

ANALISIS GERAK MULA PARTIKEL SEDIMEN KOHESIF (STUDI KASUS LUMPUR LAPINDO DI SUNGAI PORONG)

INITIAL MOTION PARTICLE ANALYSIS OF COHESIVE SEDIMENT (STUDY CASE FOR LAPINDO MUD AT PORONG RIVER)

Dery Indrawan¹⁾, M. Cahyono²⁾, Arie Setiadi Moerwanto³⁾

¹⁾Pusat Litbang Sumber Daya Air, Jl. Ir H Juanda 193 Bandung

²⁾PAU-Institut Teknologi Bandung, Jl.Ganesha 10 Bandung

³⁾Bina PSDA Direktorat Sumber Daya Air, Jl.Patimura 20 Jakarta
e-mail: der_ind@yahoo.com

Diterima: 25 Maret 2013; Disetujui: 23 Mei 2013

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan guna mengetahui gerak mula partikel lumpur Lapindo yang dicari melalui serangkaian percobaan di laboratorium hidraulik. Hal ini menjadi penting karena lumpur yang dialirkan ke Kali Porong tidak bisa terangkut ke muara dengan mudah. Tujuan penelitian ini adalah untuk memprediksi besaran debit minimal yang diperlukan agar dapat membilas lumpur yang dibuang ke Kali Porong secara hidraulik pada berbagai elevasi muka air laut. Besar nilai tegangan geser kritis, τ_{cr} material lumpur Lapindo didapatkan dengan cara melakukan percobaan gerak mula pada berbagai variasi kedalaman dan memperhitungkan lamanya lumpur mengendap. Skenario pengujian meliputi simulasi gerak mula lumpur dari mulai permukaan hingga kedalaman 3 m. Adapun lama pengendapan lumpur dalam simulasi ini dibatasi hingga 14 hari. Untuk mengetahui besar debit pembilasan dilakukan dengan cara membandingkan besarnya parameter tegangan geser kritis sedimen, τ_{cr} , dengan tegangan geser dasar aliran Kali Porong, τ_0 yang dihitung dengan bantuan model matematik. Apabila $\tau_0 > \tau_{cr}$ maka dapat dipastikan lumpur akan dapat diangkut oleh aliran Kali Porong. Apabila sebaliknya, maka akan terjadi pengendapan di ruas tersebut. Berdasarkan penelitian dapat diketahui bahwa semakin dalam dan lama pengendapan terjadi, maka debit yang diperlukan menjadi semakin besar. Debit diperlukan semakin besar apabila muka air laut sedang berada pada kondisi pasang. Hasil model menunjukkan besaran debit minimum yang diperlukan guna mengangkut lumpur agar tidak mengendap adalah sebesar, $Q = 126 \text{ m}^3/\text{det}$.

Kata kunci: Lumpur Lapindo, gerak mula partikel, tegangan geser, sedimen, debit minimum

ABSTRACT

This research is conducted to study initial motion of Lapindo's mud sediment through experiment held on hydraulic laboratory. It is important since the mud sediment that flowing into the porong river cannot be transported to downstream easily. The research purposed is to determine minimal discharge need for flushing mud sediment hydraulically within varied water level. The sediment critical shear stress is carried out by conducting the initial motion experiment within sediment depth and also considering sediment deposition time. The scenario for this initial motion sediment simulation is conducted from the surface to 3m depth of sediment deposition. The sediment deposition limitation time is carried out for only 14 day. Analysis for determining the minimum discharge is carried out by comparing the sediment critical shear stress, τ_{cr} , and riverbed shear stress, τ_0 which can be calculated by numerical model. If $\tau_0 > \tau_{cr}$ then the sediment can be transported to downstream, otherwise it will deposit or there will be no sediment motion. Based on this analysis it is known that longer and deeper sediment deposit will need more river discharge for flushing. It is even higher during the highest water level condition. Model result shows that the minimum discharge requirement for transporting the sediment is about, $Q = 126 \text{ m}^3/\text{s}$.

Keywords: Lapindo's mudflow, particle initiation motion, shear stress, sediment, minimum discharge

PENDAHULUAN

Semburan lumpur di Porong, Sidoarjo pertama kali terjadi pada tanggal 29 Mei 2006. Hingga saat ini semburan lumpur tersebut masih terus berlangsung dan sulit untuk dihentikan. Diperkirakan volume semburan rata-rata tidak kurang dari 120.000 m³/hari. Berbagai upaya penanganan yang diambil untuk menghentikan maupun mengendalikan dampak yang ditimbulkan belum menunjukkan hasil yang diharapkan. Bahkan hingga kini luasan daerah yang terkena dampak semakin meluas dan menimbulkan kerugian materi maupun korban jiwa yang semakin membesar.

Salah satu skema yang telah dilakukan dalam mengendalikan semburan lumpur adalah dengan mengarahkan aliran lumpur dan membuangnya ke Kali Porong. Skema penanggulangan ini merupakan salah satu tindakan yang terpaksa dilakukan guna mencegah dampak yang lebih luas lagi. Meski demikian, masih terjadi pro dan kontra terkait dengan dampak negatif yang mungkin dapat timbul terhadap Kali Porong itu sendiri. Dampak negatif yang mulai tampak adalah terjadinya sedimentasi yang tinggi di sekitar pipa pembuangan lumpur (*spillway*). Kondisi ini mulai tampak dengan indikasi semakin mendangkalnya dasar sungai di ruas tersebut. Diperkirakan laju sedimentasi telah mengakibatkan pendangkalan Kali Porong di lokasi *spillway* lebih dari 3m. Keadaan ini dikhawatirkan akan menimbulkan masalah banjir di udik lokasi *spillway* terutama pada saat musim hujan.

Selain itu, masalah sedimentasi ini diperkirakan tidak hanya akan berhenti di lokasi *spillway* saja, melainkan juga akan terbawa hingga mencapai ke muara Kali Porong. Sampai saat ini belum ada studi detail yang meneliti karakteristik dan dampak pembuangan lumpur terhadap sungai dan muara Kali Porong.

Tujuan penelitian ini adalah untuk memprediksi besaran debit minimal yang diperlukan agar dapat membilas lumpur yang dibuang ke Kali Porong secara hidraulik dengan berbagai variasi muka air laut yang mungkin terjadi di muara.

Guna mengetahui hal tersebut, maka penelitian dilakukan dengan melakukan percobaan gerak mula untuk mendapatkan nilai tegangan geser kritis lumpur, τ_{cr} di laboratorium hidraulik. Selanjutnya analisis model numerik dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan geser aliran, τ_0 sepanjang Kali Porong pada berbagai variasi debit dan muka air laut.

Besar debit pembilasan dapat diketahui dengan cara membandingkan besarnya parameter tegangan geser kritis sedimen, τ_{cr} , dengan tegangan

geser dasar aliran Kali Porong, τ_0 . Apabila $\tau_0 > \tau_{cr}$ maka dapat dipastikan lumpur akan dapat diangkut oleh aliran Kali Porong. Apabila sebaliknya, maka akan terjadi pengendapan dan menyebabkan pendangkalan di ruas tersebut.

TINJAUAN PUSTAKA

Sedimen Kohesif

Sedimen mulai mempunyai sifat kohesif apabila prosentase kandungan material dari fraksi *clay* yang menyusun material tersebut lebih besar daripada 10% (Van Rijn, 1993). Berdasarkan hasil analisis gradasi butiran, sedimen lumpur Lapindo mengandung paling tidak 60% *clay*. Untuk itu dalam mempelajari karakteristik material lapindo akan lebih cocok didekati dengan pendekatan sedimen kohesif.

Keberadaan *clay* telah mengakibatkan timbulnya gaya elektrostatis yang sebanding atau lebih besar daripada gaya gravitasi yang terjadi antar partikel. Akibat adanya gaya tersebut, partikel-partikel yang menyusun sedimen tersebut tidak berperilaku seperti partikel butiran yang bersifat individual. Akan tetapi, partikel lebih bersifat berkelompok dan membentuk agregat yang berupa gumpalan-gumpalan (*flocs*). *Flocs* biasanya mempunyai ukuran dan kecepatan jatuh yang lebih besar daripada partikel butiran individual.

Tegangan Geser Kritis

Pada dasarnya partikel sedimen pada *flocs* akan mulai "bergerak" apabila tegangan geser aliran di dasar saluran (τ_0) lebih besar dari pada tegangan geser kritis material (τ_{cr}). Besarnya tegangan geser kritis material sangat bergantung pada komposisi material, salinitas, massa jenis, kekasaran dasar dan lain-lain.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa tegangan geser kritis sangat bergantung pada riwayat proses pengendapan dan konsolidasi (Van Rijn, 1993). Untuk itu beberapa penelitian tegangan geser kritis sedimen kohesif biasanya dilakukan dengan menghubungkan antara tegangan geser dan massa jenis sedimen pada berbagai variasi ketinggian sampel.

Persamaan umum yang digunakan untuk mencari hubungan antara tegangan geser kritis dengan rapat massa jenis sedimen adalah seperti berikut:

$$\tau_{cr} = \alpha(\rho_{dry})^\beta \quad 1)$$

Keterangan:

α dan β , konstanta

ρ_{dry} , massa jenis kering sedimen

Secara umum nilai konstanta β berkisar antara 1 hingga 2,5. Thorn dan Parsons (1980) dalam Pranoto (2006) menemukan angka $\beta=2,3$ untuk lumpur Sungai Brisbane (Australia). Burt (1990) dalam Pranoto (2006) menentukan angka $\beta=1,5$ untuk lumpur di Teluk Cardiff (Inggris). Pranoto (2006) menemukan angka $\beta=1,9$ untuk lumpur Sungai Citanduy (Indonesia).

Selain itu beberapa peneliti juga mencari hubungan antara tegangan kritis dengan yield stress (τ_y). Hal ini seperti dilakukan oleh Mignot (1968) maupun Otsubo-Maraoko (1988) dalam Van Rijn (1993).

Berdasarkan hasil penelitian Winterwerp (1989) dalam Van Rijn (1993), dapat diambil kesimpulan bahwa faktor yang mempengaruhi besaran tegangan kritis sedimen adalah seperti berikut:

- 1 Tegangan geser kritis berkurang apabila temperatur meningkat.
- 2 Tegangan geser kritis berkurang apabila PH meningkat.
- 3 Tegangan geser kritis berkurang apabila konsentrasi pasir meningkat
- 4 Tegangan geser kritis meningkat apabila konsentrasi clay meningkat
- 5 Tegangan geser kritis meningkat apabila kadar salinitas meningkat

Pada penelitian kali ini dilakukan uji coba dengan sampel asli lumpur Lapindo dengan sedikit konsentrasi pasir sebesar 5%. Selain itu penelitian ini dilakukan pada kondisi temperatur ruangan dan pH air normal.

Desain Eksperimen

Penelitian dilakukan di saluran kaca yang berada di laboratorium. Dimensi saluran kaca berukuran panjang $l=15m$, lebar $b=0,4m$ dan tinggi $h=0,5m$. Saluran kaca ini dilengkapi dengan alat pengatur kemiringan, sehingga kemiringan dasar saluran dapat diubah sesuai skenario model yang dirancang.

Di tengah saluran kaca, suatu alat pengangkat sedimen (*sediment lift*) dirancang dengan mekanisme tertentu sehingga sampel sedimen dapat ditekan dari bawah saluran hingga naik di atas permukaan dasar saluran. Di udik saluran terdapat ambang Thompson yang berfungsi untuk mengatur debit yang akan

dialirkan. Sementara itu di bagian hilir terdapat pintu pengatur yang berfungsi untuk mengatur elevasi muka air hilir. Secara skematis, desain saluran kaca yang digunakan beserta bagian-bagian pelengkapannya dapat dilihat pada Gambar 1.

Skala model yang digunakan adalah $1:33\frac{1}{3}$. Besaran skala ini diambil mengingat keterbatasan dimensi dari saluran kaca dan kapasitas pompa yang ada. Butiran dari lumpur tidak di skala kan, hal ini terjadi karena adanya kohesi antar partikel lumpur yang lebih dominan dibandingkan gradasi butiran material.

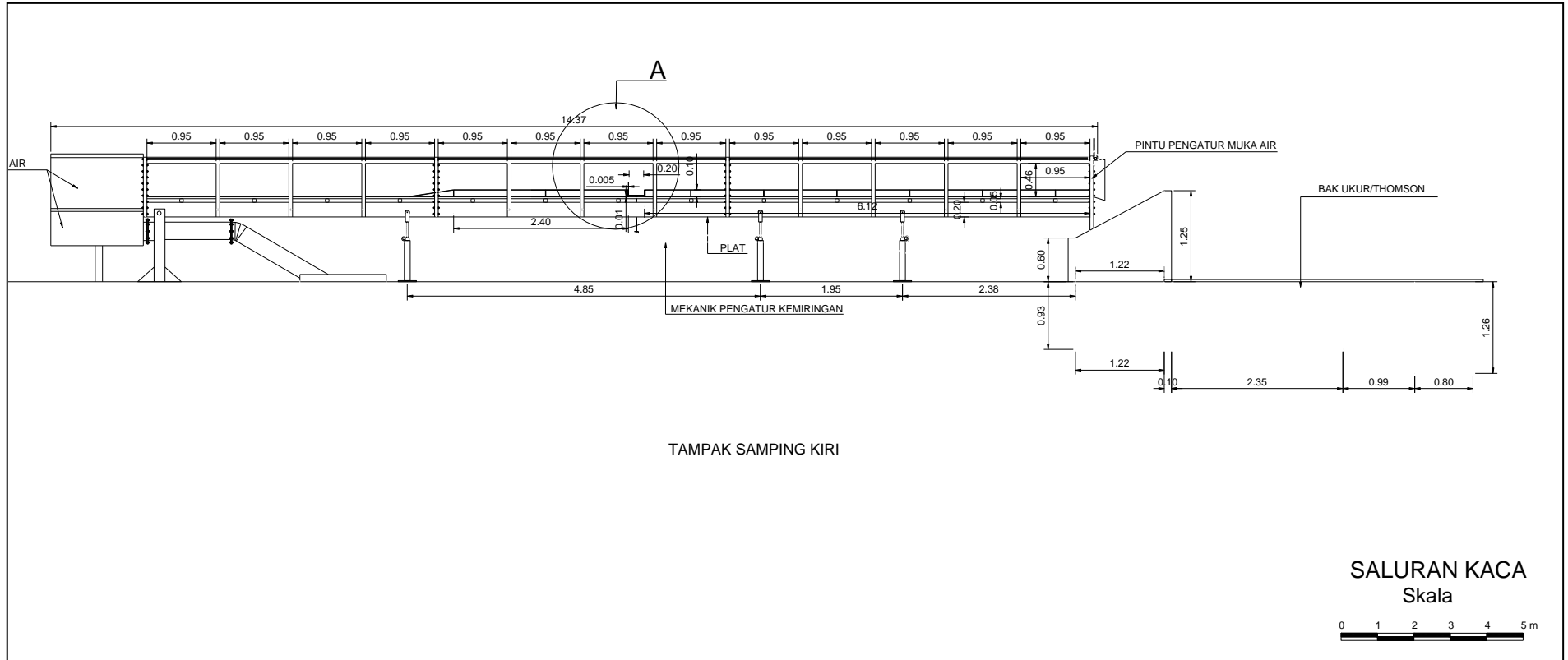
Prosedur Eksperimen

1 Perlakuan Sampel

Berdasarkan data lapangan, pada bulan Agustus 2007 ketebalan lumpur rata-rata ruas sekitar pipa pembuang adalah setinggi 3 m dari dasar sungai. Pada kondisi demikian, lumpur yang berada di kedalaman 1 m dan 3 m di bawah *top layer* lumpur diperkirakan akan mempunyai rapat massa jenis yang berbeda. Kondisi ini mungkin terjadi akibat tekanan yang diterima dari tanah dan *fluida* yang berada di lapisan atas serta lamanya waktu konsolidasi.

Untuk itu sampel lumpur yang akan dicari tegangan gesernya dibagi menjadi 3 bagian yang merepresentasikan keadaan lapisan lumpur pada kedalaman, z tertentu dari permukaan atas (misalnya: $z=1m$, $z=2m$ dan $z=3m$). Lamanya waktu konsolidasi juga dibuat bervariasi dari $t=0$ minggu (untuk mensimulasikan permukaan atas/*top layer* lumpur) hingga $t=2$ minggu.

Untuk mensimulasikan kondisi tersebut, maka sebelum dilakukan percobaan pengaliran, sampel terlebih dahulu diberi beban yang besarnya kurang lebih sama dengan *overburden pressure* yang diterimanya di lapangan. Skenario pembebanan tidak dilakukan untuk lumpur yang berada di lapisan teratas (*top layer*). Pembebanan ini dilakukan selama waktu, $t=1$ minggu dan ada juga sampel yang dibebani hingga waktu, $t=2$ minggu untuk mensimulasikan *overburden pressure* yang diterima sampel pada kedalaman, $z=1-3m$ di bawah *top layer*. Lama pengendapan lumpur dibatasi hanya hingga 14 hari (2 minggu) mengingat keterbatasan waktu pengujian dan juga diperkirakan apabila sampel sudah mengendap lebih dari 14 hari, maka pembilasan secara hidraulis akan sulit untuk dilakukan.



Gambar 1 Persiapan Eksperimen

2 Percobaan Pengaliran

Pada saat percobaan dimulai, sampel yang berada di *sediment lift* diusahakan berada dalam kondisi tertutup dan tidak boleh terpengaruh oleh turbulensi aliran. Setelah tinggi muka air saluran mencapai elevasi yang diharapkan dan tidak terjadi turbulensi aliran di dasar saluran (kurang lebih sekitar 10 menit), maka tutup sampel dapat dibuka.

Pada kondisi tersebut, debit air secara konstan sudah dialirkan dan alat pengangkat sampel (*sediment lift*) mulai dinaikan sedikit demi sedikit hingga muncul lebih tinggi dari permukaan dasar saluran sekitar 2 mm.

Percobaan pengaliran dijalankan dengan langkah-langkah berikut:

- 1) Debit air yang dialirkan ke saluran kaca harus berada dalam kondisi konstan dan stabil. Kondisi ini biasanya dapat dicapai apabila aliran sudah dialirkan selama 20 menit. Kemudian amati hingga ada partikel sampel yang mulai bergerak. Apabila belum ada pergerakan sampel, maka perbesar kecepatan aliran maupun debit. Mempercepat kecepatan aliran dalam saluran kaca dapat dilakukan baik dengan cara memperbesar debit, mengatur muka air hilir, maupun dengan menambah kemiringan dasar saluran.

Namun demikian, dilihat dari sisi kepraktisan di laboratorium hal yang paling mudah adalah dengan cara membuka pintu aliran agar debit yang masuk lebih besar.

- 2) Pengamatan harus dilakukan terutama pada pergerakan material sampel yang diuji. Pada saat sudah mulai tampak terjadi pergerakan partikel sampel, catat debit, tinggi muka air serta, kemiringan dasar saluran. Nilai tegangan geser dasar saluran pada saat butiran mulai bergerak selanjutnya ditetapkan sebagai besar tegangan geser kritis sedimen.
- 3) Langkah selanjutnya adalah menghitung tegangan geser dasar saluran (τ_0) dengan persamaan:

$$\tau_0 = \rho_w g h i \quad 2)$$

Keterangan:

- τ_0 tegangan geser dasar saluran
- ρ_w kerapatan massa air
- g percepatan gravitasi
- h kedalaman aliran
- i kemiringan dasar saluran/sungai

- 4) Percobaan ini harus diulangi beberapa kali (3-5 kali) hingga mendapatkan nilai tegangan geser yang teliti dan akurat.

3 Skenario Simulasi

Serangkaian uji coba guna mengetahui parameter hidraulik partikel, seperti besaran tegangan geser kritis dan kecepatan dilakukan dalam model fisik saluran kaca di laboratorium hidraulika. Kemudian parameter sifat fisik sedimen, seperti gradasi butiran dan massa jenis sedimen, dilakukan di laboratorium mekanika tanah.

Adapun skenario pemodelan fisik disusun seperti berikut:

- a Simulasi untuk mencari parameter fisik dan hidraulik lapisan atas (*top layer*) lumpur tanpa konsolidasi.
- b Simulasi parameter fisik dan hidraulik sedimen yang mengendap (konsolidasi) selama 7 hari pada kedalaman:
 - (1) 1m di bawah lapisan atas
 - (2) 2m di bawah lapisan atas
 - (3) 3m di bawah lapisan atas
- c Simulasi parameter fisik dan hidraulik sedimen yang mengendap selama 14 hari pada kedalaman:
 - (1) 1m di bawah lapisan atas
 - (2) 2m di bawah lapisan atas
 - (3) 3m di bawah lapisan atas

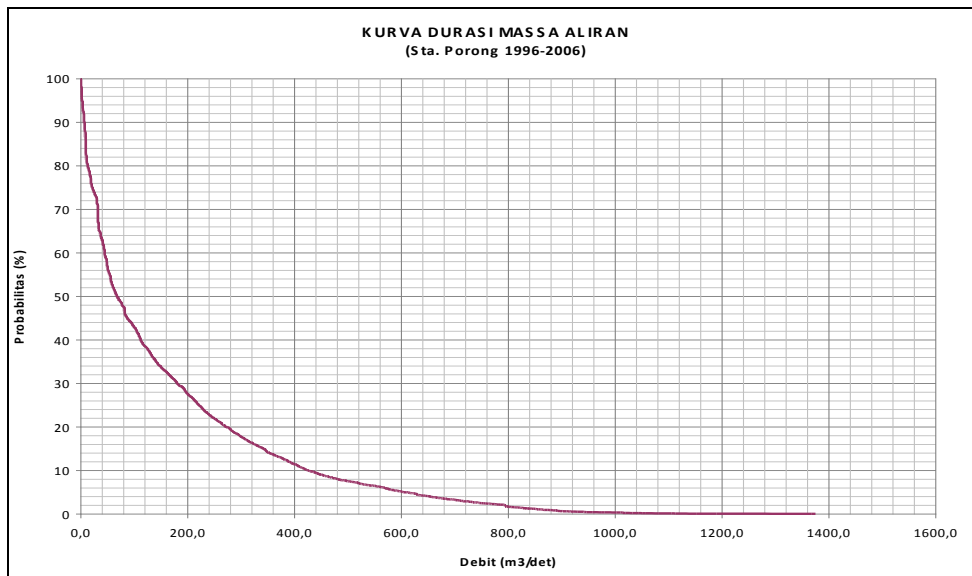
Simulasi dilakukan sampai kedalaman sampel 3m untuk mengetahui karakteristik sedimen yang mengendap di dasar sungai karena sedimentasi di dasar sungai Porong yang terjadi hingga ketinggian 3 m dari dasar sungai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Debit Kali Porong

Data debit yang digunakan dalam melakukan analisis adalah berdasarkan pencatatan dari Stasiun Porong dari tahun 1996–2006. Perlu disampaikan juga bahwa Kali Porong berfungsi sebagai *Floodway*. Oleh karena itu debit yang mengalir di Kali Porong diatur oleh bukaan pintu di Bendung Lengkong Baru. Kali Porong yang berfungsi sebagai saluran banjir ini direncanakan dapat mengalirkan debit rencana Q_{50} sebesar, $Q=1.650 \text{ m}^3/\text{detik}$. Debit Kali Porong yang relatif besar terjadi mulai dari bulan November hingga Mei, sementara bulan Agustus–September diperkirakan merupakan musim paling kering.

Berdasarkan analisis metode rangking yang dilakukan pada data debit yang tercatat di Sta Porong dari tahun 1996–2006 didapatkan kurva durasi massa aliran seperti dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Kurva durasi massa aliran Sungai.Porong (1996-2006)

Tabel 1 Rangkuman Besaran Tegangan Geser Kritis

Kedalaman (m)	Konsolidasi 7 hari	Konsolidasi 14 hari	Prosentase kenaikan (%)
	Tegangan geser N/m ²	Tegangan geser N/m ²	
1	0,601	0,720	19,827
2	0,643	0,779	21,149
3	0,710	0,843	18,830

Dari kurva tersebut dapat diketahui bahwa:

- 1) Debit dengan peluang terjadi 80% dari waktu, $Q_{80\%} = 12.54 \text{ m}^3/\text{det}$
- 2) Debit dengan peluang terjadi 50% dari waktu, $Q_{50\%} = 67.54 \text{ m}^3/\text{det}$
- 3) Debit dengan peluang terjadi 20% dari waktu, $Q_{20\%} = 271.8 \text{ m}^3/\text{det}$.

Data Pasang Surut

Kondisi pengamatan pasang surut seperti hasil survey yang dilakukan oleh Perum Jasa Tirta I menunjukkan fluktuasi antara pasang tertinggi dan terendah adalah 3,6 m.

Adapun elevasi dari pasang surut adalah seperti berikut:

- 1) HHWL (Elevasi pasang tertinggi) = +1.205
- 2) MSL (Elevasi muka air laut rata-rata) = +0,0
- 3) LLWL (Elevasi surut terendah) = -1,425

Analisis untuk mendapatkan nilai elevasi tersebut dilakukan dengan cara *Least Square Methode*.

Hasil analisis data debit dan pasang surut Kali Porong selanjutnya akan digunakan sebagai data masukan dalam model numerik guna mengetahui besar tegangan geser aliran sepanjang Kali Porong.

Analisis Tegangan Geser Kritis

Besarnya tegangan geser kritis sedimen untuk lapisan permukaan (*top layer*) hasil percobaan laboratorium adalah sebesar, $\tau_{cr} = 0,510 \text{ N/m}^2$. Besarnya tegangan geser kritis ini semakin meningkat tergantung pada lama waktu dan ketinggian penumpukan sedimen.

Sedimen yang terletak paling bawah mempunyai nilai tegangan geser kritis yang paling besar. Kondisi ini dapat dilihat pada Tabel 1 dan grafik pada Gambar 4, dimana besaran tegangan geser kritis sedimen yang berada di kedalaman 3 meter dengan lama pengendapan 7 hari adalah sebesar, $\tau_{cr} = 0,710 \text{ N/m}^2$.

Selain itu dari Tabel 1 dan Gambar 4 juga dapat dilihat sedimen yang sudah mengendap selama 14 hari mempunyai nilai tegangan geser kritis yang tertinggi. Nilai tegangan geser sampel ini di kedalaman 1 meter bahkan lebih tinggi dari kedalaman 3 meter dengan pengendapan 7 hari, yakni, $\tau_{cr} = 0,720 \text{ N/m}^2$. Nilai tegangan geser kritis sedimen pada kedalaman 3 meter dengan lama pengendapan selama 14 hari adalah sebesar $\tau_{cr} = 0,843 \text{ N/m}^2$.

Berdasarkan analisis ini dapat dikatakan bahwa faktor lama pengendapan lebih berpengaruh terhadap besaran nilai tegangan

geser kritis dibandingkan faktor kedalaman. Semakin tinggi tegangan geser kritis sedimen akan menyebabkan sedimen semakin sulit untuk terangkut oleh aliran. Oleh karena itu lama pengendapan sedimen dalam percobaan ini dibatasi hanya untuk 14 hari saja. Bila pengendapan sedimen sudah melebihi 14 hari, maka diperkirakan perlu alternatif lain untuk membilas sedimen yang tersebut. Rangkuman hasil uji model untuk mengetahui besarnya tegangan geser kritis sedimen adalah seperti pada Tabel 1, sementara grafik hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.

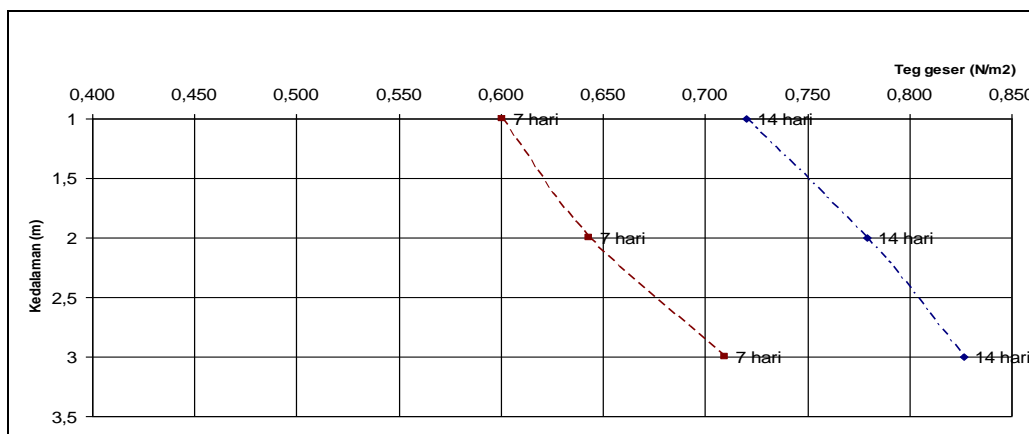
Parameter Sifat Fisik Lumpur

Rangkuman hasil pemeriksaan laboratorium mekanika tanah dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari hasil laboratorium dapat diketahui bahwa kecenderungan perubahan massa jenis sedimen adalah semakin membesar seiring dengan perubahan kedalaman sampel. Namun demikian apabila ditinjau dari faktor lama pengendapan selama 7 dan 14 hari, kenaikan tersebut tidak terlalu signifikan. Hal ini dapat dilihat pada

Gambar 5 yang menunjukkan hubungan antara massa jenis dan kedalaman.

Dari hasil laboratorium dapat diketahui bahwa kadar air menunjukkan trend menurun seiring dengan penambahan kedalaman. Hal ini dapat dimengerti karena semakin besar massa jenis, maka air yang berada di pori sedimen akan tertekan keluar. Bila dilihat dari lamanya pengendapan 7 dan 14 hari, maka kadar air untuk konsolidasi 14 hari seharusnya lebih rendah bila dibandingkan konsolidasi 7 hari. Kondisi ini diakibatkan karena semakin lama sampel tertekan, maka rongga sedimen yang berisi air pun akan semakin tertekan keluar sehingga kadar air menjadi berkurang. Gambar hubungan antara kadar air dan kedalaman dapat dilihat pada Gambar 6. Hampir sama dengan massa jenis, massa jenis kering sedimen cenderung membesar seiring dengan penambahan kedalaman sampel. Namun demikian apabila ditinjau dari faktor lama pengendapan selama 7 dan 14 hari, kenaikan tersebut tidak terlalu signifikan. Kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 4 Grafik hubungan antara Kedalaman dan Tegangan Geser

Tabel 2 Rangkuman Hasil Laboratorium

Sampel	Kedalaman	Massa Jenis (kg/m ³)	Kadar Air (%)	Massa Jenis Kering (kg/m ³)
7 hari	1m	1727,000	53,010	1128,684
	2m	1809,000	49,060	1213,605
	3m	1915,750	47,475	1299,034
14 hari	1m	1738,500	47,660	1177,367
	2m	1810,000	47,545	1226,744
	3m	1976,000	44,150	1370,794

Persamaan Tegangan Geser Kritis Lumpur Lapindo

Dari hasil penelitian di laboratorium untuk mencari tegangan geser kritis lumpur Lapindo, dapat diketahui nilai tegangan geser kritis dan massa jenis kering sedimen seperti pada Tabel 3 berikut. Apabila nilai ini diplotkan dalam grafik hubungan antara massa jenis kering sedimen dan tegangan geser kritis seperti pada Gambar 8, maka korelasi antara tegangan geser kritis dan massa

jenis kering lumpur Lapindo dapat diketahui persamaannya.

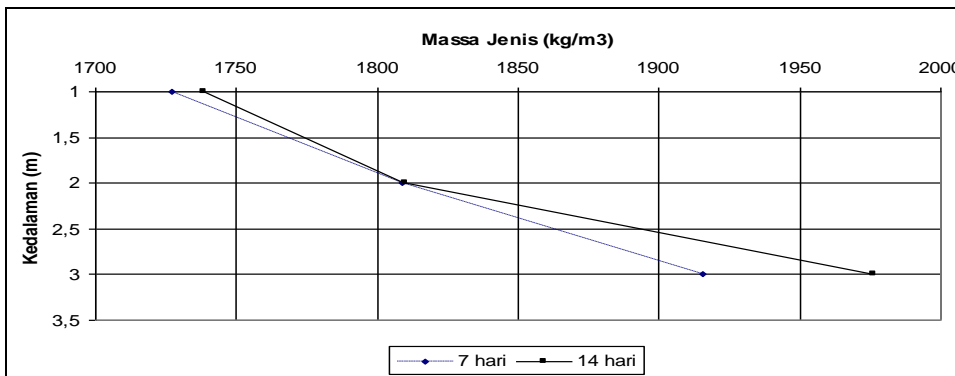
Dengan demikian, berdasarkan grafik pada Gambar 8 diketahui hubungan korelasi empiris antara tegangan geser kritis dan massa jenis kering lumpur Lapindo adalah seperti berikut:

$$\tau_{cr} = 3.10^{-6} (\rho_{dry})^{1,74} \tag{3}$$

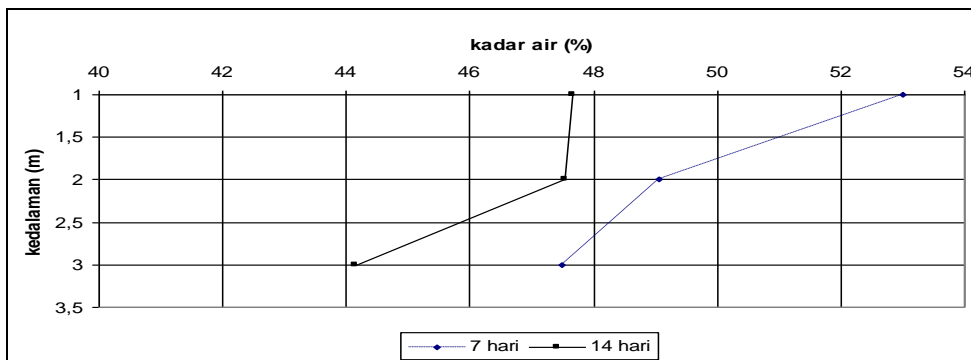
Keterangan:

τ_{cr} tegangan geser kritis (N/m²)

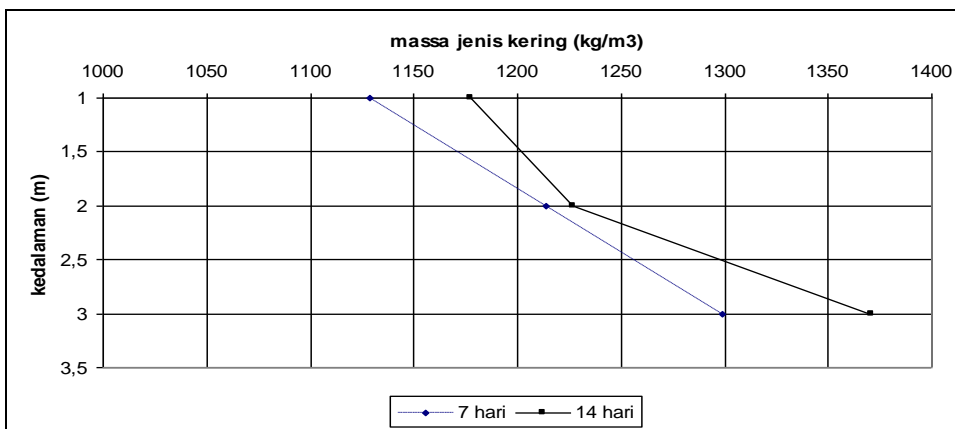
ρ_{dry} massa jenis kering sedimen (kg/m³)



Gambar 5 Hubungan Antara Massa Jenis dan Kedalaman



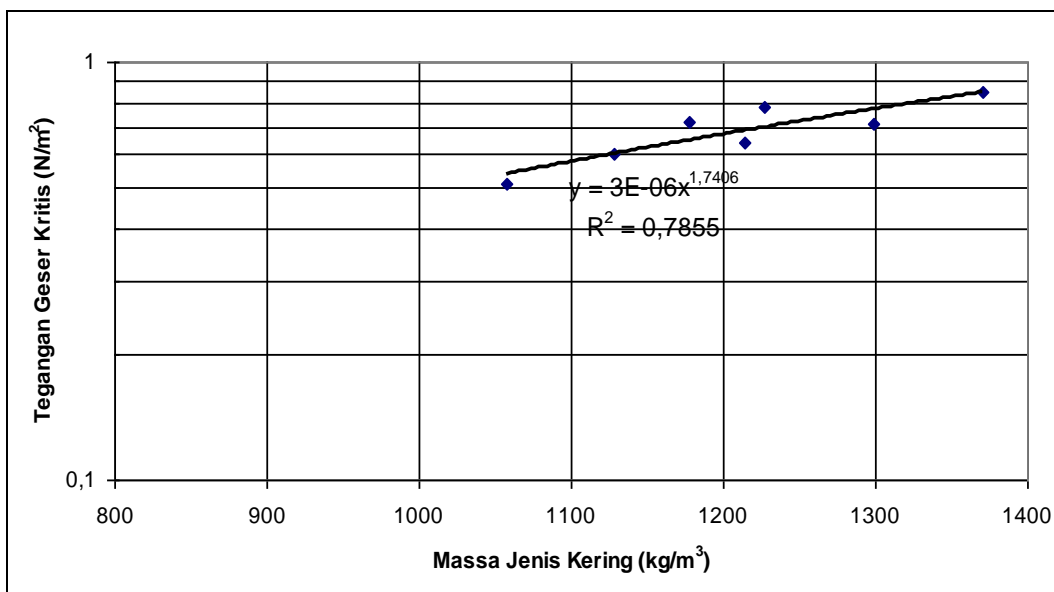
Gambar 6 Hubungan antara kadar air dan kedalaman



Gambar 7 Hubungan antara massa jenis kering dan kedalaman

Tabel 3 Hubungan antara massa jenis kering dan tegangan geser

Sampel	Kedalaman	Massa Jenis Kering (kg/m ³)	Teg.geser (N/m ²)
7 hari	1m	1128,684	0,601
	2m	1213,605	0,643
	3m	1299,034	0,709
14 hari	1m	1177,367	0,720
	2m	1226,744	0,779
	3m	1370,794	0,843



Gambar 8 Hubungan antara massa jenis kering dan tegangan geser kritis Lumpur Lapindo

Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Thorns dan Parsons (1980) serta Mitcheners and Torfs (1996) dan Ockenden and Delo (1988) dalam Pranoto (2006). Namun demikian meski menggunakan persamaan yang sama, semua peneliti menemukan nilai koefisien yang berbeda-beda. Kondisi ini tergantung pada perlakuan pada sampel, campuran sedimen dan kadar mineral dominan yang terkandung dalam sedimen tersebut.

Sebagai contoh, Ockenden and Delo dalam Pranoto (2006) mencampur sedimen kohesif dengan pasir yang lebih dominan. Dengan demikian persamaan tersebut hanya cocok untuk sedimen yang massa jenis keringnya kecil yaitu sekitar, $\rho=500 \text{ kg/m}^3$. Demikian pula dengan Thorns and Parsons dalam Pranoto (2006) yang melakukan penelitian lumpur dengan campuran pasir hingga 70% sehingga kurang cocok untuk massa jenis kering yang tinggi atau hanya cocok hingga $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$. Kedua persamaan tersebut memberikan nilai yang lebih tinggi bila dibandingkan persamaan lumpur Lapindo yang massa jenis keringnya berkisar antara, $\rho=1100-1400 \text{ kg/m}^3$. Untuk itu, persamaan Mitchener and

Torfs tampaknya hampir sesuai dengan karakter lumpur lapindo yang dilakukan tanpa mencampur dengan pasir. Kondisi ini dapat diamati dari hasil perbandingan pada Gambar 9.

Uji Model Numerik Hidrodinamik

Model numerik dilakukan dengan bantuan program satu dimensi MIKE 11 modul hidrodinamik yang dikembangkan oleh Danish Hydraulic Institute (DHI).

Persamaan hidrodinamik yang digunakan adalah persamaan berikut:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = q \tag{4}$$

Keterangan:

- Q , debit sungai [m³/det]
- b , lebar sungai [m]
- h , kedalaman air [m]
- Δx , langkah jarak [m]
- Δt , langkah waktu [det]
- q , debit aliran lateral [m³/det/m'].

Modul Hidrodinamik *MIKE 11* menggunakan skematisasi *Abbott-Ionescu* 6 titik untuk memecahkan persamaan defferensial berdasarkan metoda Beda-Hingga secara implisit.

Variasi data debit dan pasang surut Kali Porong yang sudah dianalisis sebelumnya merupakan data masukan dalam simulasi model numerik ini guna mengetahui besar tegangan geser aliran sepanjang Kali Porong.

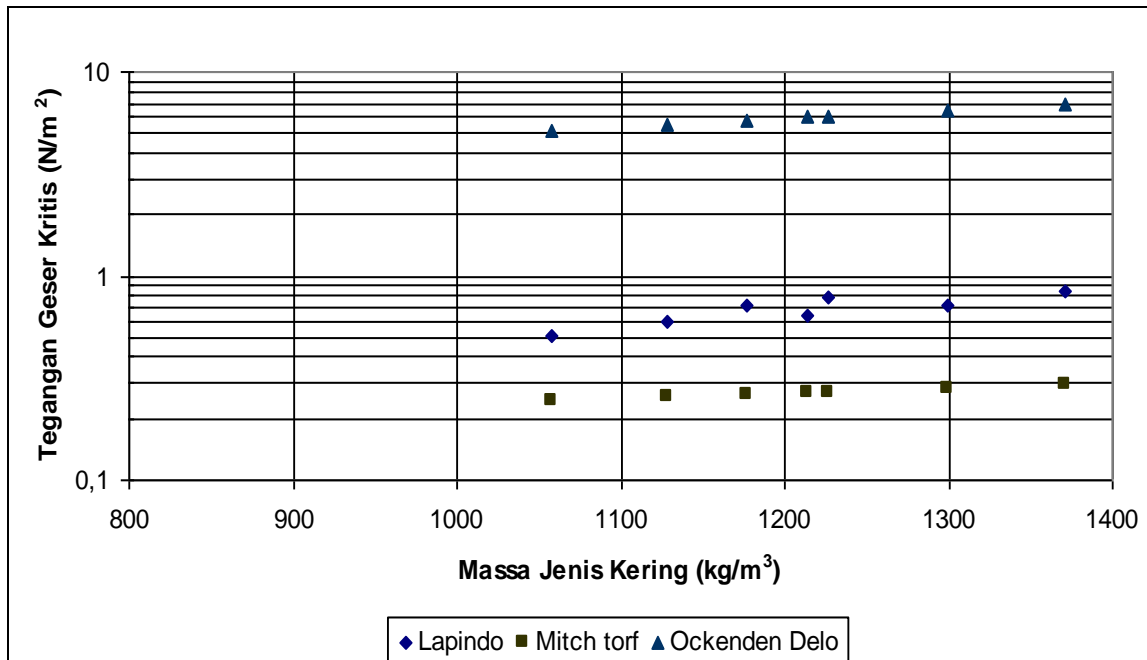
Analisa dengan bantuan model numerik dilakukan dengan maksud untuk mengetahui besarnya debit aliran Kali Porong minimum yang diperlukan untuk mengangkut sedimen yang dialirkan dari semburan lumpur lapindo.

Analisis dilakukan dengan cara membandingkan tegangan geser dasar (*bed shear stress*), τ_0 pada berbagai debit sungai dan juga variasi pasang surut muara dengan tegangan geser kritis sedimen, τ_{cr} . Apabila $\tau_0 > \tau_{cr}$ maka dapat dipastikan bahwa lumpur akan dapat diangkat oleh aliran Kali Porong dan apabila sebaliknya, maka lumpur akan mengendap di lokasi tersebut.

Dari seluruh hasil uji model, baik fisik maupun numerik dan juga laboratorium dapat diambil kesimpulan debit minimum yang harus dialirkan oleh Kali Porong untuk mengangkut sedimen pada ruas *spillway* adalah sebagai berikut:

- 1 Debit minimum yang dibutuhkan untuk menggelontor sedimen di ruas ini pada kondisi muka air surut (*LLWL*) untuk *top layer* sedimen adalah, $Q=38 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 2 Debit minimum yang dibutuhkan untuk menggelontor sedimen di ruas ini pada kondisi muka air normal (*MSL*) untuk *top layer* sedimen adalah, $Q=76 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 3 Debit minimum yang dibutuhkan untuk menggelontor sedimen pada kondisi muka air tinggi (*HHWL*) adalah lebih besar lagi yaitu, $Q=126 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 4 Sementara itu apabila telah terjadi endapan, maka besarnya debit yang dibutuhkan untuk mengangkut sedimen menjadi semakin tinggi lagi, yaitu sebesar $Q=148 \text{ m}^3/\text{det}$ untuk sampel yang mengendap selama 7 hari pada kedalaman 3 m di bawah lapisan permukaan.
- 5 Apabila sedimen tersebut sudah mengendap selama 14 hari, maka debit minimum yang dibutuhkan menjadi $Q=163 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 6 Selain itu apabila sedimen akan di bilas hingga muara, maka debit minimum yang dibutuhkan adalah sebesar, $Q=270 \text{ m}^3/\text{det}$

Ringkasan debit minimum yang diperlukan untuk mengalirkan sedimen seperti dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 9 Perbandingan berbagai persamaan tegangan geser kritis

Tabel 4 Debit minimum untuk ruas spillway hingga muara

Lokasi	Konsolidasi	Kedalaman Sampel	Debit Minimum (m ³ /det)		
			LLWL	MSL	HHWL
<i>Spillway</i>	7 hari	0 m	38	76	126
		1 m	41	85	137
		2 m	43	88	141
		3 m	47	97	148
	14 hari	0 m	38	76	126
		1 m	45	97	150
		2 m	48	100	158
		3 m	53	109	163
Lokasi	Konsolidasi	Kedalaman Sampel	Debit Minimum (m ³ /det)		
			LLWL	MSL	HHWL
5 km hilir <i>Spillway</i>	7 hari	0 m	62	133	187
		1 m	67	147	204
		2 m	75	152	207
		3 m	83	167	218
	14 hari	0 m	62	133	188
		1 m	85	168	218
		2 m	92	177	226
		3 m	99	186	235
Lokasi	Konsolidasi	Kedalaman Sampel	Debit Minimum (m ³ /det)		
			LLWL	MSL	HHWL
10 km hilir <i>spillway</i>	7 hari	0 m	88	144	189
		1 m	102	160	204
		2 m	106	166	210
		3 m	118	176	219
	14 hari	0 m	88	144	189
		1 m	118	175	222
		2 m	126	186	226
		3 m	130	194	234
Lokasi	Konsolidasi	Kedalaman Sampel	Debit Minimum (m ³ /det)		
			LLWL	MSL	HHWL
Muara	7 hari	0 m	68	141	228
		1 m	77	156	240
		2 m	83	163	246
		3 m	91	174	255
	14 hari	0 m	68	141	228
		1 m	92	173	256
		2 m	97	182	261
		3 m	106	191	270

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa:

Hubungan persamaan empiris antara tegangan geser kritis dan massa jenis kering lumpur lapindo berdasarkan hasil percobaan adalah seperti berikut:

$$\tau_{cr} = 3.10^{-6} (\rho_{dry})^{1,74}$$

Keterangan:

τ_{cr} , tegangan geser kritis (N/m²)

ρ_{dry} , massa jenis kering sedimen (kg/m³)

Besarnya tegangan geser kritis sedimen untuk lapisan permukaan adalah sebesar, $\tau_{cr} = 0,510$ N/m². Debit minimum yang dibutuhkan untuk menggelontor sedimen ini pada kondisi muka air surut (*LLWL*) adalah, $Q=38$ m³/det.

Besarnya tegangan geser kritis dan debit ini semakin meningkat tergantung pada lama dan ketinggian penumpukan sedimen. Sedimen yang sudah mengendap selama 14 hari mempunyai nilai tegangan geser kritis yang tertinggi. Debit minimum yang dibutuhkan untuk membilas sedimen dengan kondisi tersebut menjadi semakin tinggi lagi, yaitu $Q=163 \text{ m}^3/\text{det}$. Semakin tinggi tegangan geser kritis sedimen akan menyebabkan sedimen semakin sulit untuk terangkut oleh aliran karena memerlukan debit yang lebih besar pula.

Debit minimum yang diperlukan untuk mengangkut sedimen hingga muara diperkirakan adalah sebesar $Q=270 \text{ m}^3/\text{det}$. Hasil analisa debit menunjukkan bahwa besaran $Q=270 \text{ m}^3/\text{det}$ mempunyai peluang untuk terjadi sebesar 20% dari waktu 10 tahun. Apabila diambil rata-rata, debit tersebut hanya berlangsung selama 73 hari dalam setahun (365 hari). Dengan membandingkan besarnya debit minimum yang harus dipenuhi oleh Kali Porong untuk dapat mengangkut sedimen dan ketersediaan debit, diperkirakan sedimen akan sulit terangkut ke hilir.

Lumpur Lapindo tidak disarankan untuk dibuang langsung di Kali Porong. Untuk itu perlu media lain guna membawa aliran lumpur menuju muara. Salah satu saran adalah dengan membuat saluran di samping aliran Kali Porong yang dilengkapi dengan pompa yang berfungsi sebagai pengaduk atau pendorong pada saat sedimen mulai mengendap. Namun demikian untuk merealisasikan hal ini perlu studi lebih lanjut mengenai kecepatan pengendapan sedimen dan kajian efektivitas dari dimensi saluran dan jenis pompa yang terpilih.

Apabila terpaksa dilakukan pembuangan lumpur ke Kali Porong, disarankan untuk melakukan hal-hal seperti berikut:

- 1) Membuang lumpur pada saat terjadi kombinasi debit dan muka air di sungai dengan pengaturan bukaan pintu Lengkong Baru seperti berikut:
 - a) pada saat muka air surut dengan debit minimum yang dilepas sebesar $Q=53 \text{ m}^3/\text{det}$.
 - b) pada saat muka air normal dengan debit minimum sebesar $Q=109 \text{ m}^3/\text{det}$.
 - c) pada saat muka air pasang dengan debit minimum sebesar $Q=163 \text{ m}^3/\text{det}$.
- 2) Memperbesar gaya geser aliran Kali Porong dan memperkecil tegangan geser kritis sedimen dengan cara:

- a) Membuat alur pandu dengan mengeruk maksimal selebar sepertiga bagian dari lebar penampang melintang alur sungai agar terjadi konsentrasi aliran pada segmen tersebut yang dapat meningkatkan tegangan geser aliran Kali Porong.
- b) Mengaduk-aduk sedimen yang dialirkan ke Kali Porong dengan alat mekanik excavator-pontoon. Dengan gangguan ini diharapkan sedimen tidak sempat mengendap dan tegangan geser kritis dapat diperkecil akibat turbulensi yang terjadi.

Melakukan reklamasi di muara dengan bahan utama lumpur dan dengan memperhatikan kecenderungan perubahan garis pantai yang terjadi. Usulan terdahulu berkaitan dengan reklamasi dengan model slufter merupakan salah satu usulan yang cukup baik dan dapat dipertimbangkan untuk dilaksanakan.

Analisis dengan pemodelan numerik perlu dilanjutkan dengan dasar sungai yang bergerak (*movable bed*) agar dapat mensimulasikan dengan lebih presisi perubahan dasar sungai yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pelaksana Penanggulangan Lumpur Sidoarjo, 2007, *Laporan Badan Pelaksana Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo*.
- Coastal Engineering Research Center, *Shore Protection Manual Volume 1*. 1984.
- Moerwanto, Arie Setiadi, 1997, *A Riverine Finite Element Model With Sediment Transport Sub Proseses*, Disertasi S3, University of Wollongong.
- Pranoto, Wati, 2006, *Kajian Karakteristik Sedimen Tegangan Geser Kritis Erosi dan Kecepatan Jatuh*, Disertasi S3, Institut Teknologi Bandung.
- Tim Nasional Penanganan Lumpur Sidoarjo, 2006, *Laporan Timnas Penanganan Lumpur Sidoarjo 2006*.
- Van Rijn L.C., 1993, *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, University of Utrecht Department of Physical Geography, Delft Hydraulics.
- Van Rijn, Leo C, 1984, *Sediment Pick Up Function*, *Journal of Hydraulic Engineering Vol 110. No 10*.