aliran, baik dalam kondisi fasa aliran rendah maupun dalam kondisi setelah terjadinya fase aliran banjir. Kondisi tersebut sangat mempengaruhi stabilitas dasar yang berdampak pada terbentuknya struktur surface untuk sedimen yang tetap tinggal dan bertahan, sedangkan sedimen yang relatif halus akan terangkat. Pada percobaan ini menggunakan flume segi empat dengan ukuran geometrik penampangnya adalah panjang 10 m, lebar 0,6 m dan kedalaman 0,45 m, sedimen dasar disebar dengan ketebalan 150 mm di dasar saluran. Material berupa pasir dan gravel dicampur merata, pada 5 variasi grain size dengan 2 fase pada tiap running yaitu eroded surface dan fase equilibrium. Instrumen yang digunakan berupa digital currentmeter, point gauge, sediment traps, pada kemiringan dasar saluran 1% sampai dengan 2,6% dan kapasitas debit 25 l/s sampai dengan 45 l/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembentukan armour layer terjadi bila sedimen yang terangkat sudah mencapai maksimal, selanjutnya berkurang secara bertahap sampai mendekati nol, maka sedimen yang tertinggal di permukaan terlihat menonjol dengan ukuran diameter butiran hampir seragam. Struktur armour layer yang menonjol menyebabkan terjadinya flow resistance sehingga mempengaruhi terbentuknya ruang kosong antar butir armour. Tebal armour layer dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi dengan batasan nilai diameter bedload 0,8 mm sampai dengan 2,9 mm; koefisien uniformity 2,5 sampai dengan 5; tegangan geser kritis 0,61 N/m² sampai dengan 2,7 N/m² dan tegangan geser dasar minimal 6 N/m².

Kata-kata kunci : Armour layer, flume, grainsize, kemiringan dasar, shear stress.

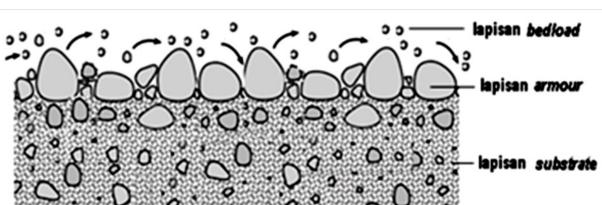
Abstract

The development of surface structure during degradation exerted a significant influence upon bedload transport rates and grain sizes. Studies of degradation are important because they represent conditions, which occur during the low flow phases between floods. Consequently, the bed surface which results will determine bed stability and volume of sediment transported during subsequent flood vents. The flume is rectangular in section, 10 m long by 0,6 m wide by 0.45 m deep, and within the rectangular section a channel was cast in plexiglass. The mobile bed was created by filling the central section with 150 mm deep layer of graded sediment to create an initially rectangular channel. Material in the form of sand and gravel is evenly mixed, in 5 variations of grain size with 2 phases for each running, are the eroded surface phase and the equilibrium phase. The instruments used are digital currentmeter, point gauge, sediment traps, at a slope of the bottom channel of 1% to 2.6% and a discharge capacity of 25 l / s to 45 l / s. The development of armour layer occurred when the transported sediment reached maximum and lessened gradually to reach zero leaving sediment on the base surface to stand out with almost uniform diameter. The standing out armour layer structure caused flow resistance that influenced the establishment of pores between the armour granule. The thickness of the armor layer is expressed in a dimensionless number with a value limit; bedload diameter of 0.75 mm to 3.0 mm; uniformity coefficient of 2.5; critical shear stress is 0.50 N/m² up to 2.7 N/m² and the basic shear stress is at least 7.85 N/m²

Keywords: Flume, base slope, grainsize, shear stress, armour layer.

1. Pendahuluan

Sedimen yang terkandung di dasar sungai memiliki ukuran butir yang bervariasi membentuk sistem lapisan tiga komponen yang berbeda **Gambar 1**. Komponen pertama adalah lapisan dasar di atas permukaan (*bedload layer*), merupakan butiran dasar yang senantiasa aktif bergerak (*mobile bed*) di atas permukaan dengan melompat, menggelinding dan bergeser. Lapisan tersebut memiliki diameter rata-rata paling kecil dan merupakan jenis golongan pasir. Komponen kedua adalah lapisan pelindung (*armour layer*), merupakan butiran dasar yang berada di permukaan (*surface*), memiliki diameter rata-rata paling besar dan hampir seragam. Butiran tersebut merupakan jenis *gravel* yang diam (*static*) berfungsi sebagai pelindung (*armour*) terhadap lapisan di bawahnya.



Gambar 1. Sistem lapisan sedimen

Komponen ketiga adalah lapisan *substrate*, merupakan butiran dasar yang berada di bawah lapisan pelindung, terdiri dari campuran antara pasir dan *gravel*, dengan jenis pasir lebih dominan (Pitlick at .all., J.2008)

Proses pembentukan lapisan pelindung di dasar permukaan terjadi dari peristiwa *armouring* yaitu suatu proses terbentuknya lapisan dasar permukaan yang diawali dari pergerakan butiran lapisan dasar secara kontinu, menyebabkan terjadinya erosi permukaan (*eroded surface*) sampai pada kondisi dimana butiran di dasar permukaan menjadi diam (*static*) yaitu tidak ada lagi butiran yang terangkut, sehingga butiran yang diam dan tertinggal di lapisan dasar adalah lapisan pelindung (*armour layer*).

Penelitian ini membahas tentang tegangan geser dasar dan tegangan geser kritis butir sedimen yang berdampak pada tebal lapisan armour, angkutan sedimen dasar (*bedload*), perubahan struktur lapisan dasar permukaan dan topografi permukaan selama proses degradasi dasar permukaan. Pengamatan dilakukan pada variasi debit dan kemiringan dasar serta komposisi lapisan yang bergerak aktif, tetapi tidak mengamati besarnya gerusan dasar permukaan yang terangkut. Pada proses pembentukan lapisan armour ini didasarkan pada kondisi aliran dan perilaku sedimen dasar yang bergerak, dimana sedimen yang terangkut akan mengalami proses pensortiran alami selama proses degradasi pada jenis aliran *steady flow*.

2. Pustaka

Hassan dan Church (2000) menyebutkan bahwa pembentukan struktur armouring selama degradasi

dipengaruhi secara langsung oleh gerakan *bedload* yang terangkut dan ukuran distribusi *grain size*. Studi tentang degradasi dasar di saluran ternyata mampu mengidentifikasi fluktuasi aliran. Kondisi tersebut sangat mempengaruhi stabilitas dasar yang berdampak pada terbentuknya lapisan *armour* untuk sedimen yang tetap tinggal dan bertahan, sedangkan sedimen yang relatif halus akan terangkut. Wilcock (2001) meneliti lapisan pelindung dengan memisahkan jenis material antara gravel dan pasir, serta menentukan besarnya tegangan geser pada gravel dan pasir tersebut. Selain itu Wilcock juga merekomendasikan persamaan untuk mengestimasi jumlah gravel dan pasir yang terangkut secara terpisah. Wilcock (2003) mengembangkan besarnya angkutan sedimen pada gradasi sedimen dasar secara keseluruhan dalam proses pembentukan lapisan pelindung. Wilcock dan Crowe (2005) melakukan eksperimen pada saluran segi empat dengan melakukan penambahan pasir di hulu saluran, kemudian pasir yang bergerak terangkut keluar melewati hilir saluran kemudian ditangkap dengan disedimen *traps*. Keseimbangan dinamis pada dasar permukaan saluran akan tercapai ketika jumlah pasir rata-rata yang terangkut pada selang waktu tertentu akan menyamai jumlah pasir yang dimasukkan di hulu saluran sebesar 5000 gr yang terjadi pada menit ke 68 sampai dengan menit ke 100. Curran dan Tan (2010) melakukan eksperimen di laboratorium tentang formasi klaster lapisan pelindung dengan dasar permukaan yang stabil. Eksperimen dilakukan pada saluran segi empat lurus dengan dimensi panjang 9,0 m, lebar 0,6 m dan tinggi 0,5 m, serta menguji 5 gradasi material dari dasar sungai dengan 4 debit aliran yang berbeda. Struktur lapisan pelindung yang terbentuk merupakan campuran gravel dan pasir yang terjadi karena peristiwa sortir secara periodik. Tegangan geser geser dasar menggerakkan butir halus yaitu pasir dengan diameter butir < 4 mm, mengakibatkan sedimen terangkut keluar, sedangkan gravel dengan diameter butir > 4 mm, akan tetap tinggal sebagai lapisan pelindung. Struktur lapisan dasar permukaan tersebut lebih dominan dari jenis gravel dengan susunan mengelompok, dan dengan struktur kokoh serta melindungi lapisan *substrate*. Proffitt (1980) menyebutkan bahwa lapisan pelindung melindungi lapisan di bawahnya. Parker et.al (1982) membahas karakteristik ukuran butir pada lapisan *substrate* dengan menganalisa besarnya sedimen yang terangkut pada satu ukuran butir. Shen dan Lu (1983) mengembangkan suatu metoda untuk memprediksi distribusi lapisan pelindung. Parker (1990) mengembangkan persamaan lapisan pelindung pada tiap fraksi butir dan diameter rata-rata lapisan. Wilcock (2003) mengembangkan suatu hubungan antara pasir dengan lapisan pelindung serta *substrate* yang tergambar pada profil gradasi secara keseluruhan, termasuk adanya butir pasir yang mengisi rongga antar gravel pada saat terjadi angkutan sedimen. Curran dan Wilcock (2005) melakukan eksperimen di saluran lurus dengan intensitas debit yang besar dan mengukur pasir yang terangkut dan tertinggal di dasar. Sistem sedimen di dasar sungai terdiri dari tiga lapisan komponen pembentuk, ketiga lapisan tersebut adalah lapisan permukaan dasar, *substrate* dan lapisan pasir. Metode yang dikemukakan oleh Bakke (1999) adalah pada

kedua lapisan yaitu lapisan dasar permukaan dan *substrate* tergantung pada perbandingan antara campuran gravel dan pasir.

3. Resistance Flow

Konfigurasi *bedform* saluran dibagi menjadi 2 bagian yaitu *lower regime* dan *upper regime*. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh perlakuan aliran (*resistance flow*) yang dirumuskan adalah:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \quad (1)$$

Besarnya kecepatan geser (u_*) adalah:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (2)$$

Dengan memakai prinsip tegangan *Reynold* dari hasil rata-rata waktu, pada persamaan *Navier-Stokes* diketahui besarnya tegangan geser dasar adalah:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} + \rho l^2 \left[\frac{dv_x}{dy} \right]^2 \quad (3)$$

dengan;

- τ_{yx} = adalah tegangan dasar saluran
- v_x = adalah kecepatan ke arah x
- μ = adalah kekentalan dinamika fluida air
- l = adalah panjang campur *Prandtl*

Karakteristik aliran pada saluran terbuka cenderung turbulen sehingga unsur laminer pada persamaan tersebut diabaikan, maka dirumuskan:

$$\tau_{yx} = \rho l^2 \left[\frac{dv_x}{dy} \right]^2 \quad (4)$$

Menurut *Von Karman* besarnya l adalah proporsional dengan jarak y dari batas dasar saluran yaitu:

$$l = \kappa y \quad (5)$$

dengan

κ = adalah konstanta *Von Karman* yang nilainya 0,4 dengan menganggap bahwa

$$\tau_o = \tau_{yx} \quad (6)$$

maka

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \kappa y \frac{dv_x}{dy} \quad (7)$$

Setelah mengintegralkan persamaan tersebut menjadi:

$$\frac{v_x}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + c \quad (8)$$

Selanjutnya persamaan tersebut menjadi:

$$\frac{v_x}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_*} \quad (9)$$

Tabel 1. Variasi eksperimen

No	Y (m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	U/U*	T (N/m ²)	U* (m/s)	U (m/s)	Q(m ³ /s)
1	0,080	0,05	0,76	0,06	5,99	7,85	0,09	0,53	0,025
2	0,088	0,05	0,78	0,07	6,18	8,63	0,09	0,57	0,030
3	0,102	0,06	0,80	0,08	6,46	10,01	0,10	0,65	0,040
4	0,110	0,07	0,82	0,08	6,60	10,79	0,10	0,69	0,045
5	0,116	0,07	0,83	0,08	6,70	11,38	0,11	0,71	0,050

Persamaan ini dikenal dengan distribusi kecepatan universal *Prandtl-Von Karman*. Konstanta integrasi y_o mempunyai urutan besaran yang sama dengan δ dan merupakan fungsi yang tergantung dari batas halus sampai kasar. Untuk kondisi kasar, maka y_o hanya tergantung dari ketinggian kekasaran pada dasar saluran dengan $\kappa = 0,4$.

Persamaan distribusi kecepatan universal *Prandtl-Von Karman* untuk saluran dengan dasar kasar adalah:

$$\frac{v}{u_*} = 2,5 \ln \left[\frac{R}{k_s} \right] + 6,25 \quad (10)$$

k_s adalah kekasaran butiran material ekivalen

4. Kondisi Eksperimen

Pada percobaan degradasi, sedimen dasar yang terangkat maupun sedimen yang tertinggal sangat dipengaruhi oleh besarnya debit yang terjadi, kemiringan dasar saluran, kondisi sedimen dasar yang berkaitan dengan kekasaran dan geometrik penampang salurnanya.

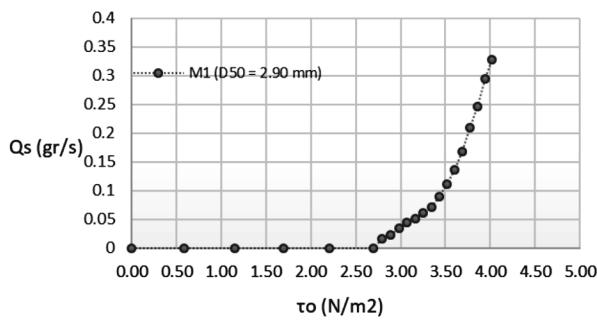
Pada percobaan ini sedimen *bedload* berupa pasir yang terangkat bersama aliran, sedangkan gravel berada tetap di dasar saluran. Sedimen *bedload* terdiri dari fraksi butir yang menyusun struktur lapisan dasar dengan ukuran diameter butir yang bervariasi pada kondisi yang stabil **Tabel 1**.

Pada batas kondisi eksperimen, nilai tegangan geser dasar pada fraksi butir yang terjadi memiliki linieritas dengan kenaikan debit aliran. Nilai tegangan geser tersebut belum termasuk tegangan geser pada dinding melainkan hanya pada dasar saluran. Besarnya tegangan geser dasar memberikan batas rentang diameter butir yang terangkat. Pada eksperimen ini nilai batas bawah tegangan geser adalah 7,85 N/m² yang akan menggerakkan butir sedimen dengan syarat bahwa tegangan dasar (τ_o) lebih besar dari tegangan dasar kritis butir sedimen (τ_c). Butir sedimen dengan D=2,90 mm memiliki tegangan geser kritis 2,69 N/m², sehingga sedimen terangkat selama *running* **Gambar 2**.

5. Prosedur Eksperimen

Pada percobaan ini menggunakan *flume* segi empat yang dimodifikasi, dengan ukuran geometrik penampangnya adalah panjang 10 m, lebar (wide) 0,60 m dan kedalaman 0,45 m, sedimen dasar disebar dengan ketebalan 150 mm di dasar flume **Gambar 3**.

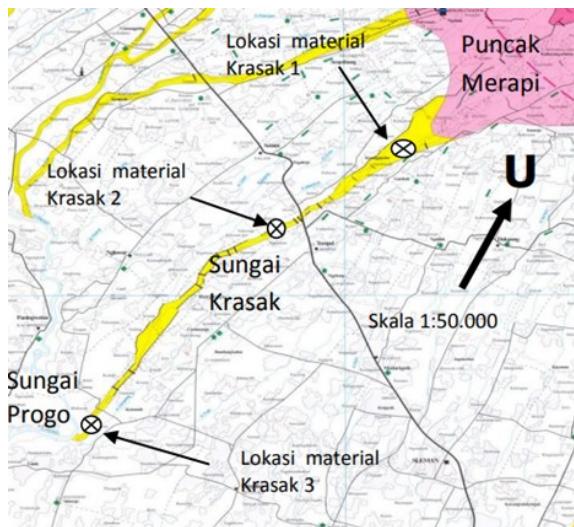
Sedimen penelitian berupa material dasar alam dari jenis gravel dan pasir yang diambil dari Sungai Krasak Kabupaten Sleman Yogyakarta. Material sedimen dasar



Gambar 2. Tegangan geser kritis butir ($D=2,90$ mm)



Gambar 3. Flum segi empat



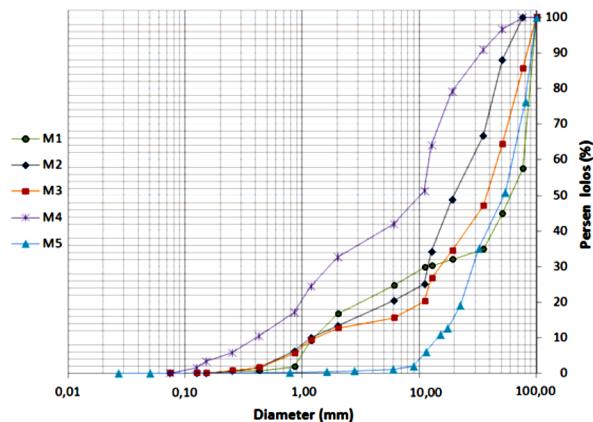
Gambar 4. Lokasi pengambilan sampel material
(Sumber : Hadisantono dkk, 2002)

alam tersebut diambil di tiga lokasi kemudian dicampur menjadi satu. Material dasar Krasak 1 diambil dari lokasi berjarak 2 km dari puncak Merapi, material Krasak 2 diambil dari lokasi berjarak 7 km dari puncak Merapi (di desa Tempel, Sleman) dan material Krasak 3 diambil dari bagian hilir sungai Krasak (sebelum menyatu dengan sungai Progo), berjarak 15 km dari puncak Merapi. Lokasi pengambilan material ini selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.

Pengambilan material tersebut sesuai dengan yang dilakukan Wolman (1954), dimana pengambilan dimulai dari lapisan dasar permukaan hingga kedalam di lapisan *substrate* dengan spesifikasi:

1. Berdasarkan klasifikasi ukuran butiran menurut American Geophysical Union (AGU) ditunjukkan pada Tabel 2.
2. Mekanisme pemilihan material yang dipakai untuk eksperimen, dengan cara dibersihkan dan dipisahkan antara pasir, gravel dan clay.
3. Material diambil secara random dan dilakukan uji analisis saringan.
4. Hasil uji analisis saringan butiran material.

Pada penelitian ini digunakan 5 variasi material dasar, dimana tiap-tiap material tersebut dilakukan uji analisis saringan untuk diperoleh gradasinya. Berikut ini hasil uji analisis saringan untuk 5 jenis materia dasar yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Gradiasi 5 material dasar

Sedangkan prosentase antara pasir dan gravel pada uji analisis saringan untuk 5 jenis material ditunjukkan pada Tabel 3.

Pelaksanaan *running* diawali dengan penyebaran sedimen secara merata di *flume* dengan batas kedalaman 150 mm dari batas dasar, selanjutnya air mengalir dan membawa butir sedimen yang lepas, kemudian debit dinaikkan dan dilakukan pengamatan.

Pada saat awal eksperimen, ditandai dengan tercapainya kondisi aliran yang *uniform flow*, kemiringan dasar saluran diatur sesuai rencana dan kedalaman aliran menunjukkan kondisi yang sama sepanjang *flume*. Pada awalnya kondisi batas hulu diatur untuk mencapai aliran yang seragam, namun akan terus berubah seiring dengan tegangan geser dasar aliran yang berbeda, ditandai dengan perbedaan kedalaman dasar saluran disebabkan terjadinya degradasi, selanjutnya dilakukan pengukuran kedalaman dan penangkapan sedimen yang terangkat.

Running terus dilakukan sampai sedimen yang tertangkap berkang sampai dengan kurang lebih 1% dari nilai awal sebaran, kondisi ini tercapai antara 200 sampai dengan 300 menit *running* Gambar 6.

Tabel 2. Klasifikasi ukuran butiran menurut AGU (American Geophysical Union).

Interval/range (mm)	Nama
4096 – 2048	Batu sangat besar (<i>Very Large Boulders</i>)
4096 – 2048	Batu besar (<i>Large Boulders</i>)
1024 – 512	Batu sedang (<i>Medium Boulders</i>)
512 – 256	Batu kecil (<i>Small Boulders</i>)
256 – 128	Kerakal besar (<i>Large Cobbles</i>)
256 – 128	Kerakal kecil (<i>Small Cobbles</i>)
64 – 32	Kerikil sangat kasar (<i>Very Coarse Gravel</i>)
32 – 16	Kerikil kasar (<i>Coarse Gravel</i>)
16 – 8	Kerikil sedang (<i>Medium Gravel</i>)
8 – 4	Kerikil halus (<i>Fine Gravel</i>)
4 – 2	Kerikil sangat halus (<i>Very Fine Gravel</i>)
2 – 1	Pasir sangat kasar (<i>Very Coarse Sand</i>)
1 - 1/2	Pasir kasar (<i>Coarse Sand</i>)
1/2 - 1/4	Pasir sedang (<i>Medium Sand</i>)
1/4 - 1/8	Pasir halus (<i>Fine Sand</i>)
1/8 - 1/16	Pasir sangat halus (<i>Very Fine Sand</i>)
1/16 - 1/32	Lumpur kasar (<i>Coarse Silt</i>)
1/32 - 1/64	Lumpur sedang (<i>Medium Silt</i>)
1/64 - 1/128	Lumpur halus (<i>Fine Silt</i>)
1/128 - 1/256	Lumpur sangat halus (<i>Very Fine Silt</i>)
1/256 - 1/512	Lempung kasar (<i>Coarse Clay</i>)
1/512 - 1/1024	Lempung sedang (<i>Medium Clay</i>)
1/1024 - 1/2048	Lempung halus (<i>Fine Clay</i>)
1/2048 - 1/4096	Lempung sangat halus (<i>Very Fine Clay</i>)

(Sumber : Garde & Raju, 1985)

6. Pengukuran

Setiap *running* dilakukan pengukuran secara periodik yaitu debit, temperatur, kemiringan dasar, profil muka air, sedimen dasar yang terangkut. Pada waktu tertentu dilakukan pemotretan permukaan dasar, sedangkan pengukuran debit sedimen yang terangkut dapat dicapai dengan mengukur degradasi dasarnya dan butiran yang tertangkap di *sediment trap* pada saat *running*.

Pengukuran melintang *flume* diawali dari sisi kiri, tengah dan kanan selebar 600 mm. Pengukuran dilakukan dengan memasang *point gauge* yang dihubungkan dengan instrumen dari atas ke bawah dengan membuat *grid* pada area 600 x 1500 mm.

7. Hasil Penelitian

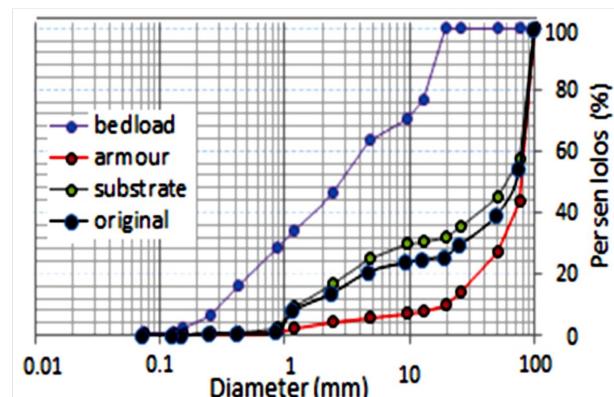
7.1 Komposisi lapisan dasar

Komposisi lapisan dasar saluran ditentukan dengan cara mengidentifikasi lapisan dasar permukaan yang diambil dari hasil penelitian yang dibuat dalam bentuk distribusi *grainsize*.

Pada **Gambar 7** merupakan struktur komposisi akhir dari sedimen dasar, dimana sedimen tersebut memiliki kekasaran dasar pada butir penyusunnya yang berbeda yaitu *bedload*, *substrate*, *original* dan *armour*. Pada proses *finalbed* sedimen dasar yang memiliki ukuran diameter butir paling besar dan hampir seragam berada di atas permukaan serta memiliki kemiringan paling curam akan mengalami hambatan aliran yang paling besar.

Tabel 3. Persentase pasir dan gravel pada setiap material

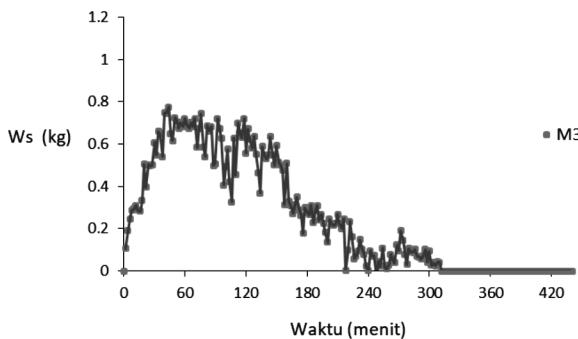
No.	Material	% gravel	% pasir
1	M1	75,40	24,60
2	M2	79,55	20,45
3	M3	84,44	15,66
4	M4	58,08	41,92
5	M5	88,63	11,37

**Gambar 6. Running uniform flow****Gambar 7. Grain size curve distribusi**

7.2. Bedload

Pada **Gambar 8** menunjukkan pola sedimen yang terangkut pada rentang waktu tertentu, dimana sedimen yang bergerak akan terus meningkat sampai tercapai kondisi batas maksimal yaitu pada menit ke-56 sebesar 0,81 kg, selanjutnya mengalami penurunan secara bertahap mulai dari menit ke-154 sampai dengan menit ke-312 sampai dengan tidak ada lagi sedimen yang terangkut.

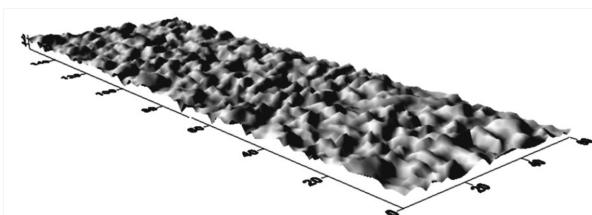
Proses lapisan pelindung akan terbentuk, jika jumlah butiran sedimen yang terangkut telah mencapai 50% dari total sedimen yang bergerak. Pembentukan lapisan pelindung ini ditandai dengan adanya butir sedimen yang terangkut sudah mencapai jumlah maksimal, sehingga butiran yang tertinggal di dasar permukaan memiliki ukuran diameter hampir seragam, yang didominasi dari jenis *gravel*, yang tersusun merata diantara butiran penyusunnya. Struktur lapisan tersebut



Gambar 8. Bedload transport



Gambar 9. Armour layer



Gambar 10. Sedimen permukaan dasar

senantiasa menghalangi gerak butiran yang melintas di atasnya. Pada tahapan ini ukuran sedimen yang besar secara dominan nampak jelas di permukaan membentuk posisi tegak lurus arah aliran dan membentuk jaringan. Pada kondisi ini posisi butir sedimen semakin stabil dan tidak bergerak sehingga mampu untuk melindungi butiran sedimen di sekitarnya.

7.3 Topografi dasar

Gambar 9 merupakan hasil dari foto kamera pada saat eksperimen, dimana sedimen dasar disebar sepanjang 10 m dengan ketebalan 15 cm dan lama waktu *running* 420 menit.

Bentuk butiran kasar dan homogen akan nampak setelah *running* ke-56 menit **Gambar 9**, sedangkan butiran yang stabil dan terlindung terjadi pada saat *running* ke-312 menit. Pergerakan butir sedimen yang terjadi pada menit ke-56 mengarah ke pembentukan butiran kasar (*armouring*) secara bertahap meningkat,

meskipun sedimen dasar yang terangkut adalah dalam jumlah yang terbatas.

Pada **Gambar 10** menunjukkan sedimen dasar berupa lapisan *armour*, yang digambarkan dalam bentuk program *slicer*.

8. Diskusi

8.1. Formula lapisan pelindung (*armour layer*) tak berdimensi

Variabel-variabel pada penelitian ini adalah diameter butir rata-rata lapisan pelindung (D_{a50}), diameter butir rata-rata lapisan dasar (D_{b50}), tegangan geser dasar (τ_0), tegangan geser kritis butir (τ_c), keseragaman ukuran butiran (C_u). Variabel tersebut dinyatakan secara matematis dalam bilangan tak berdimensi pada fungsi tebal lapisan pelindung :

$$f(D_{b50}, D_{a50}, C_u, \Delta\tau) = 0 \quad (11)$$

Selanjutnya melakukan analisis dimensi dengan memakai Metode *Basic Stepwise* pada fungsi parameter massa jenis air (ML^{-3}), diameter butiran lapisan pelindung (L), keseragaman ukuran butiran (L/L), kecepatan aliran (LT^{-1}) dan selisih tegangan geser ($ML^{-1}T^{-2}$).

Selanjutnya, secara bertahap, satuan pada fungsi tersebut dibagi dengan M pada parameter ρ (ML^{-3}), T pada parameter $U(LT^{-1})$ dan L pada parameter $D_a(L)$, terbentuk fungsi :

$$f\left(\frac{D_{a50}}{D_{b50}}, \frac{(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c}, C_u\right) = 0 \quad (12)$$

atau

$$\frac{D_{a50}}{D_{b50}} = f\left(\frac{(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c}, C_u\right) = 0 \quad (13)$$

Pada komponen tegangan geser senantiasa bernilai positif, maka pada persamaan tersebut dilakukan modifikasi dengan suatu nilai θ agar diperoleh grafik tegangan geser di atas nol, sedangkan untuk keseragaman ukuran butiran, dilakukan modifikasi dengan suatu nilai λ agar diperoleh nilai kesegaman ukuran butiran minimal satu

$$\frac{D_{a50}}{D_{b50}} = \left(\frac{(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c} - \theta\right) (C_u - \lambda) = 0 \quad (14)$$

Selanjutnya persamaan tersebut dilakukan modifikasi dengan perkalian α dan eksponen β pada tegangan geser, sedangkan pada keseragaman ukuran butiran dilakukan modifikasi dengan perkalian eksponen γ , Sehingga persamaan tersebut menjadi:

$$\frac{D_{a50}}{D_{b50}} = \alpha \left(\frac{(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c} - \theta\right)^\beta (C_u - \lambda)^\gamma \quad (15)$$

$$L_a = \frac{D_{a50}}{D_{b50}} \quad (16)$$

dengan:

L_a = tebal lapisan pelindung (tak berdimensi)

D_{a50} = Diameter butir lapisan pelindung 50% lolos saringan

D_{b50} = Diameter butir lapisan dasar 50% lolos

- saringan
 τ_o = tegangan geser dasar (N/m^2)
 τ_c = tegangan geser kritis butir lapisan dasar (N/m^2)
 θ = tegangan geser modifikasi (N/m^2)
 Λ = keseragaman ukuran butir modifikasi (tak berdimensi)

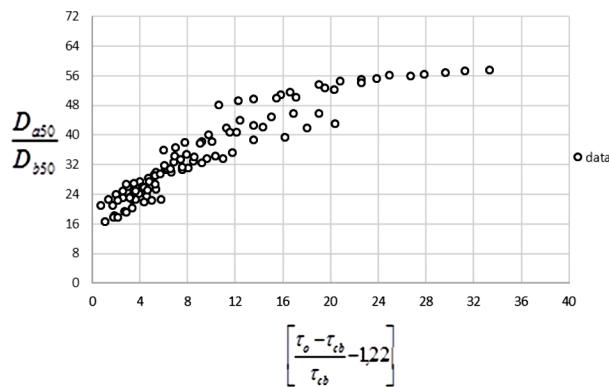
$$C_u = \frac{D_{a90}}{D_{a16}} \quad (17)$$

- D_{a90} = diameter butir lapisan pelindung 90% lolos saringan
 D_{a16} = diameter butir lapisan pelindung 16% lolos saringan
 C_u = keseragaman ukuran butiran
 α = koefisien perkalian tegangan geser
 β = koefisien perkalian eksponen tegangan geser
 γ = koefisien perkalian eksponen keseragaman ukuran butiran

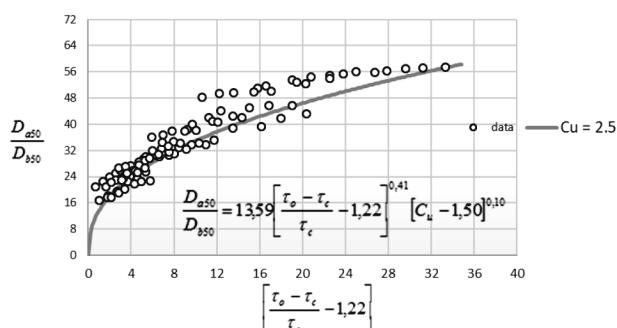
8.2. Formula lapisan pelindung (armour layer)

Pada penelitian ini terdapat 100 data yang dimasukkan ke dalam lembar kerja *excel* pada sistem koordinat *x-y* yang merupakan hubungan antara tegangan geser

$\left(\frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c} \right)$ dengan keseragaman butir $\frac{D_{a50}}{D_{b50}}$ pada Gambar



Gambar 11. Sebaran data Armour layer



Gambar 12. Kurva armour layer dengan $C_u = 2,5$ pada sebaran 100 data.

11, sedangkan koefisien $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \lambda$ diperoleh dengan analisis data.

Analisis data tersebut adalah dengan membuat kurva yang dapat mewakili rangkaian sebaran data tersebut melalui metode selisih kuadrat terkecil (*least square method*).

Metode tersebut memungkinkan untuk membuat kurva yang paling mendekati titik-titik data, yaitu dengan meminimalkan selisih antara titik-titik data dengan kurva. Adapun langkah analisis sebagai berikut:

1. Persamaan lapisan pelindung tak berdimensi dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{D_{a50}}{D_{b50}} = \alpha \left(\frac{(\tau_o - \tau_c)}{\tau_c} - \theta \right)^\beta (C_u - \lambda)^r \quad (18)$$

2. Pada persamaan tersebut dicari nilai selisih titik data dengan kurva yaitu E adalah

$$E = \frac{D_{a50}}{D_{b50}} - \left[\alpha \left(\frac{(\tau_o - \tau_c)}{\tau_c} - \theta \right)^\beta (C_u - \lambda)^r \right] \quad (19)$$

3. *Running* pada setiap data (M1Q1S1) diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$E = 21,00 - \alpha (1,907 - \theta)^\beta (C_u - \lambda)^r \quad (20)$$

Dengan cara yang sama untuk setiap *running*, dari *running* 1 sampai dengan *running* 100 maka diperoleh nilai E sebagai berikut :

$$E_1 = 21,00 - \alpha [1,907 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_2 = 22,50 - \alpha [1,39 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_3 = 24,00 - \alpha [2,10 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_4 = 25,00 - \alpha [2,66 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_5 = 26,00 - \alpha [3,26 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_6 = 16,72 - \alpha [1,05 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_7 = 18,17 - \alpha [1,85 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_8 = 19,41 - \alpha [2,62 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_9 = 22,52 - \alpha [3,30 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{10} = 24,21 - \alpha [3,92 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{11} = 17,69 - \alpha [1,70 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{12} = 19,10 - \alpha [2,66 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{87} = 23,33 - \alpha [3,25 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{88} = 25,71 - \alpha [4,28 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{89} = 29,05 - \alpha [5,19 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{90} = 31,90 - \alpha [6,03 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{91} = 23,04 - \alpha [3,05 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{92} = 25,22 - \alpha [4,34 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{93} = 29,57 - \alpha [5,60 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{94} = 34,35 - \alpha [6,69 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{95} = 34,78 - \alpha [7,80 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{96} = 25,00 - \alpha [3,49 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{97} = 26,67 - \alpha [4,89 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{98} = 30,83 - \alpha [6,21 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

$$E_{99} = 33,33 - \alpha [7,44 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r \quad E_{100} = 34,17 - \alpha [8,57 - \theta]^\beta [C_u - \lambda]^r$$

Selanjutnya dilakukan analisis optimasi dengan memakai *Excel Solver* pada 100 persamaan.

Dari analisis optimasi *Excel Solver* diperoleh nilai optimal disetiap sel, dengan nilai koefisien optimasi $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \lambda$ adalah

$$\alpha = 13,590$$

$$\beta = 0,410$$

$$\gamma = 0,100$$

$$\theta = 1,220$$

$$\lambda = 1,500$$

sehingga rumus tebal lapisan pelindung (*armour layer*) adalah:

$$\frac{D_{a50}}{D_{b50}} = [13,59 \left(\frac{\tau_0 - \tau_c}{\tau_c} - 1,22 \right)^{0,41} (C_u - 1,50)^{0,10}] \quad (21)$$

dengan batasan nilai adalah sebagai berikut :

1. $0,75 \text{ mm} \leq D_{b50} \leq 3,0 \text{ mm}$
2. $C_u = 2,5$
3. $\tau_0 \geq 7,85 \text{ N/m}^2$
4. $\tau_0 > \tau_c$ dengan $0,50 \text{ N/m}^2 \leq \tau_c \leq 2,75 \text{ N/m}^2$

9. Kesimpulan

Dari uraian di atas, yang mengacu pada kajian pustaka, teori, analisis hasil eksperimen dan pembahasan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Terbentuknya lapisan *armour* apabila jumlah butiran lapisan dasar yang terangkut mencapai maksimal dan tegangan geser dasar melebihi tegangan geser kritis butir atau $\tau_0 > \tau_c$ dalam hal ini nilai tagangan geser dasar lebih besar atau sama dengan $7,85 \text{ N/m}^2$, sedangkan tegangan geser kritis butir lapisan dasar τ_c antara $0,5 \text{ N/m}^2$ sampai dengan $2,75 \text{ N/m}^2$.
2. Tebal lapisan pelindung $L_a = \frac{D_{a50}}{D_{b50}}$ merupakan efek dari tegangan geser dan keseragaman ukuran butiran yang terjadi pada proses erosi permukaan dasar .

10. Daftar Pustaka

Crowe, J.C. and Lu Tan, 2010, An Investigation of Bed Armoring Process And The Formation of Microclusters. *Joint Federal Interagency Conference*, Las Vegas.

Hassan, M.A. and Church, M. (2000) Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed. *Water Resources Research*, 36 (7)

Proffitt, G. T. (1980). Selective transport and armouring of non-uniform alluvial sediments, Res. Rept. 80-22, Dept. Civil Eng., University of Canterbury, NZ, 203pp.

Parker, G., Klingeman, P.C., and McLean, D.L., 1982, Bedload and size distribution in paved gravel bed streams, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, v. 108, p. 544-571.

Parker, G., 1990a, Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, *Journal of Hydraulic Research*, v. 28, p. 417-436.

Pitlick, J.; Mueller, E.R.; Segura, C.; Cress, R.; Torizzo, M. 2008. Relation between flow, surface-layer armoring and sediment transport in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*. 33: doi: 10.1002/esp.1607.

Shen, H. W. and LU, J-Y (1983). Development and prediction of bed armouring, *Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, J. Hydraul. Eng.*, 109(HY4), 611-629.

Wilcock, P.R., 2001, Toward a practical method for estimating sediment-transport rates in gravel-bed rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, p. 1395-1408.

Wilcock, P.R. and J.C. Crowe, 2003, Surface-based transport model for mixed size sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 129, p. 120-128.

Wilcock, P.R. and J.C. Crowe, 2005, Effect of sand Supply on transport rates in a gravel bed channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 131, no.11 : 961-967.

Wolman, M.G. 1954. A method of sampling coarse river-bed material. American Geophysical Union Transactions. 35: 951-956.