

## STUDI MODEL FISIK STABILITAS SAND BOILING PADA KONSTRUKSI BENDUNG (KASUS TANAH BERPASIR DENGAN LAPISAN HOMOGEN)

Yassir Arafat \*

### Abstract

Observation of sand boiling processes on wear construction by using a model test that is designed for simulated soil stability disturbance (sand boiling) caused by ground water flow below the construction side. Test and observation are done to the parameters such as upstream water level ( $h_w$ ), down stream water level when sand boiling occurred ( $h_c$ ), effect of sheet pile length and position of sheet pile on wear construction, and the medium (sand type) of flow and thick of the medium layer, to get critical water level ( $h_c$ ) when first sand boiling occurred. The variable was made in a comparison value of the relation of dimensionless parameters that is analyzed by a graph. The test model show that the length and position of pile sheet, the tick of sand layer, and type of sand medium; give the best resistance where the sand boiling occurred.

**Keywords:** Sand boiling, Weir construction, Sheet pile

### Abstrak

Pengamatan proses sand boiling pada konstruksi bendung dengan menggunakan suatu model uji yang dirancang dapat mensimulasikan adanya gangguan stabilitas tanah (sand boiling) akibat timbulnya pengaliran pada medium di bawah konstruksi. Pengujian dan pengamatan dilakukan terhadap parameter berupa tinggi air ( $h_w$ ) dihilir bendung, tinggi air dihilir bendung saat peristiwa sand boiling terjadi ( $h_c$ ), pengaruh panjang sheet pile dan posisi penempatan sheet pile pada konstruksi bendung, dan juga jenis medium pengaliran (pasir) dan tebal lapisan medium (T), untuk mendapatkan besarnya tinggi muka air kritis ( $h_c$ ) dimana pertama kali terlihat kejadian sand boiling. Variabel ini dibuat dalam suatu nilai perbandingan hubungan parameter tanpa dimensi yang dianalisis dalam suatu grafik. Model uji memperlihatkan panjang dan posisi sheet pile, tebal lapisan pasir, dan jenis medium pasir yang memberikan hambatan terbaik dimana peristiwa sand boiling terjadi.

**Kata kunci:** sand boiling, konstruksi bendung, sheet pile.

### 1. Pendahuluan

Aliran air didalam medium massa tanah terjadi ketika ada perbedaan tinggi energi muka air pada satu sisi dengan sisi yang lain. Misalnya konstruksi bendung, pada satu sisi dilakukan usaha peninggian muka air sementara pada sisi hilir elevasi muka air lebih rendah. Akibat peninggian tersebut terjadi perbedaan tinggi energi air didepan dengan dibelakang bendung. Konsekuensi dari perbedaan tinggi energi ini akan mengakibatkan terjadinya aliran didalam medium tanah dibawah dasar bendung karena adanya perbedaan tekanan

Aliran air didalam massa tanah mengakibatkan timbulnya gaya

seepage. Gaya seepage ini merupakan fungsi dari gradient hidrolis, berat jenis air (cairan) dan gravitasi. Gaya seepage menimbulkan suatu gaya angkat. Dalam medium tanah yang porous seperti tanah berpasir dapat mengakibatkan terangkatnya butiran pasir jika gaya seepage ini lebih besar dari gaya berat material pasir yang dilalui aliran tersebut.

Peristiwa terangkatnya butiran ini dikenal sebagai sand boiling dan piping, merupakan suatu gangguan stabilitas dari medium dan jika hal ini terus berlanjut akan mempengaruhi stabilitas konstruksi secara keseluruhan. Gejala terjadinya peristiwa sand boiling ini dapat dimodelkan secara fisik dalam suatu penelitian laboratorium dengan

---

\* Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

melakukan percobaan uji model fisik menggunakan model konstruksi bendung dengan medium aliran adalah tanah berpasir serta berpedoman pada prinsip-prinsip aliran air didalam tanah.

Masalah yang diteliti adalah mempelajari mekanisme stabilitas piping dan sand boiling pada konstruksi bendung dengan menggunakan medium tanah berpasir dengan satu lapisan yang homogen. Rumusan dasar dan anggapan yang digunakan pada percobaan ini adalah:

1. Material yang digunakan adalah tanah berpasir yang homogen dan isotropik dengan contoh pasir yang digunakan didapatkan dari sungai palu.
2. Kedalaman dan tebal lapisan berhingga sehingga diketahui batas-batasnya
3. Pengaliran yang terjadi merupakan pengaliran dua dimensi dimana hukum darcy dan bernoulli berlaku dengan sifat aliran laminer.
4. Uji model tidak diskalakan dengan besarnya gravitasi.

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan parameter disain dari model yang dibuat untuk mengamati perilaku *sand boiling*. Adapun paramater didesain yang akan diamati dan diukur meliputi; tinggi muka air di depan bendung, lebar bendung, tebal lapisan pasir di bawah bendung, panjang *sheet pile* dibawah bendung, jarak penempatan *sheet pile* dari muka bendung, tinggi muka air kritis dimana *sand boiling* mulai terjadi ( $h_c$ ).

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Pengaliran dalam medium porous

Aliran air dalam suatu massa tanah dapat dianalisa menggunakan azas-azas mekanika fluida yaitu : Hukum kekekalan massa, hukum kekekalan energi dan hukum kekekalan momentum (hukum kedua Newton). Pada hukum kekekalan massa, berlaku ketentuan bahwa banyak aliran fluida (dalam hal ini air) yang masuk ataupun keluar harus sama dengan besarnya perubahan volume fluida yang terjadi. Jika dirumuskan dalam suatu elemen

massa tanah dapat dituliskan sebagai berikut :

$$dq_x + dq_y + dq_z = - \frac{\partial V}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

dimana  $dq_x, dq_y, dq_z$ , berturut-turut merupakan tingkat pengaliran dalam arah x,y, dan z, sementara  $\frac{\partial V}{\partial t}$  adalah

perubahan volume yang terjadi dalam suatu interval waktu tertentu. Persamaan ini dapat pula dituliskan menggunakan nilai *discharge velocity* dalam bentuk persamaan kontinuitas sebagai berikut :

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

Aliran fluida hanya akan terjadi jika terdapat perbedaan energi antara satu titik lainnya. Untuk kondisi aliran steady state flow berlaku hukum kekekalan energi yang dipenuhi oleh persamaan Bernoulli : (Sumber: Das, Braja, M, (1998), Principles of Geotechnical Engineering. Hal. 159)

$$h_t - h_p - h_e = \frac{v^2}{2g} = \text{konstan} \dots\dots\dots(3)$$

dimana:  $h_t$ = total head,  $h_p$ = pressure head,  $h_e$ = elevation head,  $\frac{v^2}{2g}$  = energi

kinetik yang melalui massa tanah. Nilai konstan merupakan suatu referensi yang dapat diambil sama dengan 0, sementara pada porous media seperti tanah pengaruh kecepatan aliran sangat kecil akibatnya pengaruh energi kinetik dapat diabaikan sehingga persamaan (4) dapat disederhanakan dan dituliskan ulang sebagai berikut : (Sumber: Das, Braja, M, (1998), Principles of Geotechnical Engineering. Hal. 160).

$$h_t - h_p - h_e = 0 \dots\dots\dots(4)$$

Besarnya tingkat pengaliran dari satu titik ke titik yang lebih rendah disebut *Gradient Hidrolik* yang dirumuskan sebagai berikut ;

$$i = - \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta s} \Big|_{t=\text{cons}} = - \frac{\partial h}{\partial s} \dots\dots\dots(5)$$

dari sini terlihat bahwa Gradient hidrolik merupakan suatu besaran vektor yang arahnya sesuai dengan arah pengaliran

yang terjadi menurut sistem koordinat yang digunakan.

Penyelidikan Darcy menggunakan hukum kekekalan momentum menyimpulkan bahwa besarnya pengaliran itu berbanding langsung dengan luas penampang medium dan perubahan tinggi energi antara titik pengaliran dan berbanding terbalik dengan panjang medium yang dilaluinya, ini yang dikenal sebagai Hukum Darcy yang ditulis sebagai berikut :

$$q \propto -k \frac{A \cdot \Delta h}{L} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana; k adalah koefisien permeabilitas medium. Persamaan tersebut sering pula dituliskan dalam persamaan gradien hidrolis sebagai :

$$q = -k \cdot i \cdot A \dots\dots\dots(7)$$

Meskipun persamaan hukum Darcy tersebut telah diterapkan secara luas dalam analisa aliran melalui suatu porous medium, persamaan tersebut tetap memiliki keterbatasan bahwa hanya berlaku untuk aliran laminier, dan tidak memberikan hasil yang akurat untuk aliran non laminier atau turbulen. Untuk mengetahui apakah aliran yang terjadi merupakan aliran laminier atau turbulen ini dapat dikontrol dengan menggunakan bilangan Reynold berdasarkan persamaan berikut : (Sumber: Edil,B Tuncer, (1982), Seepage, Slope and embankments. Hal. 6)

$$R_h = \frac{v \cdot D_o}{\mu} \dots\dots\dots(8)$$

dimana:  $R_h$  = Bilangan Reynold ,  $v$  = kecepatan aliran ( $v = k \cdot i$ ) ,  $\mu$  = koefisien kekentalan air pada suhu 20 °C.

Aliran dikatagorikan laminier jika memiliki bilangan Reynold < 1.0, dalam geoteknik umumnya aliran turbulen mulai terjadi jika gradasi materi yang ditinjau masuk katagori kerikil, sebagai contoh untuk pasir kasar memiliki bilangan Reynold sekitar 0.98 yang berarti masih tergolong aliran laminier.

### 2.2 Gaya Seepage

Gaya seepage dapat dihitung dengan persamaan: (Sumber: Edil,B Tuncer, (1982), Seepage, Slope and embankments. Hal. 25)

$$F_s = i \cdot \gamma_w \cdot V \dots\dots\dots(9)$$

dimana :  $F_s$  = Gaya Seepage (kN) ,  $i$  = Gradien hidraulik ,  $V$  = volume air yang dipindahkan ( $m^3$ ) ,  $\gamma_w$  = berat jenis air ( $kN/m^3$ ).

Kondisi dimana akan terjadi tekanan efektif sama dengan gaya seepage dikenal sebagai gradient hidraulik kritis. Gradient hidraulik maksimum yang ada pada lapisan permukaan aliran disebut exit gradient  $i_e$ . (Sumber: Edil,B Tuncer, (1982), Seepage, Slope and embankments. Hal. 25)

$$i_{crit} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \dots\dots\dots(10)$$

dimana :  $\gamma'$  = berat volume efektif tanah terendam air ( $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ )  
 $\gamma_w$  = berat volume air. Implikasi dari persamaan ini adalah ;

1. Jika  $i_{crit} = i_e$  pada saat suatu titik maka tegangan efektif dari massa tanah sama dengan nol sehingga tanah tidak mampu memikul beban yang ada di atasnya kondisi ini biasa disebut *quick condition*.
2. Jika  $i_{crit} < i_e$  maka akan terjadi pengangkatan butiran tanah oleh air yang mana jika terjadi dipermukaan disebut *boiling* dan jika didalam lapisan tanah disebut *piping*.

Perbandingan antara  $i_{crit}$  dan  $i_e$  akan memberikan suatu faktor keamanan stabilitas terhadap kondisi boiling dan piping tersebut yang ditentukan dengan persamaan ;

$$F_s = \frac{i_c}{i_e} \dots\dots\dots(11)$$

### 3. Metode Penelitian

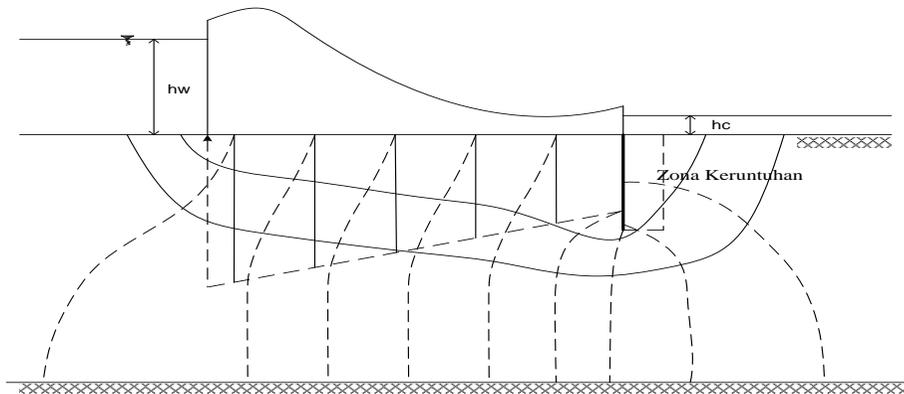
Model stabilitas sand boiling pada konstruksi bendung dengan medium berupa tanah berpasir yang terdiri atas

dua lapisan homogen yang berbeda. Penelitian dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako dengan menggunakan suatu model uji yang mensimulasikan adanya gangguan stabilitas *sand boiling* akibat timbulnya pengaliran pada medium dibawah konstruksi bendung tersebut.

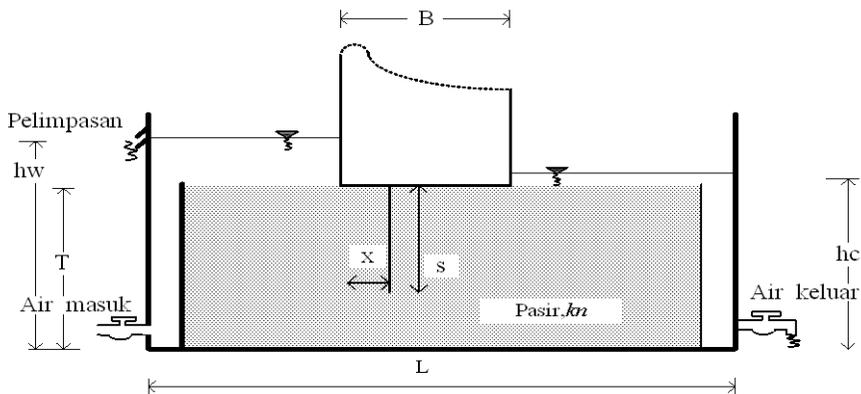
Model kolam percobaan dilaboratorium (panjang x lebar x tinggi = 150 cm x 100 cm x 100 cm) yang didesain sedemikian hingga dapat mensimulasikan adanya *piping* dan *sand boiling* pada model. Bahan kolam didesain sedemikian rupa pada satu sisi merupakan dinding transparan yang dilengkapi pita ukur untuk mengetahui tebal lapisan pasir (T), tinggi air didepan bendung ( $h_w$ ), tinggi muka air kritis di

belakang bendung ( $h_c$ ), kedalaman/panjang *sheet pile* dibawah dasar bendung (S), jarak penempatan *sheet pile* dibawah bendung diukur dari muka bendung (x), lebar bendung (B).

Pasir yang digunakan lolos saringan No. 4 dan tertahan saringan No. 40 dan pasir halus lolos saringan No. 40 dan tertahan saringan No. 200. Sebelum ditempatkan dalam kolam percobaan pasir terlebih dahulu dijenuhkan. Kolam percobaan selanjutnya diisi dengan air kurang lebih  $\frac{1}{2}$  dari total tinggi lapisan pasir dan suhu air di dalam kolam percobaan diukur, dan sebelum percobaan dilakukan maka terlebih dahulu dipastikan tidak ada gelembung udara yang terperangkap didalam susunan lapisan pasir.



Gambar 1. Lokasi keruntuhan akibat gaya seepage



Gambar 8. Model kolam percobaan

Keterangan :

$h_w$  = tinggi muka air di depan bendung (cm).

- T = tebal lapisan tanah pasir di bawah bendung (cm).
- B = lebar bendung (cm).
- X = jarak penempatan sheet pile di bawah bendung diukur dari muka bendung (cm).
- S = kedalaman/panjang sheet pile di bawah dasar bendung (cm).
- hc = tinggi muka air kritis (cm)

Setelah susunan lapisan pasir dibentuk, *sheet pile* dipasang di bawah bendung dengan jarak dari depan bendung dan tinggi sheet pile disesuaikan dengan variasi yang telah ditetapkan. Kemudian bendung dimasukkan ke dalam kolam percobaan pada tempat yang telah ditetapkan. Digunakan plasticin untuk memastikan tidak ada kebocoran antar bendung dengan kaca, dan bendung dengan sheet pile.

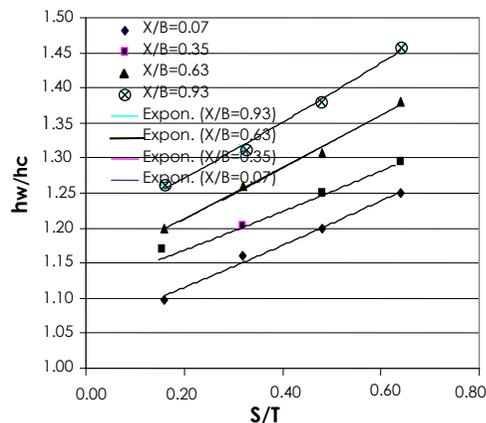
Pada saat posisi bendung sudah terpasang pada tempatnya dengan baik maka keran dibuka untuk memasukkan air dari depan dan belakang bendung secara bersamaan. Pada saat tinggi muka air sudah mencapai  $h_w$  yang ditetapkan maka keran ditutup dan dibiarkan selama 5 menit. Pada saat pengamatan kita mulai, maka posisi muka air dipertahankan dan posisi muka air di belakang bendung diturunkan perlahan-lahan dengan mengeluarkan air melalui keran pembuangan. Selama terjadi penurunan muka air di belakang bendung maka posisi muka air di depan bendung dipertahankan, dan perubahan stabilitas permukaan tanah di belakang bendung diamati sampai terjadi *sand boiling*. Ketinggian muka air di belakang bendung pada saat terjadi *sand boiling* diukur dan dicatat, yaitu nilai  $h_c$ . Setelah nilai  $h_c$  dicatat pada tabel yang telah dibuat, maka kolam dikuras airnya dengan jalan membuka kedua keran pembuangan yang di belakang kolam, dan selanjutnya bendung dikeluarkan dari kolam percobaan.

Prosedur percobaan ini diulangi dengan melalui tahapan yang sama untuk tiap-tiap model percobaan dengan memvariasikan variabel yang akan diteliti yaitu susunan pasir kasar dan pasir halus, jarak sheet pile dari muka

bendung (X) dan tinggi sheet pile di bawah bendung (S) yang telah ditetapkan.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Medium pasir yang digunakan dua jenis yaitu pasir kasar dengan karakteristik berat jenis ( $G_s$ )= 2.61; berat volume jenuh ( $\gamma_{sat}$ )=1.905 gr/cc; permeabilitas ( $K_{20}$ )=0.05321813 cm/def. Lapisan pasir halus mempunyai berat jenis ( $G_s$ )= 2.66; berat volume jenuh ( $\gamma_{sat}$ )=1.917 gr/cc; permeabilitas ( $K_{20}$ )= 0.01001160



Gambar 1. Grafik hubungan  $h_w/h_c$  vs  $S/T$  untuk susunan lapisan pasir kasar

##### 4.1 Panjang sheet pile

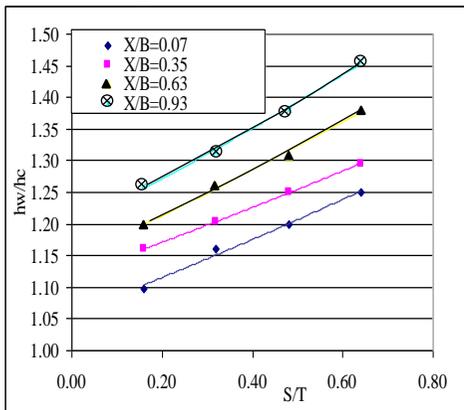
Panjang sheet pile (s) divariasikan mulai dari yang terpendek = 2 cm, 4 cm, 6 cm sampai yang terpanjang 8 cm.. Grafik menunjukkan bahwa semakin besar rasio  $S/T$  semakin sulit terjadinya sand boiling, sehingga semakin besar kedalaman dari sheet pile ditanam akan mempersulit terjadinya sand boiling. Didapatkan bahwa sand boiling lebih sulit terjadi pada sheet pile yang terpanjang, hal ini disebabkan oleh pengurangan energi dan kecepatan

air yang sampai di permukaan pasir pada hilir bendung.

Gejala ini dapat dilihat pada grafik  $hw/hc$  vs  $S/T$  dengan variasi panjang penempatan sheet pile ( $X/B$ ) Tinggi muka air kritis ( $hc$ ) merupakan tinggi muka air ketika mulai terjadi gejala sand boiling di hilir bendung.

#### 4.2 Jenis pasir

Kecenderungan ini berlaku baik pada lapisan pasir kasar homogen maupun pada lapisan pasir halus homogen. Hasil pengamatan memperlihatkan bahwa pada material pasir kasar, sand boiling terjadi pada ( $hc$ ) yang lebih rendah dibandingkan dengan pasir halus. Dari jenis susunan lapisan pasir didapatkan bahwa kejadian sand boiling akan lebih cepat terjadi pada lapisan pasir halus dibandingkan dengan lapisan pasir kasar homogen.

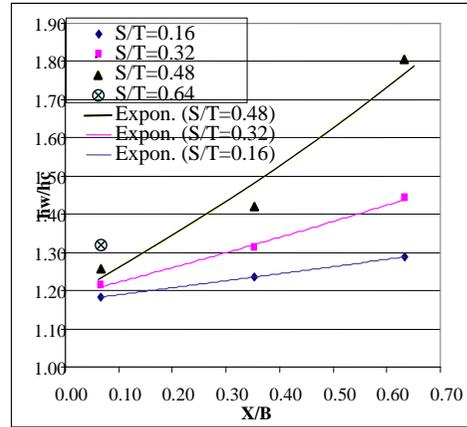


Gambar 2. Grafik hubungan  $hw/hc$  vs  $S/T$  susunan lapisan pasir halus

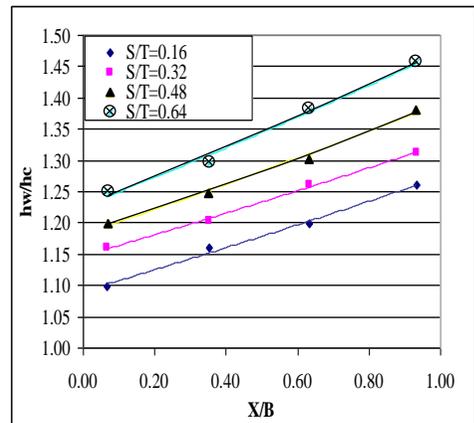
#### 4.3 Jarak Sheet pile dari muka bendung

Penempatan sheet pile dibawah bendung ( $X$ ) juga divariasikan mulai dari muka bendung = 1cm, 5,3cm, 9,3cm dan 14,5cm hasil pengamatan menunjukkan bahwa sand boiling lebih sulit terjadi pada saat penempatan sheet pile berjarak 14,5 cm dari muka bendung. Panjang bendung ( $B$ ) mempengaruhi panjang pengaliran dan meredam energi air sehingga sand boiling sulit terjadi. Tebal material ( $T$ ) pada saat dilakukan pengamatan sand

boiling terdapat dua variasi yaitu 10cm, dan 12,5cm, hasil pengamatan menunjukkan bahwa sand boiling lebih sulit terjadi pada saat ketebalan 10cm.



Gambar 3. Grafik hubungan  $hw/hc$  vs  $S/T$  dengan beberapa nilai perbandingan  $X/B$  pada  $B/T$  untuk susunan lapisan pasir kasar.



Gambar 4. Grafik hubungan  $hw/hc$  vs  $S/T$  dengan beberapa nilai perbandingan  $X/B$  pada  $B/T$  untuk susunan lapisan pasir halus.

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

Hasil percobaan studi model stabilitas sand boiling pada konstruksi bendung, Untuk mengamati terjadinya sand boiling pada (kasus tanah berpasir dengan lapisan homogen ) dapat ditarik kesimpulan :

1. Sand boiling terjadi apabila tinggi muka air di depan dan belakang bendung terdapat beda tinggi. Sand boiling akan lebih mudah terjadi bila sheet pile ditempatkan dekat muka bendung.
2. Sand boiling sulit terjadi bila sheet pile ditempatkan lebih dalam
3. Dibutuhkan energi ( $hw/hc$ ) yang lebih besar pada pasir kasar dibandingkan dengan pasir halus.

#### 5.2 Saran

Guna pengembangan penelitian studi model stabilitas sand boiling pada konstruksi bendung perlu melakukan penelitian untuk mengamati perilaku. Stabilitas piping pada konstruksi bendung karena penulis tidak dapat melakukan akibat keterbatasan alat uji model dan waktu.

#### 6. Daftar Pustaka

- A.C. Palmer, (1991), *Speed effect in cutting and ploughing*, Journal Geotechnique, Vol.49.No.03,pp.285-294.
- Bowles, Joseph E, (1979), *Physical and Geotechnical properties of soils*, McGraw-Hill Inc Kogakusha.
- Cedergreen, Harry R, (1989), *Seepage, Drainage and Flow Nets*, third edition, John Wiley and Sons, United States of America.
- Das, Braja, M, (1998), *Principles of Geotechnical Engineering*, Fourth edition, PWS Publishing, United State of America.
- Edil,B Tuncer, (1982), *Seepage, Slope and embankments*, Class Note CEE30, Departemen of Civil and Environmental Engineering University of Winsconsin-Madison
- Griffith, D.V, (1994), *Seepage beneath unsymtri cofferdam*, Journal Geotechnique, Vol.44, No.02, pp.297-305.
- Holtz, Robert D, (1981) *An introduction to geotechnical engineering*, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs.
- R.De Boer, (1997), *The effect of uplift in liquid-saturated porous solids*, Journal Geotechnique, Vol. 47, No.02, pp.289-298.