

PENINGKATAN BED SHEAR STRESS YANG BERDAMPAK LINIER TERHADAP STABILITAS DASAR SUNGAI

Cahyono Ikhsan¹, Siti Qomariyah², Solichin³

^{1,2,3} Staf Pengajar, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir.Sutami 36/a Surakarta

Email: cahyono1970@yahoo.co.id

Abstrak

Aliran air jernih (*clear water*) yang mengalir pada saluran dengan dasar *bed load*, akan menggerakkan partikel pada ukuran butir tertentu dan dengan kemiringan serta tingkat hambatan tertentu sampai tercapai kondisi sedimen dasar yang statis. Sebagian sedimen tetap tertahan atau terlindung diantara rongga lapisan *armour*. Lapisan *armour* memiliki ukuran butir yang dominan pada struktur sistim lapisan dasar sungai. Ada beberapa hal yang ingin disajikan pada paper ini, tentang mekanisme terbentuknya dan tebal optimal *armour layer* secara linier berdampak pada stabilitas struktur dasar sungai. Penelitian ini dilakukan di laboratorium Hidraulika menggunakan perangkat utama *sediment-recirculating flume* dari plexiglass berdimensi lebar 0,60 m, panjang 10,00 m, tinggi 0,45 m serta dengan kemiringan dasar yang bervariasi dimulai dari 1% sampai 3%. Debit aliran konstan pada kapasitas bervariasi antara 30 l/s sampai dengan 45 l/s. Material granular yang dipakai dicampur dengan komposisi 70% gravel, 30% pasir. Running dilakukan pada debit aliran *low flow* pada 2 fase yaitu fase *equilibrium* dan fase *armour*. Instrumen yang digunakan antara lain digital *currentmeter*, *point gauge meter*, *sediment feeder*, *sediment trap*, dan dibantu software *surfer 8.0*. Hasil penelitian tersebut dapat menggambarkan *armour layer* didasarkan pada perubahan kemiringan dasar, peningkatan tegangan geser secara linier berdampak pada peningkatan tebal *armour layer* yang berpengaruh pada stabilitas dasar.

Kata kunci : *shear stress, armour layer, bedload, grain size, flume*

Pendahuluan

Sungai, terutama arus sungai yang mengalir di atas lapisan alluvial merupakan suatu sistem yang dinamik. Sungai selalu memberikan respon terhadap aktifitas alami dan manusia guna mencapai kondisi perubahan keseimbangan yang baru. Perubahan yang terjadi pada sungai dapat berupa perubahan kondisi aliran, dimana kondisi tersebut dapat berdampak pada:

1. Peningkatan kecepatan dan turbulensi aliran akibat kontraksi aliran sebagai dampak adanya bangunan air di sungai.
2. Terbentuknya pusaran aliran (*vortex*) disekitar pilar jembatan, tembok pangkal jembatan atau tembok pelindung tebing.

Keberadaan bangunan infra struktur di hulu sungai juga dapat menimbulkan problem erosi dasar yaitu menurunnya elevasi dasar sungai di suatu ruas tertentu, yang menyebabkan:

1. Pasokan muatan sedimen yang masuk ke ruas tersebut jauh lebih kecil dari pada kemampuan mengangkut sedimen.
2. Pengambilan material dasar sungai dengan volume yang lebih besar dari pada pasokan sedimen yang masuk.
3. Hilangnya lapisan pelindung di dasar sungai.

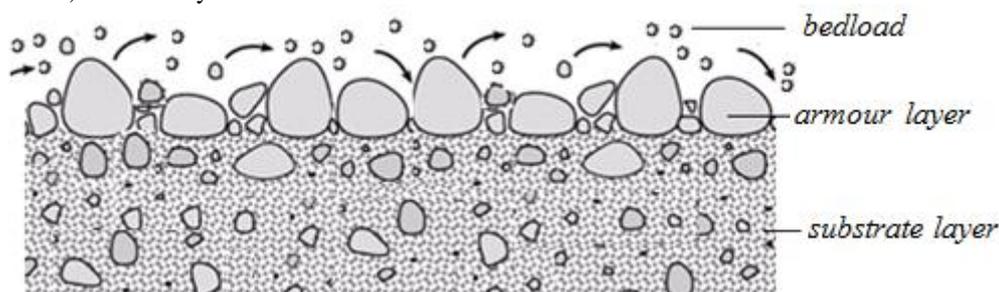
Sungai akan senantiasa mencari keseimbangan alur yang baru, sehingga alur tersebut cenderung berpindah-pindah disebabkan dasar sungai yang labil, maka keberadaan lapisan *armour* sangat dibutuhkan untuk meningkatkan stabilitas dasar sungai. Keberadaan lapisan pelindung pada umumnya terdapat pada sungai dengan dasar kasar atau *gravel* yang melapisi sedimen halus dibawahnya dengan ukuran butir yang lebih besar.

Struktur lapisan *armour* merupakan hasil dari campuran *gravel bed* dan pasir yang tersortir secara periodik, dimana sedimen yang halus terangkut, sedangkan sedimen yang kasar tetap tinggal. Lapisan permukaan yang kasar membentuk lapisan *armour* secara berkelompok, terstruktur kokoh dan melindungi lapisan di bawahnya (*substrate*).

Pembentukan lapisan *armour* terjadi dari proses degradasi dasar yang terjadi pada aliran rendah (*low flow*). Kondisi tersebut diawali dengan proses pengkasaran permukaan, perkerasan lapisan sampai dengan terbentuk

stabilitas dasar. Struktur lapisan *armour* lebih kasar dari lapisan yang berada di bawahnya (*substate layer*). Sedangkan sedimen yang senantiasa bergerak (*bedload*) memiliki kandungan butir yang halus.

Struktur lapisan tersebut memiliki ukuran butir bervariasi yang membentuk sistem lapisan sedimen dan dikelompokkan pada tiga komponen yang terpisah, Gambar 1. Komponen pertama adalah *bedload*, merupakan sedimen yang senantiasa bergerak melompat, menggelinding, bergeser di dasar. Komponen kedua adalah lapisan *armour* memiliki *grain size* paling kasar dengan ketebalan seragam, lapisan tersebut sebagai lapisan pelindung (*armour*) di bawahnya.



Gambar 1. Sistem lapisan sedimen

Komponen ketiga adalah lapisan dasar sedimen yang berada di bawah lapisan *armour* yaitu *substrate layer*, terdiri dari campuran partikel halus dan kasar dengan jumlah partikel halus lebih banyak dari partikel kasar, maka lapisan tersebut merupakan material dasar halus.

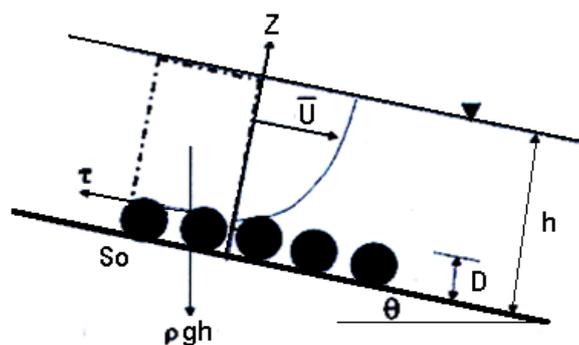
Karakteristik komponen sistem lapisan sedimen yang dimiliki pada masing-masing sungai adalah berbeda. Hal ini dapat diketahui dari kurva distribusi *grain sizes* sampel yang diambil dari dasar dan merupakan sistem lapisan sedimen pada tiga bagian berbeda yaitu *bedload layer*, *armour layer* dan *substrate layer*. Adapun topik pada penelitian ini adalah bagaimana mekanisme terbentuknya lapisan *armour* tersebut dan perubahan susunan *grain size* yang terjadi pada lapisan *armour* yang berpengaruh terhadap stabilitas dasar sungai.

Dari uraian tersebut maka tujuan yang akan dicapai sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh kemiringan dasar terhadap profil *grain size* pada proses terbentuknya lapisan *armour*.
2. Mengetahui perubahan struktur lapisan dasar yang terjadi pada kondisi keseimbangan dinamis sampai dengan terbentuknya lapisan *armour*.

Kajian pustaka yang digunakan diawali dari Proffitt (1980) menyebutkan bahwa lapisan *armour* melindungi lapisan di bawahnya (*substrate*), Parker *et.al* (1982) membahas karakteristik ukuran butir pada lapisan *substrate* dengan menganalisa besarnya sedimen yang terangkut pada satu ukuran butir (*a single grain size*), Shen dan Lu (1983) mengembangkan suatu metoda untuk memprediksi distribusi lapisan *armour*. Parker (1990) mengembangkan persamaan lapisan *armour* pada tiap fraksi butir dan diameter rata-rata lapisan. Wilcock (2001) menyebutkan bahwa pembentukan lapisan *armour* didasarkan pada pemisahan pada dua fraksi butir yaitu pasir dan *gravel*. Pemisahan dua fraksi tersebut didasarkan pada pengambilan sedimen dasar. 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 kluster *armour*. Struktur lapisan *armour* yang terbentuk merupakan campuran *gravel* dan pasir yang tersortir secara periodik.

Landasan teori yang digunakan *shear stress* dan *flow resistance* pada kondisi *uniform flow* pada Gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 2. Profil gaya pada bidang miring

Uniformflow pada saluran terbuka pada gambar 2 sebagai berikut;

1. Sudut kemiringan dasar saluran (θ) relatif kecil maka $\sin(\theta) \approx \tan(\theta) = S_0$, dengan S_0 adalah kemiringan dasar saluran.
2. Saluran dengan penampang segi empat dengan asumsi ($R_h \approx h$).
3. Kedalaman aliran (h) adalah jauh lebih besar dari diameter butir (D)
4. Kondisi aliran merupakan aliran turbulen *uniform flow*
5. Profil kecepatan rata-rata menurut hukum *logaritmik (log-law)*.

Asumsi yang digunakan $R_h \approx h$ dan aliran *turbulent*, maka persamaan tegangan gesek adalah;

$$\tau_i = \rho g h \sin(\theta) = \rho g h S \tag{1}$$

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

τ_i adalah tegangan gesek *turbulent*

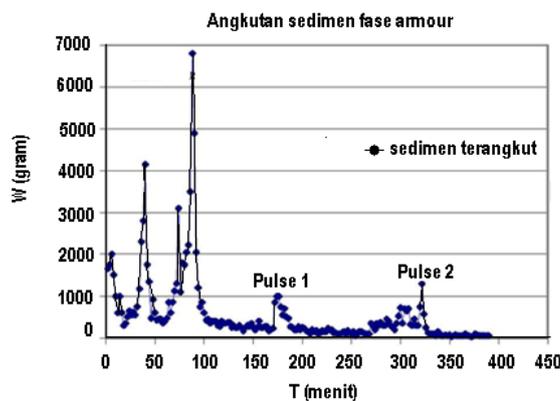
g adalah percepatan gravitasi

ρ adalah *density*

u_* adalah kecepatan gesekan

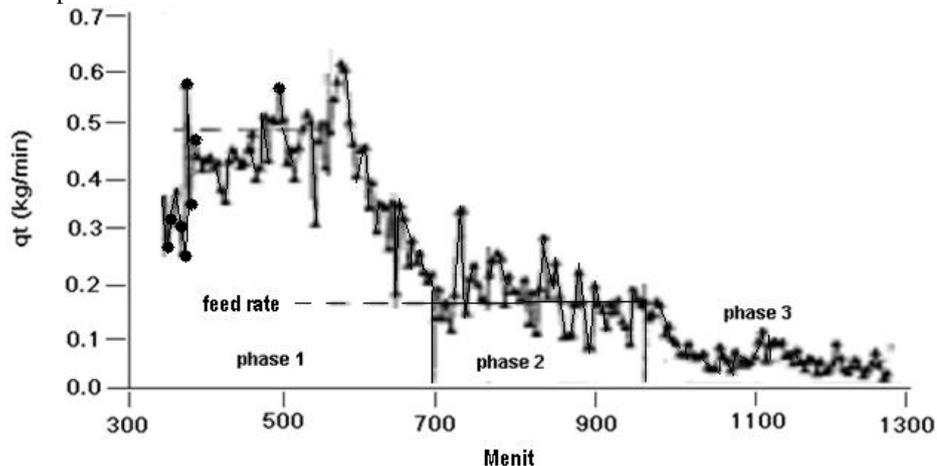
Tinjauan Pustaka

Tait *et.al* (1991) beranggapan bahwa terbentuknya lapisan *armour* apabila sedimen halus yang terangkut *outflow* di hilir *flume* kurang dari 1% dari *inflow* sedimen di hulu, atau sampai tidak ada lagi material yang terangkut, sehingga lapisan *armour* merupakan butiran material kasar yang tertinggal di *flume*. Butiran kasar tersebut berfungsi sebagai pelindung sedimen halus di bawahnya. Bila pelindung lapisan *armour* rusak, maka sedimen di bawahnya terlepas dan terangkut, yang ditunjukkan pada *pulse 1* dan *pulse 2* pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik angkutan sedimen pada kondisi *armouring*.

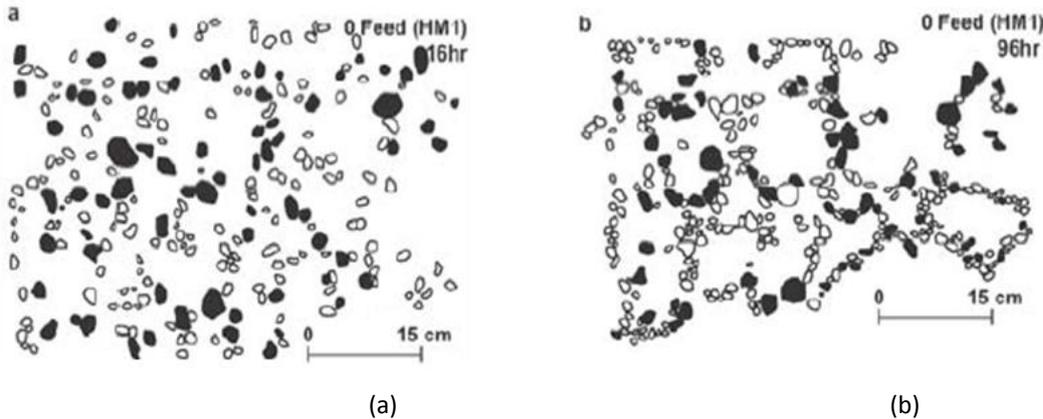
Lisle *et.al* (1993) meneliti tentang respon dasar saluran yang ditandai dengan terbentuknya kekasaran pada dasar permukaan seperti Gambar 4.



Gambar 4. Grafik sedimen yang terangkut.

Bedload yang terangkut dibagi pada 3 fase, dimana perilaku *bedload* tersebut merupakan tipikal dari percobaan degradasi. Pada *phase 1* terjadi peningkatan angkutan sedimen maksimal menit ke 600 selanjutnya terjadi pengurangan angkutan sedimen sampai menit ke 700. Pada fase tersebut terjadi degradasi dasar yang besar menyebabkan terbentuknya kekasan dasar. Pada fase 2 angkutan sedimen mendekati kondisi *equilibrium* yaitu sedimen *outflow* yang ditangkap di hilir, rata-rata mendekati sedimen yang dimasukkan (*inflow*) di hulu, pada grafik tersebut terjadi pada menit ke 700 sampai dengan menit ke 1000. Pada fase 3 *inflow* sedimen di hulu dihentikan, maka *outflow* sedimen yang terangkut semakin berkurang sampai kondisi tidak ada sedimen yang terangkut, Pada fase ini permukaan dasar semakin kasar karena kapasitas angkut sedimen yang terjadi melebihi kapasitas sedimen yang tersedia.

Hassan and Church (2000) melakukan eksperimen flume di laboratorium tentang fenomena *static armour*. Penelitian tersebut diperoleh perubahan dasar permukaan menjadi kasar, Gambar 5.a dan selanjutnya terjadi kecenderungan bahwa butiran sedimen yang kasar tersebut menyatu membentuk *clusters* dan *rings cells*, Gambar 5.b.

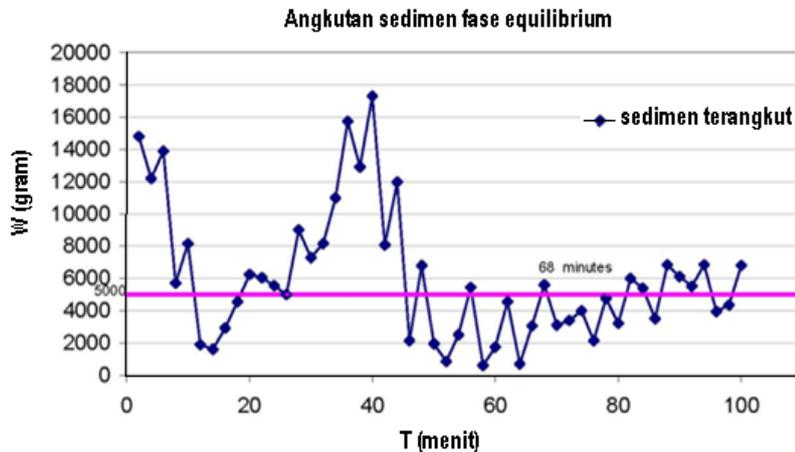


Gambar 5. *Armour* tampak atas

Kondisi tersebut terjadi ketika suplai sedimen di hulu dihentikan. Struktur tersebut merupakan lapisan *armour* terjadi penyatuan butiran sedimen kasar di dasar yang tersusun secara teratur, kokoh, dan membentuk pola tertentu melindungi sedimen di bawahnya serta sebagai hambatan (*resistence*) dasar terhadap sedimen yang melintasinya.

Wilcock (2001) meneliti lapisan *armour* dengan memisahkan dua fraksi *gravel* dan pasir, serta menentukan besarnya tegangan geser pada masing-masing fraksi tersebut. Selain itu Wilcock juga merekomendasikan persamaan untuk mengestimasi jumlah *gravel* dan pasir yang terangkut secara terpisah. Selanjutnya Wilcock *et.al* (2003) mengembangkan besarnya angkutan sedimen pada distribusi *grain size* secara keseluruhan yang diambil dari lapisan *armour*.

Wilcock and Crowe (2005) melakukan eksperimen *flume* dengan melakukan penambahan (*inflow*) sedimen dari arah hulu kemudian sedimen yang bergerak dan terangkut ke arah hilir (*outflow*) ditangkap. Keseimbangan dinamis (*equilibrium*) akan tercapai ketika jumlah sedimen rata-rata yang terangkut pada titik yang stabil yaitu jumlah sedimen yang terangkut keluar (*outflow*) pada selang waktu tertentu akan menyamai jumlah sedimen yang dimasukkan (*inflow*) di hulu *flume* sebesar 5000 gr yang terjadi pada menit ke 68 sampai dengan menit ke 100, Gambar.6.



Gambar 6. Grafik angkutan sedimen pada kondisi *equilibrium*.

Curran and Tan (2010) meneliti tentang formasi kluster *armouring* dan stabilitas dasar dengan melakukan eksperimen. *Flume* yang dipakai berdimensi panjang 9,0 m, lebar 0,6 m dan tinggi 0,5 m, serta menguji 4 campuran sedimen dasar dengan 4 debit yang berbeda. Struktur lapisan *armor* yang terbentuk merupakan campuran *gravel bed* dan pasir yang tersortir secara periodik. Tegangan geser yang menggerakkan butir halus mengakibatkan sedimen terangkut dan tertangkap di hilir, sedangkan butiran yang kasar akan tetap tinggal sebagai lapisan *armor*. Struktur lapisan tersebut memiliki permukaan kasar, mengelompok, dan terstruktur kokoh serta melindungi lapisan di bawahnya (*substrate*). Struktur lapisan *armor* juga berdampak pada meningkatnya hambatan (*resistence*) permukaan.

Schoklitsch merumuskan persamaan diameter butir material lapisan *armor* yang akan terangkut:

$$S = \left[\left(\frac{0,00021 \cdot dm \cdot B}{Q} \right) \right]^{3/4} \text{ atau } dm = \frac{4762 \cdot S^{4/3} \cdot Q}{B} \quad (2)$$

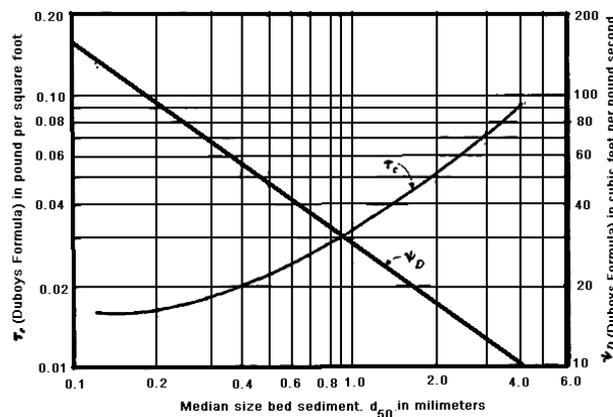
Persamaan Meyer- Peter Muler (MPM) untuk material yang terangkut pada kemiringan dasar tertentu dirumuskan:

$$S = \frac{0,19}{R} \left\{ \left(\frac{n}{d90^{1/6}} \right)^{1,5} \right\} \cdot dm \quad (3)$$

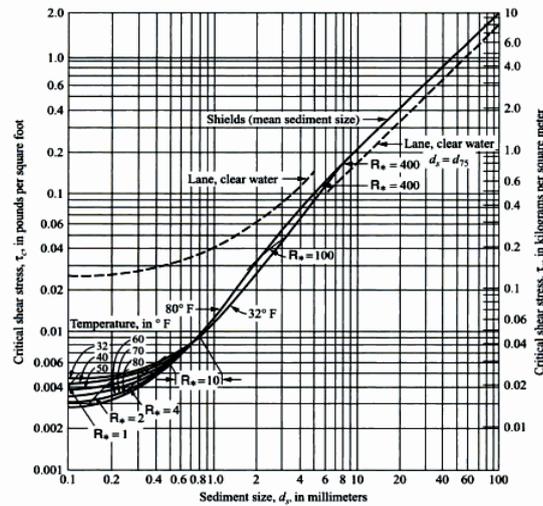
pada persamaan tersebut dapat dicari ukuran diameter butir yang akan terangkut :

$$dm = \frac{5,26 \cdot S \cdot R}{\left(\frac{n}{d90^{1/6}} \right)^{1,5}} \quad (4)$$

Hubungan tegangan geser kritis (τ) dengan diameter butir ditunjukkan pada grafik Du Boys Gambar 7 dan grafik Shields Gambar 8.



Gambar 7. Tegangan geser kritis grafik Du Boys



Gambar 8. Tegangan geser kritik grafik Shields

Tebal lapisan dasar ditunjukkan pada Gambar 9 dan dirumuskan sebagai berikut



Gambar 9. Tebal lapisan dasar

$$Y_a = y \cdot (\text{del} \cdot P) \tag{5}$$

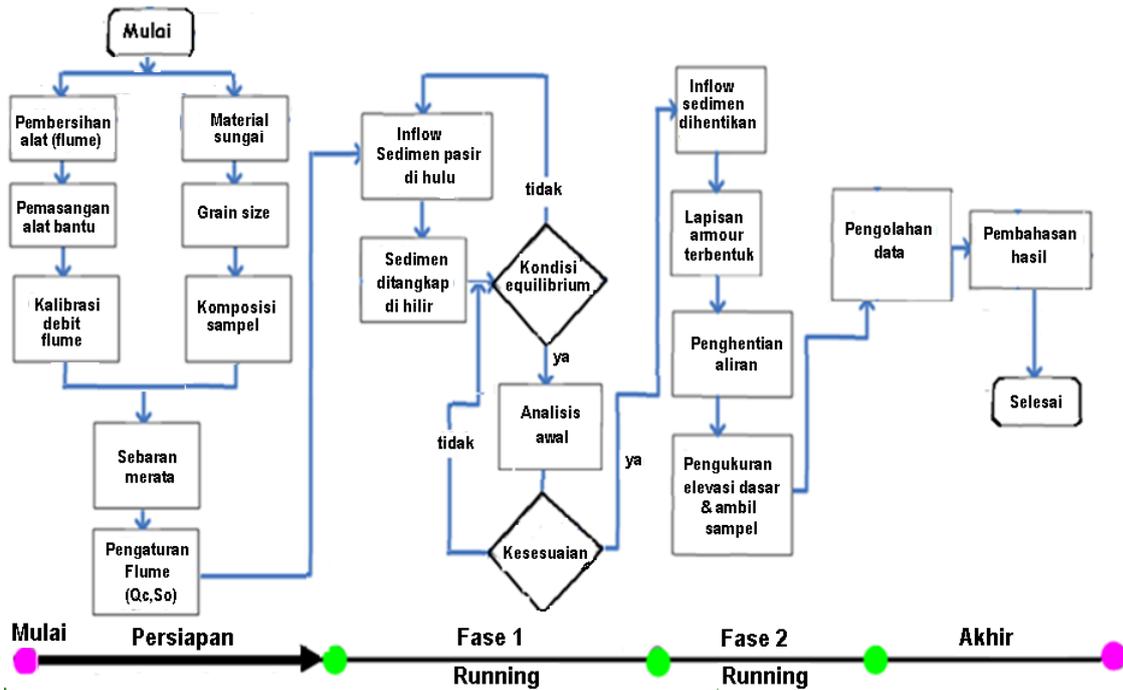
dengan :

- $[\text{del} \cdot P]$ adalah prosentase material *armour* pada analisis saringan.
- y_a adalah diameter pembentuk lapisan *armour*
- y adalah tebal lapisan *armour*

Metodologi

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Hidraulika menggunakan perangkat utama *sediment-recirculating flumeter* terbuat dari *plexiglass* berdimensi lebar 0,60 m, panjang 10,00 m, tinggi 0,45 m serta kemiringan dasar yang dapat diatur hingga 3%. *Flume* ini dilengkapi dua pompa yang berkapasitas debit 40 l/dt. Material yang dipakai dicampur dengan komposisi 70% gravel, 30% pasir. *Running* dilakukan pada debit konstan, baik pada saat debit aliran *low flow* maupun *high flow*, dan untuk setiap *ranning* terdapat 2 fase yaitu *fase equilibrium*, *fase armour*. Instrumen yang digunakan antara lain *digital currentmeter*, *point gauge meter*, *sediment feeder*, *sediment trap*, dan dibantu *software surfer 8.0*.

Sedangkan teknis pelaksanaan penelitian kami buat dalam diagram alir sebagai berikut :



Gambar 10. Diagram alir pelaksanaan penelitian

Hasil Studi dan Pembahasan Hasil Uji Laboratorium

Hasil pengamatan dan analisis data penelitian laboratorium disajikan table 1.

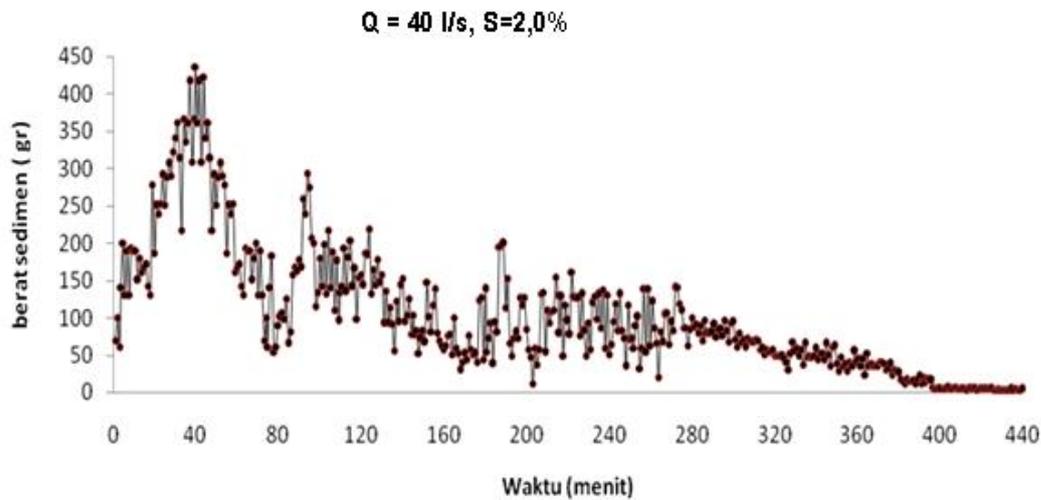
Tabel 1. Hasil pengamatan penelitian uji laboratorium

Running	1		2	
Total waktu (menit)	486		444	
Debit (Q) m ³ /dt	0.04	0.04	0.04	0.04
debit (q) m ² /dt	0.067		0.067	

Lanjutan Tabel 1

Running	1		2	
Kemiringan dasar (So) %	0.015		0.02	
Inflow sedimen (Qs) g/mt	100		100	
Ts (inflow) menit	continue		continue	
Ws (sedimen output total) gr	42043.307		45658.91	
Fase	Equilibrium	Armor	Equilibrium	Armor
Ws(sedimen output) gr	37327.46	4715.847	39467.3	6191.61
h (tinggi air di atas bedload) m	0.14	0.14	0.14	0.14
R (jari-jari hidraulik) m	0.096	0.096	0.096	0.096
U (m/dt)	0.47	0.47	0.47	0.47
Fr	0.398	0.398	0.398	0.398

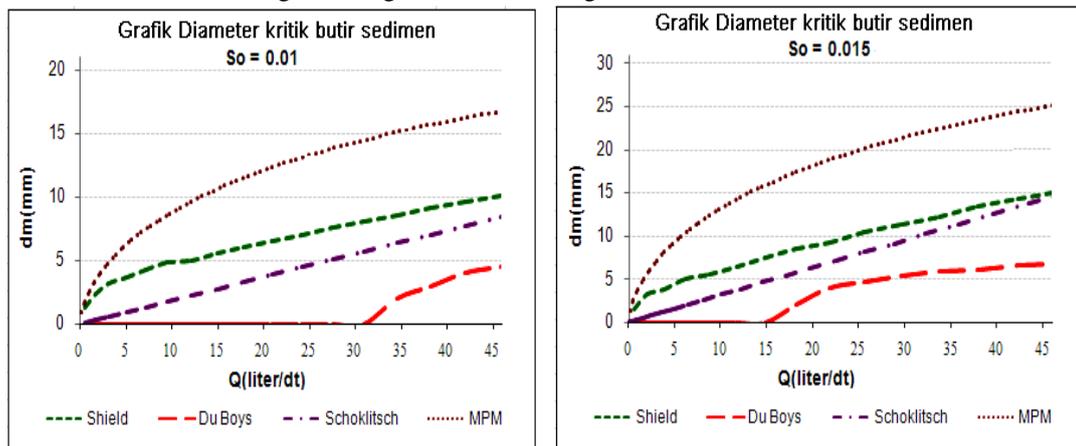
Sedangkan diagram sedimen yang terangkut adalah sebagai berikut :



Gambar 11. Sedimen yang terangkut.

Hasil Analisis Teoritis

Hasil analisis diameter butir penyusun lapisan *armour* secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 12, yaitu grafik diameter kritis butir sedimen dengan berbagai variasi kemiringan dasar.



Gambar 12. Grafik diameter butir lapisan *armour* terhadap debit

Sedangkan tebal lapisan *armour* di tunjukkan pada tabel 2 sebagai berikut :

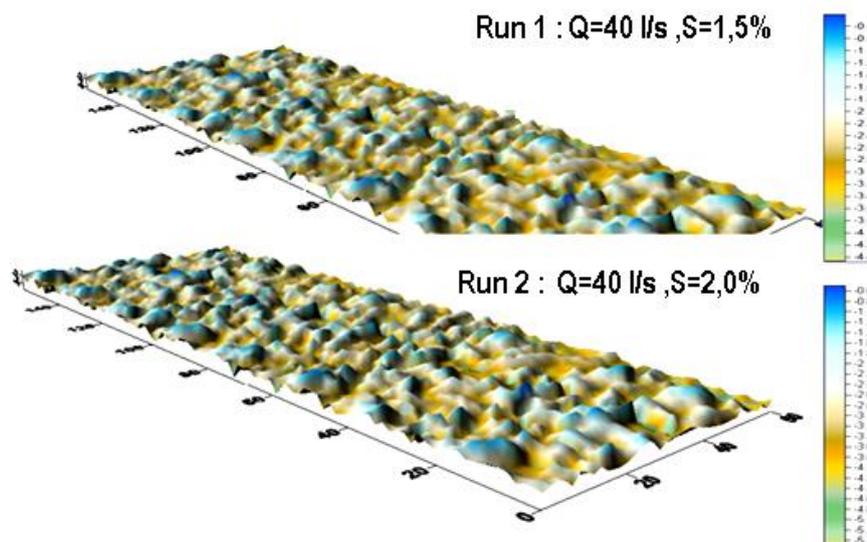
Tabel 2. Tebal lapisan *armour*

No	Kemiringan Dasar (%)	Formula	Diameter ya (mm)	del.P	y (mm)
1	1	Shields	9	0.68	13
		MPM	15	0.66	23
		Du Boys	4	0.71	6
		Schoklitsch	8	0.7	11
2	1,5	Shields	13	0.67	19
		MPM	22	0.63	35
		Du Boys	7	0.7	10
		Schoklitsch	14	0.67	21
3	2,0	Shields	17	0.65	26
		MPM	31	0.59	53
		Du Boys	10	0.68	15
		Schoklitsch	18	0.65	28

Pembahasan

Pada Gambar 11. Terjadi kondisi *equilibrium* yaitu keseimbangan rata-rata antara jumlah sedimen yang terangkut (*outflow*) dengan sedimen yang dimasukkan (*inflow*), terjadi pada menit ke 220 sampai dengan menit 280. Selanjutnya *inflow* sedimen dihentikan, maka sedimen yang tertangkut semakin berkurang hingga mencapai 1% dari berat awal sedimen *inflow*. Pada kondisi tersebut, sedimen yang tertinggal merupakan lapisan *armour* dan tercapai pada menit ke 400 sampai dengan *running* dihentikan.

elevasi permukaan dasar dilakukan dengan membuat *grid* pada area 1 cm x 1 cm dengan alat *point gauge* dan selanjutnya dianalisis dengan *software sufer 8*, Gambar 13.



Gambar. 13 Permukaan dasar (topografi $S_o : 1,5\%$ dan topografi $S_o : 2,0\%$)

Pada eksperimen tersebut diperoleh tebal lapisan *armour* berturut-turut 44 mm pada $S_o 1,5\%$ dan 54 mm pada $S_o 2,0\%$. Sedangkan pada analisis perhitungan awal diperoleh tebal lapisan *armour* 35 mm pada $S_o 1,5\%$ dan 53 mm pada $S_o 2,0\%$.

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian yang kami lakukan sebagai berikut :

1. Penelitian tersebut berhasil menggambarkan kondisi yang hampir sama antara analisis teoritis tebal lapisan *armour* dengan hasil eksperimen di laboratorium pada proses pembentukan sistim lapisan.
2. Karakteristik pembentukan lapisan *armour* dipengaruhi oleh kemiringan dasar saluran.
3. Mekanisme pembentukan lapisan *armour* diawali dengan proses pengkasaran dasar secara terus menerus, penyatuan butiran sedimen kasar sampai dengan terbentuk stabilitas dasar.
4. Pada saat sedimen dasar terangkut, maka dasar saluran akan mengalami proses degradasi, butir halus akan terangkut sedangkan butiran yang kasar tetap tertinggal membentuk lapisan *armour* melindungi sedimen halus di bawahnya.

Ucapan Terimakasih

Ucapan Terimakasih kami haturkan kepada :

1. Terimakasih kami ucapkan kepada semua pihak yang membantu proses penelitian di laboratorium Mekanika Tanah dan Hidraulika Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret dan Laboratorium PAU IT UGM.

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)

- Lisle, T.E., F. Iseya and H. Ikeda, 1993” Response of a Channel With Alternate Bars to a Decrease in Supply of Mixed-Size Bed Load”. *Water Resources Research*, v. 29, no.11 : 3623-3629.
- 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. ~'
- Proffitt, G. T. and Sutherland, A. J. (1983).`Transport of non-uniform sediments', *J. Hydraul. Res.*, 21(1), 33-43.
- Parker, G. (1990).Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 28, 417-436.
- Proffitt, G.T., and Sutherland, A.J. (1983).Transport of non-uniform sediment.*Journal of Hydraulic Research*, 21, 3343.
- 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., and Klingeman, P.C., 1982, “On why gravel bed streams are paved”, *Water Resources Research*, 18(5), 1409-1423.
- 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., 1993, “Response and recovery of a subalpine stream following a catastrophic flood”, *Geological Society of America Bulletin*, v. 105, p. 657
- Sutherland, A.J. (1987) Static armour layers by selective erosion. *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, C.R. Thorne et al., Wiley, Chichester, 243-60.
- 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.
- Tait, S.J. and Willetts, B.B (1991) Characterisation of armoured bed surfaces, *Proc. Int. Grain Sorting Seminar, Zurich*.
- 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.