

## Efek Tegangan Geser Dasar yang Terjadi pada Lapisan Pelindung Terhadap Karakteristik Kemiringan 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

*Armouring adalah suatu proses terbentuknya lapisan pelindung (armour layer) di dasar sungai yang diawali dari pergerakan sedimen dasar (bedload) sampai terjadinya erosi permukaan dasar (eroded surface) sehingga tercapai lapisan dasar yang stabil atau kondisi equilibrium yaitu tidak ada lagi sedimen dasar (bedload) yang terangkut. Armour layer merupakan jenis gravel dengan susunan gradasi butir yang hampir seragam terletak di permukaan dasar dan menghambat gerak bedload yang melintas di atasnya. Penelitian dilakukan di laboratorium Hidraulika PS-IT UGM, menggunakan perangkat utama sediment recirculacy flume pada dinding terbuat dari plexiglass dengan dimensi panjang 10,00 m, lebar 0,60 m, tinggi 0,45 m. Kemiringan dasar saluran yaitu 1%, 1,4%, 1,8%, 2,2%, dan 2,6%. Debit aliran konstan pada kapasitas 25 l/s, 30 l/s, 40 l/s dan 45 l/s. Material berupa pasir dan gravel dicampur merata, dengan 5 variasi grain size yang berbeda. Pada tiap running terdapat 2 fase kejadian yaitu fase eroded surface dan fase equilibrium. Instrumen yang digunakan pada saat running adalah digital currentmeter, point gauge, sediment traps. Pada saat proses eroded surface, struktur armour layer nampak semakin kokoh di permukaan karena tegangan geser yang dimiliki butir armour lebih besar dari tegangan geser dasar, jadi butir armour merupakan struktur butir sedimen yang memiliki critical shear stress lebih besar dari bed shear stress.*

**Kata-kata Kunci :** *Shear stress, kemiringan dasar, armour layer, grainsize, flume*

### Abstract

*Armouring is one of the development processes of armour layer on the base of a river, started from the movement of the transported base sediment of eroded surface reaching to stabile base layer condition or equilibrium, where there is no more transported base sediment. Armour layer is a type of gravel with almost uniform composition of granule gradation in surface base position which hampers the sediment moving above it. This research was carried out at the Hydraulic Laboratory of PS-IT UGM, using the main infrastructure of sediment recirculacy flume on the wall made from plexiglass in 10.00 m length, 0.60 m width, and 0.45 m height. The base slopes were 1%, 1.4%, 1.8%, 2.2%, and 2.6%. The flow debit was constant at 25 l/s, 30 l/s, 40 l/s and 45 l/s capacities. The material consisted of sand and gravel which was evenly mixed within 5 different variations of grainsize. At each running, there were two phases of eroded surface and equilibrium. The instruments used during the running were digital current meter, point gauge, sediment traps. Within the eroded surface process, the armour layer structure looked standing out in the base surface due to the granule critical shear stress of armour that was larger than the base shear stress, thus the armour layer was the structure of sediment granule with larger critical shear stress than bed shear stress.*

**Keywords:** *Shear stress, base slope, armour layer, grainsize, flume*

### 1. Pendahuluan

Aliran *clear water* yang mengalir pada saluran atau sungai dengan dasar *gravel*, akan mengangkut sedimen sampai dengan tercapai kondisi dasar yang statis. Sedimen yang

terangkut terhambat pergerakannya di permukaan yang kasar, mengakibatkan sebagian sedimen tetap tertahan atau berlindung diantara rongga-rongga butir. Butiran tersebut memiliki ukuran sedimen berdiameter besar, sebagai *armour layer* pada sedimen halus di bawahnya.

*Armour layer* memiliki ukuran butir yang hamper seragam, namun bergradasi butir yang bervariasi diantara butiran penyusunnya. Struktur *armour layer* yang terbentuk, didasarkan pada besarnya tegangan geser dasar selama proses degradasi, yang digambarkan pada grafik distribusi *grain size*. Nampak bahwa struktur lapisan *armour* memiliki ukuran butir yang lebih besar dari pada lapisan di bawahnya (*substrate*). Butiran *armour* akan menghambat gerak sedimen yang melintas sehingga terjadi pertukaran butir antar fraksi disekitar rongga lapisan *armour* pada peristiwa *interlocking* dan *placement* sedimen yang bergerak pada aliran rendah.

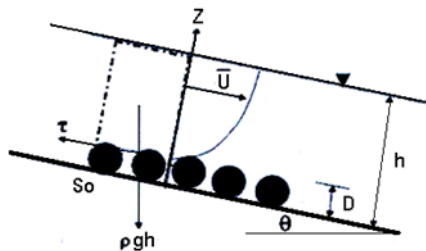
**2. Pustaka**

Para pakar sedimen seperti Wilcock (2001) menyebutkan bahwa pembentukan *armour layer* didasarkan pada perbedaan tegangan geser yang terjadi pada fraksi pasir dan *gravel*. Wilcock (2003) mengembangkan suatu hubungan antara *bedload* dengan lapisan *armour* serta *substrate* yang tergambar pada distribusi *grain size* secara keseluruhan, termasuk adanya butir pasir yang mengisi *gravel* pada saat terjadi angkutan sedimen. Curran and Wilcock (2005) melakukan eksperimen flume dengan intensitas debit yang besar dan mengukur *bedload* yang terangkut dan tertinggal di lapisan *armour*. Curran dan Tan (2010) meneliti tentang formasi klaster *armouring*. Struktur *armour layer* yang terbentuk merupakan campuran *gravel* dan pasir yang tersortir secara periodik.

**3. Tegangan dasar**

**3.1 Shear stress**

Analisis *shear stress* pada kondisi *uniform flow* pada **Gambar 1**. sebagai berikut;



**Gambar 1. Profil gaya pada bidang miring**

Aliran *uniform* pada saluran terbuka pada **Gambar 1** sebagai berikut;

1. Sudut kemiringan dasar saluran ( $\theta$ ) relatif kecil maka  $\sin(\theta) \approx \tan(\theta) = S_o$ , dengan  $S_o$  adalah kemiringan dasar saluran.
2. Saluran dengan penampang segi empat.
3. Kedalaman aliran ( $h$ ) adalah jauh lebih besar dari diameter butir ( $D$ ).
4. Kondisi aliran merupakan aliran *turbulent uniform flow*.

5. Profil kecepatan rata-rata menurut hukum *logaritmik (log-law)*.

Pada aliran *turbulent*, persamaan tegangan geser adalah;

$$\tau_t = \rho g R \sin(\theta) = \rho g R S_o \tag{1}$$

dengan  $\tau_t = \rho u_*^2$

$\tau_t$  adalah tegangan geser *turbulent*

$g$  adalah percepatan gravitasi

$\rho$  adalah massa jenis air

$u_*$  adalah kecepatan geser

$$u_* = \sqrt{g R S_o} \tag{2}$$

**3.2 Angkutan sedimen dasar (Bedload)**

Sedimen dasar yang terangkut merupakan jumlah dari fraksi butir yang lepas dari permukaan dasar dan bergerak. Jumlah sedimen dasar total yang terangkut persatuan lebar dirumuskan;

$$q_{bT} = \sum_{i=1}^N q_{bi} \tag{3}$$

Sedangkan rasio sedimen yang terangkut merupakan perbandingan jumlah sedimen yang terangkut tiap fraksi butir dengan jumlah totalnya yang dirumuskan;

$$P_{bi} = \frac{q_{bi}}{q_{bT}} \tag{4}$$

Pada tegangan geser untuk non dimensional *grainsize* spesifik *Shields number* dirumuskan;

$$\tau_* = \frac{\tau_b}{\rho R g D_i} \tag{5}$$

dengan

$$\tau_b = \rho g R S \text{ atau } \tau_b = \rho u_*^2$$

sehingga besarnya tegangan geser non dimensional dirumuskan;

$$\tau_i^* = \frac{\rho u_*^2}{\rho R g D_i} = \frac{u_*^2}{R g D_i} \tag{6}$$

Sedimen dasar yang terangkut akan bergerak dengan cara *sliding*, *rolling* dan *saltating*. Besarnya  $q_b$  diasumsikan akan senantiasa meningkat jika aliran kuat pada kedalaman rata-rata kecepatan ( $\bar{U}$ ) atau pada tegangan geser batas (*boundary shear stress*)  $\tau_b$ . Pada non dimensional *Einstein bedload number* ( $q_{bi}$ ) untuk

untuk setiap fraksi butir dirumuskan  $q_{bi}^* = \frac{q_{bi}}{\sqrt{RgD_i D_i F_i}}$

hubungan *Einstein bedload number* ( $q_{bi}^*$ ) non dimensional dengan *grainsize spesifik Shield number* dirumuskan  $q_{bi}^* = (\tau^*)^{\frac{3}{2}}$ . Jadi jumlah sedimen yang

terangkut pada non dimensional dirumuskan;

$$W^* = \frac{[\tau_i^*]^{\frac{3}{2}}}{q_{bi}^*} \text{ atau } W^* = \frac{[\frac{u_*^2}{RgD_i}]^{\frac{3}{2}}}{\frac{q_{bi}}{\sqrt{RgD_i D_i F_i}}} \text{ maka } W^* = \frac{u_*^3 F_i}{Rgq_{bi}} \quad (7)$$

pada persamaan tersebut dapat dicari besarnya diameter fraksi butir ( $F_i$ ) *armour* dirumuskan;

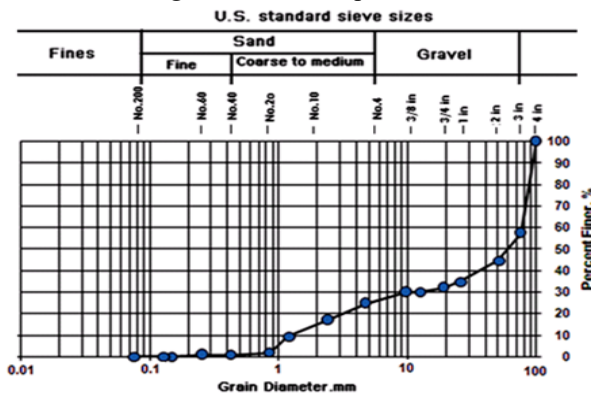
$$F_i = \frac{W^* Rgq_{bi}}{u_*^3} \text{ atau } F_i = \frac{W^* Rgq_{bi}}{u_*^3} p_{bi} \quad (8)$$

dengan  $W^*$  merupakan bilangan non dimensional jumlah sedimen yang terangkut,  $W^*$  juga merupakan

fungsi dari  $\tau_i^* = \frac{u_*^2}{RgD_i}$  maka  $F_i = \frac{W^* [\frac{u_*^2}{RgD_i}] Rgq_{bi}}{u_*^3} p_{bi} \quad (9)$

#### 4. Metode

Pada percobaan ini menggunakan flume segi empat yang dimodifikasi dengan *send feeder*. Pada penelitian ini, sedimen diambil dari sungai kemudian dilakukan analisis saringan dengan *sieve analysis* dan diperoleh hasil distribusi *grain size* sesuai pada **Gambar 2**.



**Gambar 2. Grain size material dasar sungai**

Sedimen dasar yang digunakan, dicampur dengan perbandingan berat 70% *gravel* dan 30% pasir, dipasang di dasar flume secara merata dengan batas kedalaman 150 mm dari batas dasar. Metode *flume* pada percobaan sedimen dasar ini adalah suatu metoda yang dipakai untuk mengamati dan mengukur sedimen dasar yang terangkut dan tertinggal di atas dasar permukaan kasar (*gravel*) pada jenis aliran *steady univorm flow* (debit konstan) pada aliran rendah (*low flow*). Sedimen yang tertinggal di flume memiliki gradasi yang kasar (*gravel*) sebagai respon dari tegangan geser aliran tersebut.

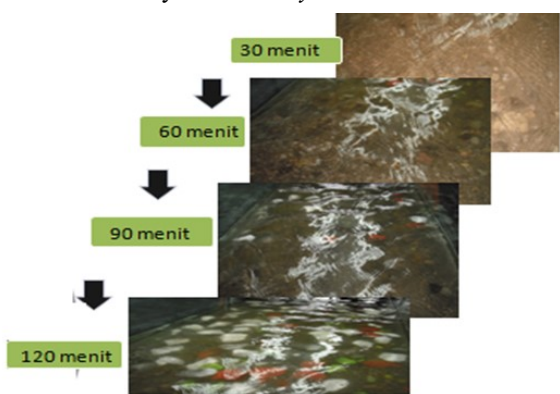
Penelitian menggunakan *a small, tilting, sediment feed flume* dengan dimensi panjang 10,0 m, tinggi 0,45 m,

dan lebar flume 0,6 m. Kaca flume terbuat dari plexiglass yang jelas dan bersih, yang memungkinkan pengamatan langsung terhadap angkutan sedimen **Gambar 3**. Pada sistem sirkulasi air *flume*, dilakukan *feeding* sedimen dari arah hulu dan pada bagian hilir di beri kotak saringan sebagai tangkapan sedimen (*sediment trap*). Pada umumnya pengamatan melibatkan 3 orang selama *running*, pengamatan di hulu flume, di hilir *flume* dan di posisi *sediment trap*. Tahapan *running* pada pelaksanaan penelitian, terdiri dari dua fasa yaitu degradasi dan *equilibrium* **Gambar 4**.



**Gambar 3. Sediment feed flume**

Fase degradasi ditandai dengan pengangkutan sedimen secara besar-besaran sampai dicapai pengangkutan maksimal, selanjutnya akan berkurang sampai diperoleh keseimbangan dinamis (*equilibrium*) yaitu ketika jumlah sedimen *inflow* (*feeding*) di hulu pada selang waktu tertentu menyamai jumlah sedimen *outflow* yang tertangkap oleh *sediment trap* di hilir *flum*. Sedimen yang terangkut ditangkap di *sediment trap* setiap interval 2 menit, kemudian ditimbang dan dibuat grafik transport sedimen. Pengukuran terus dilakukan sampai tercapai kondisi *equilibrium* yang ditandai dengan mulai terbentuknya *armour layer* **Gambar 4**.



**Gambar 4. Running**

Pada saat awal eksperimen dimulai, ditandai dengan tercapainya kondisi aliran yang *uniform flow*, kemiringan dasar saluran diatur sesuai rencana (1% sampai dengan 3%) 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 kedalaman aliran yang berbeda. Perbedaan kedalaman (variasi kedalaman) pada saluran disebabkan terjadinya degradasi dasar saluran, lalu dilakukan pengukuran

kedalaman dan penangkapan sedimen yang terangkut di hilir *flume*.

*Running* terus dilakukan sampai sedimen yang tertangkap semakin berkurang, hingga mencapai 1% dari berat awal sebaran di hulu, untuk lebih jelasnya kami sampaikan bagan alir skema pelaksanaan penelitian **Gambar 5**.

**5. Pembahasan**

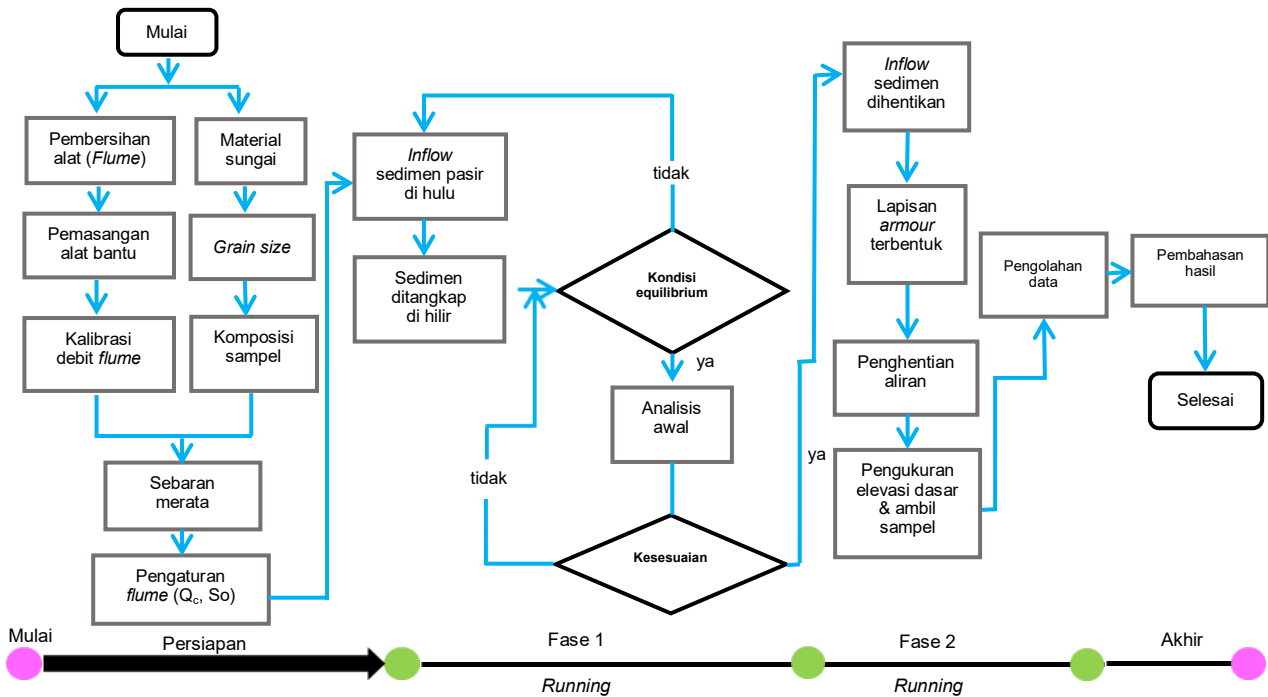
**5.1 Komposisi sedimen *bedload* yang terangkut**

Komposisi sedimen *bedload* ditentukan selama berlangsungnya eksperimen yang diperoleh dengan menangkap sedimen yang terangkut di hilir *flume*. Perubahan pada distribusi ukuran butir mencerminkan perubahan tegangan geser yang terdapat pada sedimen dasar (*armour layer*) tersebut. Distribusi ukuran butir

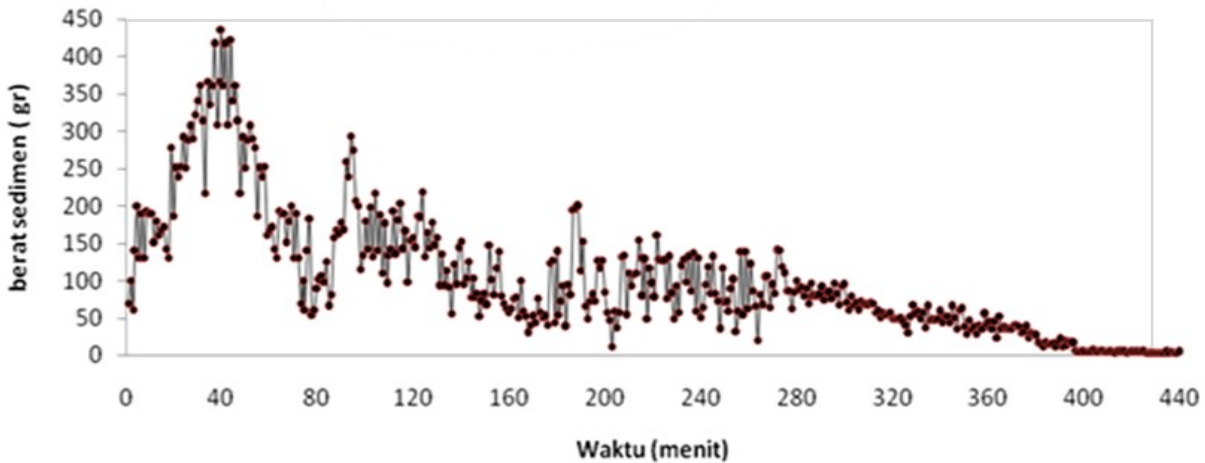
sedimen khususnya butiran kasar yaitu *armour* ( $F_i$ ) sudah mulai nampak pada dasar permukaan pada saat *running* sudah mencapai 160 menit sampai dengan akhir eksperimen, seperti pada **Gambar 6**.

Pada saat awal pelaksanaan *running*, sudah terjadi peningkatan jumlah sedimen yang terangkut dan menunjukkan kecenderungan bahwa sedimen yang terangkut meningkat namun masih dibawah rata-rata ukuran medium.

Pada percobaan yang dilakukan dengan berbagai kondisi yang berbeda, percobaan 1(energi gradien awal curam) dan percobaan 2 (energi gradien awal tengahan), sedimen yang terangkut menunjukkan pola yang sama yaitu ukuran butirnya antara 0.35 mm sampai dengan 5.6 mm. Pada akhir fase *running* nampak sedimen yang



**Gambar 5. Skema pelaksanaan penelitian**

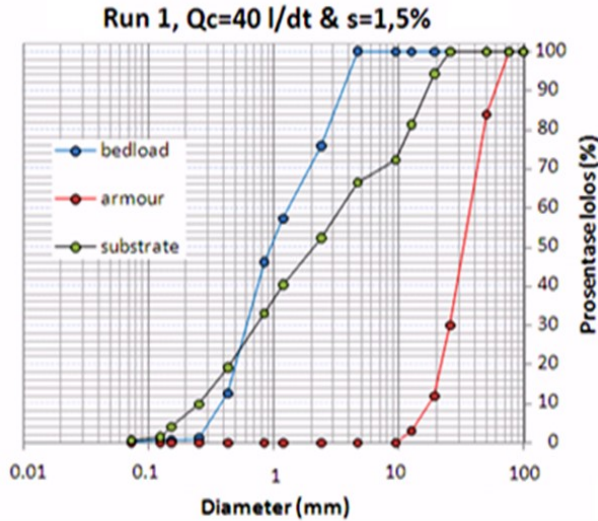


**Gambar 6. Sedimen yang terangkut**

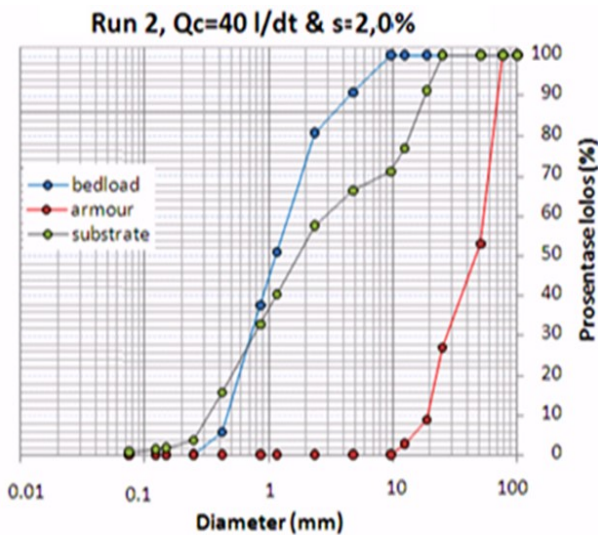


halus bersembunyi diantara butiran yang kasar, tinggal dan berlindung di bawah *armour layer*.

Untuk mengetahui perubahan distribusi ukuran *bedload* dan prosentase fraksi ukuran butir dengan cara diplotkan pada grafil logaritmik pada **Gambar 7(a,b)** untuk debit aliran yang konstan. Pada kemiringan yang curam, semua ukuran butir di bawah ukuran rata-rata mengalami pengurangan.



Gambar 7(a). Grain size bedload



Gambar 7(b). Grain size bedload

Sedangkan ukuran butir di atas rata-rata akan semakin bertambah. Jadi pembentukan struktur *armour layer* senantiasa berbeda pada setiap proses kemiringan.

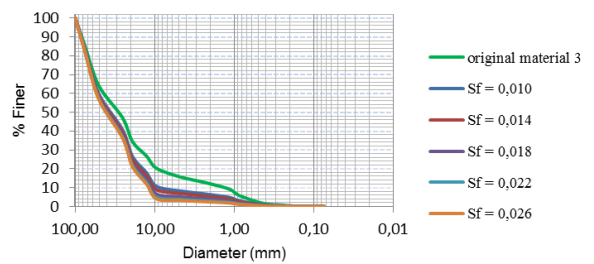
### 5.2 Variasi kemiringan dasar saluran dan tebal *armour layer*

Hasil pengamatan dan pengukuran yang dilakukan pada tiap *running* disajikan pada tabel dan grafik *grain size* untuk tiap variasi material. Hasil *running* material M3 pada variasi debit dan kemiringan dasar disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil eksperimen pada M3

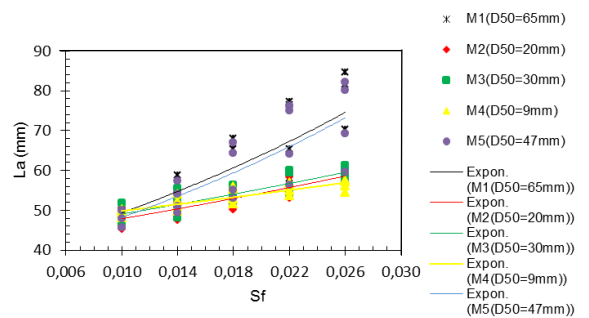
Run	Q (m <sup>3</sup> /s)	S	h (mm)	R (mm)	τ (N/m <sup>2</sup> )	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	Cu	Cc	La (mm)
M3Q1S1	25	0,01	80	63,2	6,2	50	21	13	3,8	0,7	46,3
M3Q1S2	25	0,014	70	56,8	7,8	51	22	14	3,6	0,7	48,1
M3Q1S3	25	0,018	65	53,4	9,4	53	23	15	3,5	0,7	51,8
M3Q1S4	25	0,022	60	50,0	10,8	54	24	16	3,4	0,7	54,3
M3Q1S5	25	0,026	55	46,5	11,8	55	25	17	3,2	0,7	57,6
M3Q2S1	30	0,01	90	69,2	6,8	50	20	14	3,6	0,6	47,8
M3Q2S2	30	0,014	80	63,2	8,7	52	21	15	3,5	0,6	50,1
M3Q2S3	30	0,018	75	60,0	10,6	54	22	16	3,4	0,6	53,9
M3Q2S4	30	0,022	70	56,8	12,2	56	23	16	3,5	0,6	54,3
M3Q2S5	30	0,026	65	53,4	13,6	58	24	17	3,4	0,6	58,3
M3Q3S1	40	0,01	110	80,5	7,9	50	20	13	3,8	0,6	49,6
M3Q3S2	40	0,014	100	75,0	10,3	53	21	14	3,8	0,6	53,1
M3Q3S3	40	0,018	90	69,2	12,8	55	22	15	3,7	0,6	55,0
M3Q3S4	40	0,022	85	66,2	14,3	57	23	16	3,6	0,6	59,4
M3Q3S5	40	0,026	80	63,2	16,1	60	24	17	3,5	0,6	59,9
M3Q4S1	45	0,01	120	85,7	8,4	50	22	13	3,8	0,7	51,8
M3Q4S2	45	0,014	110	80,5	11,0	53	23	14	3,8	0,7	55,6
M3Q4S3	45	0,018	100	75,0	13,2	55	24	15	3,7	0,7	56,3
M3Q4S4	45	0,022	90	69,2	14,9	58	24	16	3,6	0,6	60,1
M3Q4S5	45	0,026	85	66,2	16,9	60	25	17	3,5	0,6	61,3

Grafik grain size armour M3 (Q:25 l/s)



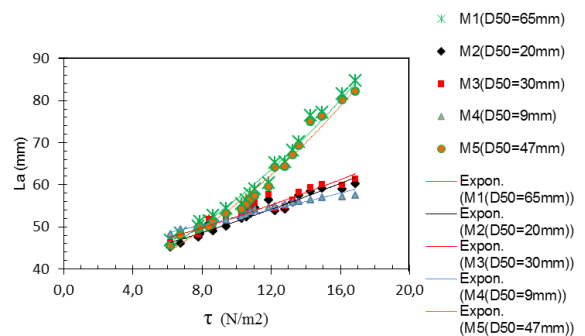
Gambar 8. Grain size armour M3 (Q:25 l/s)

Grafik hubungan antara kemiringan dasar dengan *armour layer* untuk semua material.



Gambar 9. Hubungan antara kemiringan dasar dengan *armour layer*

Grafik hubungan antara tegangan geser terhadap *armour layer* untuk semua jenis material.



Gambar 10. Hubungan antara tegangan geser terhadap *armour layer*

## 6. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian adalah sebagai berikut :

1. Karakteristik pembentukan *armour layer* dipengaruhi oleh kemiringan dasar saluran yang berdampak pada peningkatan nilai tegangan geser.
2. Pembentukan *armour layer* terjadi bila sedimen yang terangkut sudah mencapai maksimal selanjutnya berkurang secara bertahap sampai mendekati nol, maka sedimen yang tertinggal di permukaan dasar (*surface*) nampak jelas dan memiliki ukuran diameter butir hampir seragam.
3. Rongga pada struktur *armour* sebagai tempat untuk pertukaran antar butir yang mengakibatkan terjadinya *interlocking* dan *placement*.
4. Pada saat proses *eroded surface*, struktur *armour layer* nampak semakin kokoh di permukaan karena tegangan geser yang dimiliki butir *armour* lebih besar dari tegangan geser dasar, jadi butir *armour* merupakan struktur butir sedimen yang memiliki *critical shear stress* lebih besar dari *bed shear stress*.
5. Rumus 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 kritik 0,61 N/m<sup>2</sup> sampai dengan 2,7 N/m<sup>2</sup> dan tegangan geser dasar minimal 6 N/m<sup>2</sup>.

## 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. S
- 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.