

Pemasukan Udara secara Alamiah Ke dalam Aliran di Saluran Curam (*Self Air Entrainment in Steep Channel Flow*)

Oleh: Yeri Sutopo
(Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil FT UGM Yogyakarta)

ABSTRAK

Erosi dasar dan dinding saluran curam dapat dikurangi dengan cara memasang *slot aeration* atau *aerator*. Prinsip pemasangan *slot aeration* atau *aerator* adalah memasukkan udara hingga ke dasar saluran, sehingga tekanan di dasar saluran dapat ditingkatkan. Berdasarkan uraian di atas, maka tujuan penelitian yaitu (1) merumuskan proses gejala pemasukan udara alamiah pada saluran curam di lokasi *developing aerated flow*; (2) menyusun persamaan distribusi konsentrasi udara pada kondisi pemasukan udara alamiah di saluran curam di lokasi *developing aerated flow*; dan (3) merumuskan gejala erosi dasar pada kondisi pemasukan udara alamiah di saluran curam di lokasi *developing aerated flow*. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan di Laboratorium Hidraulika Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM. Penelitian ini menggunakan saluran dengan panjang 10 m, lebar 0,2 m, tinggi 0,4 m, kemiringan bervariasi mulai 20°, 30°, serta 40°. Saluran menyatu dengan dinding bak air. Penyaluran air ke dalam bak dilakukan melalui tangki yang dikendalikan oleh katup. Debit divariasikan mulai dari 0,020 m³/dt, 0,3 m³/dt dan 0,4 m³/dt. *V-Notch* digunakan untuk mengkalibrasi hasil pengukuran debit. *Seperangkat kamera video dan kamera* digunakan untuk mengambil gambar gerakan gelembung udara. Selanjutnya, jumlah gelembung dihitung per ketinggian *z*, kecepatan gelembung udaranya ditentukan menggunakan *Particle Tracking Velometry* (PTV).

Kata kunci: pemasukan udara secara alamiah (*self air entrainment*), ke dalam aliran di saluran curam

PENDAHULUAN

Kikisan dan gerusan adalah proses gesekan pada permukaan dasar sungai atau saluran yang menyebabkan lapisan itu terkelupas sedikit demi sedikit. Makin tinggi kecepatan aliran, makin besar kikisan atau gerusan yang terjadi. Kecepatan yang tinggi pada aliran menyebabkan terjadinya tekanan rendah atau negatif dalam aliran, terutama di dasar saluran atau sungai. Gaya yang disebabkan oleh tekanan negatif akan menarik unsur-unsur pada struktur bangunan hidraulik yang selanjutnya akan mengakibatkan pengelupasan pada permukaan dasar bangunan. Lama kelamaan pengelupasan dasar bangunan hidraulik akan membentuk lubang kecil yang selanjutnya menjadi lubang besar yang membahayakan struktur hidraulik.

Dalam perencanaan saluran yang mengalirkan aliran superkritik seperti misalnya di saluran luncur (*chuteway*) pada umumnya tidak mempertimbangkan aspek masuknya udara ke dalam aliran. Pada aliran superkritis udara dari atmosfer masuk ke dalam aliran. Masuknya udara dalam aliran akan memperbesar volume aliran, yang mana hal ini dapat menyebabkan aliran melimpas di atas dinding samping saluran luncur atau bangunan pelimpah, sehingga gejala ini harus diperhitungkan dalam perencanaannya (Yazdi, Manizani, dan Matorakis, 2008: 154).

Kondisi hidraulik di bangunan pelimpah melibatkan empat resim aliran yaitu (1) aliran subkritik, saat aliran mendekati bangunan pelimpah; (2) aliran kritik pada saat melewati puncak (*crest*); (3) aliran superkritik pada saluran luncur di hilir (*crest*); dan (4) aliran kritis di ujung akhir saluran luncur (Bhajantri, Eldho, dan Deolalikar, 2006: 744). Menurut Borman seperti yang dikutip oleh Falvey (1980: 15), resim pemasukan udara secara alami di bangunan pelimpah melibatkan tiga wilayah yaitu (1) *no air entrainment*; (2) *developing*; dan (3) *fully developed*. Aliran superkritik yang terjadi di saluran luncur serta pada wilayah pemasukan udara *no air entrainment* dan *developing* di duga dapat menyebabkan erosi. Dugaan ini didukung oleh Kramer dan Hager (2005:1182) bahwa erosi terjadi di wilayah yang mana tekanan rendah serta di wilayah yang mana gelembung udara belum menyentuh dasar saluran atau di wilayah *developing*.

Tujuan penulisan adalah: (1) Merumuskan proses gejala pemasukan udara alamiah (*self air entrainment*) pada saluran curam di lokasi *developing aerated flow*; (2) Mengembangkan persamaan distribusi konsentrasi udara pada kondisi pemasukan udara alamiah (*self air entrainment*) pada saluran curam di lokasi *developing aerated flow*; dan (3) Merumuskan mengenai gejala erosi dasar pada kondisi pemasukan udara alamiah (*self air entrainment*) pada saluran curam di lokasi *developing aerated flow*;

STUDI PUSTAKA

Aliran Superkritik

Sifat-sifat aliran di saluran terbuka pada dasarnya ditentukan oleh adanya pengaruh kekentalan (*viscositas*) dan pengaruh gravitasi dalam perbandingannya dengan gaya-gaya

kelembaman (*inertial force*). Tegangan permukaan sebenarnya juga dapat berpengaruh pada sifat-sifat aliran, namun dalam kebanyakan aliran sifat ini tidak memegang peranan penting, oleh karena itu pada masalah saluran terbuka sering tidak diperhitungkan. Pada aliran di saluran terbuka selanjutnya yang diperhitungkan adalah pengaruh kekentalan dan gravitasi saja.

Pengaruh kekentalan (*viscosity*) nampak dalam kategori sifat aliran yaitu laminar, turbulen dan peralihan (*transition*), hal ini tergantung pada pengaruh kekentalan sehubungan dengan kelembamannya (*inertia*). Aliran adalah laminar jika gaya kekentalan relatif sangat besar dibandingkan dengan gaya inersia, kekentalan berpengaruh besar terhadap perilaku aliran. Aliran adalah turbulen jika gaya kekentalan relatif lemah dibandingkan dengan gaya kelembamannya (Anggrahini, 2005:6).

Jika yang menjadi pertimbangan di dalam aliran adalah besarnya perbandingan antara gaya-gaya kelembaman dan gaya-gaya gravitasi, maka aliran dapat dikategorikan menjadi aliran subkritis, kritis, dan superkritis. Parameter tak berdimensi yang membedakan tipe aliran tersebut adalah bilangan Froude (F_r) yaitu angka perbandingan antara gaya kelembaman dan gaya gravitasi, yang diekspresikan dalam bentuk:

$$F_r = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gL}} \quad (4.1.1)$$

Keterangan:

F_r : Bilangan Froude

\bar{u} : Kecepatan rata-rata aliran (m/dt)

L : Panjang karakteristik, pada saluran terbuka panjang karakteristik diambil sama dengan kedalaman hidraulik $D = \frac{A}{T}$

G : Gaya gravitasi (m/dt²)

Kecepatan superkritis di dalam aliran di saluran terbuka diketahui dapat menyebabkan pemasukan udara ke dalam aliran, hal ini terjadi ketika energi kinetik pada permukaan aliran melampaui energi tegangan permukaan, serta saat lapis batas turbulen menjangkau permukaan aliran. Aliran dalam saluran lancar, lazimnya superkritis, hal ini menyebabkan terjadinya aerasi. Desain bangunan hidraulik seperti saluran lancar membutuhkan perhitungan untuk menentukan

besarnya pemasukan udara, hal ini dilakukan guna menentukan ketinggian tembok sisi samping bangunan pelimpah (Afshar, Raju dan Asawa, 2004: 624).

Kecepatan yang tinggi pada aliran menyebabkan terjadinya tekanan rendah dalam aliran, terutama di dasar saluran atau sungai. Gaya yang disebabkan oleh tekanan akan menarik unsur-unsur pada struktur bangunan hidraulik yang akan mengakibatkan pengelupasan pada permukaan dasar. Lama kelamaan pengelupasan dasar bangunan hidraulik akan membentuk lubang kecil yang selanjutnya menjadi lubang besar yang membahayakan struktur hidraulik. Makin tinggi kecepatan aliran, makin besar kikisan atau gerusan yang terjadi.

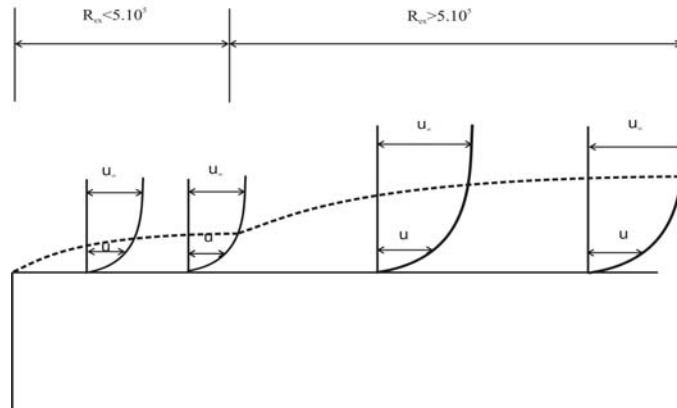
Lapisan Batas Turbulen

Lapisan batas adalah suatu lapisan aliran setebal δ (delta) di atas batas aliran yang mana kecepatan aliran mendapatkan hambatan disebabkan oleh kondisi batas aliran tersebut. Tebal lapisan batas δ pada dasarnya ditentukan oleh jarak dari permukaan batas aliran sampai pada suatu titik yang mana kecepatan aliran $u = 0,995u_{\infty}$, dengan pengertian bahwa u_{∞} sama dengan kecepatan permukaan aliran. Chow seperti yang dikutip oleh Rosalina (1992: 177) menyatakan bahwa ketebalan lapisan batas δ merupakan besaran jarak yang tegak lurus terhadap permukaan batas yang mana kecepatan u sama dengan 99% dari kecepatan batas u_{∞} , serta kurva distribusi kecepatan di lapisan batas berbentuk asimtotis.

Pembentukan lapisan batas dapat dijelaskan dengan mengambil contoh aliran sepanjang suatu saluran dengan bidang dasar yang mempunyai permukaan licin serta mempunyai panjang yang tidak terhingga seperti tersaji dalam Gambar 1 di bawah ini.

Aliran yang masuk ke kedalaman saluran diasumsikan sebagai aliran seragam dalam arah vertikal yang mempunyai kecepatan u_{∞} . Pada waktu aliran mencapai bidang datar, tegangan geser yang besar terbentuk pada permukaan bidang tersebut. Kecepatan aliran pada permukaan bidang adalah nol, aliran di atas bidang terhambat karena adanya geseran kekentalan. Wilayah yang mana aliran itu terhambat disebut sebagai lapisan batas.

Pada suatu jarak longitudinal aliran tertentu di dalam lapisan batas aliran adalah laminier. Di hilir dari wilayah laminier aliran menjadi turbulen dan aliran menjadi sangat terdistorsi karena sifat acak dan tidak beraturannya turbulensi. Pada aliran turbulen terjadi pencampuran yang tidak beraturan dari butir-butir aliran. Pada aliran laminier, pencampuran hanya terjadi pada skala molokuler.



Gambar 1 Pembentukan lapisan batas

Di daerah turbulen, profil distribusi kecepatan cenderung seragam dengan gradien kecepatan besar di daerah dekat permukaan bidang. Transisi dari aliran laminier ke aliran turbulen tergantung pada kekasaran permukaan bidang, kecepatan dan tingkat turbulensi aliran yang masuk ke saluran. Transisi dari aliran laminier ke turbulen terjadi pada nilai kritik bilangan Reynolds Re_{crit} sekitar 2×10^5 sampai 3×10^6 .

Pembentukan lapisan batas dapat dinyatakan dalam persamaan yang dikemukakan oleh Cebeci dan Bradshaw seperti yang dikutip oleh Anggrahini (2005:117). Pada aliran laminier pembentukan lapisan batas dinyatakan dengan:

$$\frac{\delta}{x} = 5 \left[\frac{u_{\infty} x}{\nu} \right]^{-0,5} \tag{4.1.2}$$

Pada aliran turbulen dinyatakan dengan:

$$\frac{\delta}{x} = 0,4 \left[\frac{u_{\infty} x}{\nu} \right]^{-0,2} \tag{4.1.3}$$

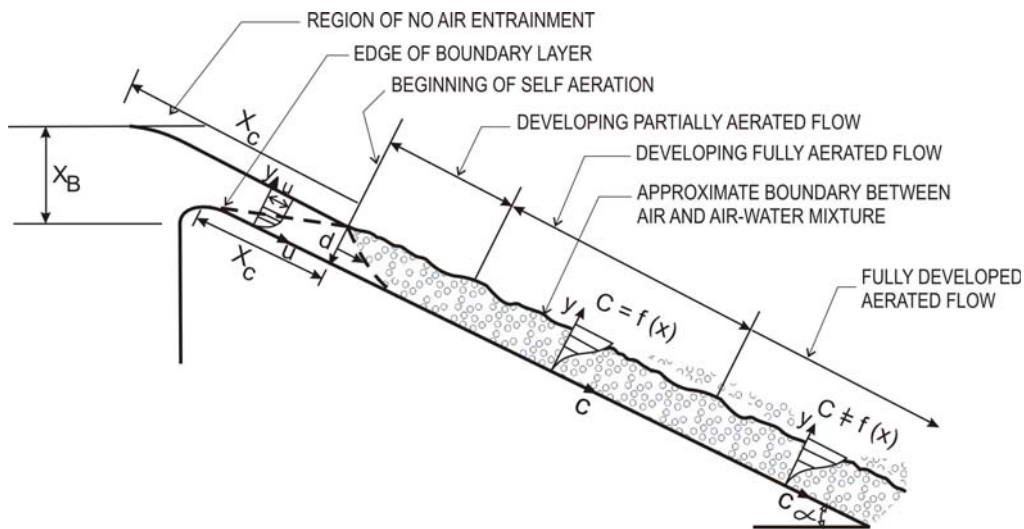
Keterangan:

- X : Jarak dari ujung permukaan bidang dasar
- δ (delta) : Ketebalan lapisan batas
- \mathcal{G} (nu) : Kekentalan kinematik

Self Air Entrainment

Salah satu karakteristik penting dalam aliran di permukaan saluran luncur adalah udara masuk dari atmosfer ke dalam aliran dan bercampur dengan air. Falvey (1980: 7) mendefinisikan pemasukan udara sebagai proses masuknya udara dari atmosfer ke dalam badan air. Pemasukan udara ditandai dari adanya air putih dalam aliran. Pemasukan udara seperti yang diuraikan di atas dapat juga disebut sebagai *self aeration*.

Proses terjadinya *self aeration* seperti yang tersaji dalam Gambar 2 akan dideskripsikan secara lengkap di bawah ini.



Gambar 2 Pemasukan udara sepanjang pelimpah

Di dasar aliran bangunan pelimpah, lapisan batas mulai terjadi sejak di atas ambang atau *crest*. Lapis batas laminer biasanya pendek saja, hal ini disebabkan oleh kecepatan dan kekasaran

aliran yang mulai meningkat. Setelah itu terjadi lapis batas turbulen. Pada titik tertentu yaitu di titik C yang jaraknya dari ambang pelimpah adalah X_c , lapis batas turbulen mencapai permukaan aliran. Dalam istilah hidraulik aliran telah berkembang penuh. Pada saat inilah proses pemasukan udara dimulai, lazimnya lokasi ini disebut sebagai *the point of inception*.

Menurut Chanson (2004) proses pemasukan udara ini terjadi karena fluktuasi kecepatan aliran turbulen u' sudah cukup besar untuk mengatasi tegangan permukaan. Di samping itu fluktuasi kecepatan aliran turbulen u' sudah lebih besar dari pada kecepatan komponen gelembung udara. Persamaan kondisi terjadinya pemasukan udara adalah:

$$u' > \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_w d_{ab}}} \quad (4.1.4)$$

$$u' > u_r \cos \alpha$$

Sumber: Chanson dalam *Self Aerated Flows on Chutes and Spillways* "Journal of Hydraulic Engineering ASCE (1993: 221)

Keterangan:

- α (alpha) : Kemiringan saluran luncur atau pelimpah
- d_{ab} : Diameter gelembung udara
- u' : Kecepatan normal aliran turbulen
- u_r : Kecepatan gelembung udara

METODE PENELITIAN

Metode Eksperimen

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan di Laboratorium Hidraulika Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM. Pada penelitian ini digunakan saluran curam yang mempunyai panjang 10 m, lebar 0,2 m dengan kemiringan berubah-ubah mulai 20°, 30°, serta 40°, yang menyatu dengan dinding bak air. Penyaluran air ke dalam bak dilakukan dari

tangki yang dikendalikan oleh katup. Debit divariasikan mulai dari 0,020 m³/dt, 0,3 m³/dt dan 0,4 m³/dt. Instrumen berupa *V-Notch* digunakan untuk mengkalibrasi hasil pengukuran debit. *Seperangkat kamera video dan kamera* digunakan untuk mengambil gambar gerakan gelembung udara. Berdasarkan gambar yang diperoleh selanjutnya dihitung jumlah gelembung per ketinggian *z* serta kecepatan gelembung udaranya menggunakan perangkat lunak *Particle Tracking Velometry (PTV)*. Diameter gelembung diukur menggunakan software AutoCad.

Tabel 1. Rencana Pelaksanaan Eksperimen

No. Uji	Q(m ³ /dt)	z (m)	b (m)	b/z	α (°)	$u=Q/(zxb)$ m/dt	$Fr=\bar{u}/(gd)^{1/2}$	$R=bz/b+2z$	$Re=4\bar{u}R/\nu$
1	0,04	0,06	0,2	3,3333333	20	3,333333333	4,344788261	0,0375	384615,3846
2	0,04	0,06	0,2	3,3333333	20	3,333333333	4,344788261	0,0375	384615,3846
3	0,04	0,06	0,2	3,3333333	20	3,333333333	4,344788261	0,0375	384615,3846
4	0,04	0,06	0,2	3,3333333	20	3,333333333	4,344788261	0,0375	384615,3846
5	0,04	0,06	0,2	3,3333333	20	3,333333333	4,344788261	0,0375	384615,3846
6	0,04	0,055	0,2	3,6363636	30	3,636363636	4,950527276	0,03548387	397022,3325
7	0,04	0,055	0,2	3,6363636	30	3,636363636	4,950527276	0,03548387	397022,3325
8	0,04	0,055	0,2	3,6363636	30	3,636363636	4,950527276	0,03548387	397022,3325
9	0,04	0,055	0,2	3,6363636	30	3,636363636	4,950527276	0,03548387	397022,3325
10	0,04	0,055	0,2	3,6363636	30	3,636363636	4,950527276	0,03548387	397022,3325
11	0,04	0,05	0,2	4	40	4	5,711372492	0,03333333	410256,4103
12	0,04	0,05	0,2	4	40	4	5,711372492	0,03333333	410256,4103
13	0,04	0,05	0,2	4	40	4	5,711372492	0,03333333	410256,4103
14	0,04	0,05	0,2	4	40	4	5,711372492	0,03333333	410256,4103
15	0,04	0,05	0,2	4	40	4	5,711372492	0,03333333	410256,4103

Sumber: Hasil perhitungan

Gelembung udara diukur di 3 titik tengah longitudinal pada $x= 6,0; 6,5; 7,0$; sepanjang zona ”*developing*”, di samping itu diukur juga di lima titik tengah longitudinal. Di samping itu diukur pada lima titik vertikal, yaitu $z=0,02; 0,04; 0,06$. Di titik $x=6,0$ m (hasil hitungan) dianggap $X_c = 0$ yang menjadi referensi aliran hulu yang merupakan awal dari posisi

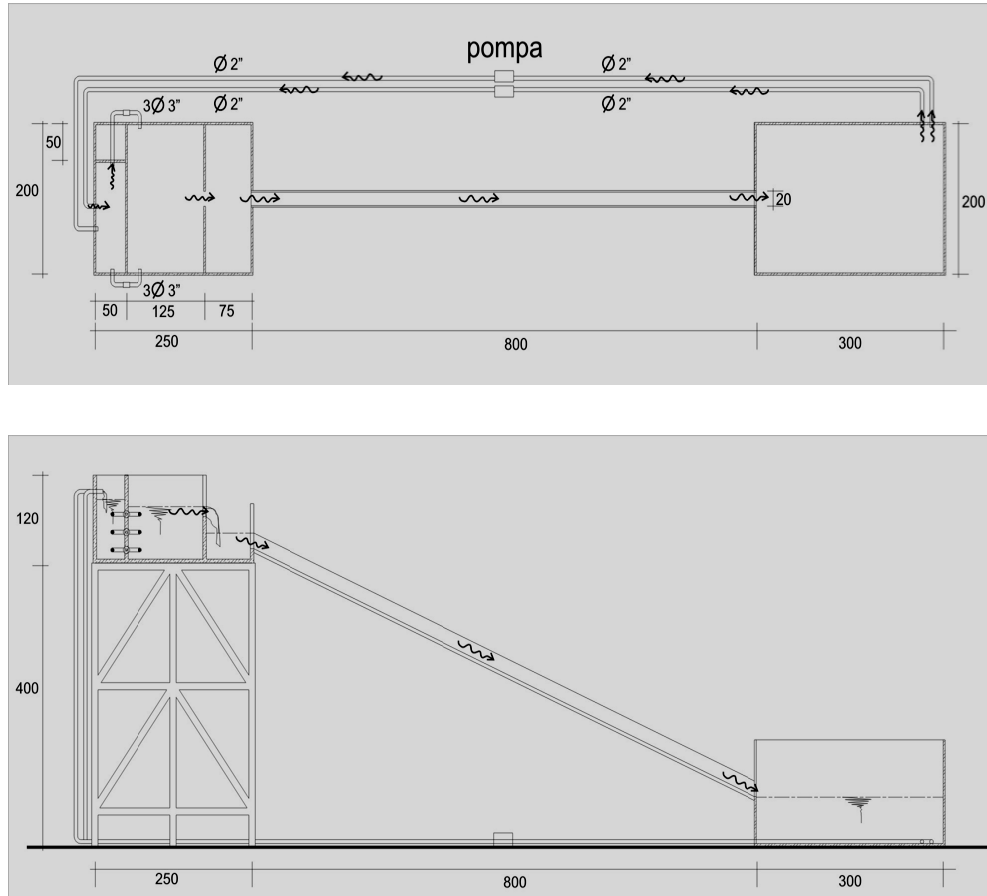
”*developing*”. Tekanan aliran diukur di zona ”*developing*”, di tiga titik tengah longitudinal pada $x= 6,0; 6,5; 7$, semuanya terletak di dasar aliran.

Eksperimen dilakukan untuk sembilan (3 debit dan 3 kemiringan) kondisi aliran seragam superkritik masing-masing lima ulangan. Secara terperinci kondisi uji penelitian ini disajikan dalam Tabel 1, yang mana Q adalah debit, b/z adalah aspek rasio, $F_r = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gh}}$ yang lazim disebut angka Froude, \bar{u} adalah kecepatan rerata, $R_e = 4\bar{u}R/\nu$ adalah angka Reynolds, serta R adalah radius hidraulik. Uji dalam Tabel 5 diurutkan mulai dari nilai R terkecil meningkat ke nilai R terbesar.

Langkah-langkah Penelitian

Di bawah ini diuraikan mengenai langkah-langkah penelitian, seperti yang terdapat dalam Gambar 3, yaitu:

- (1) Air dipompa dari kolam bawah ke dalam kolam tandon;
- (2) Air kemudian masuk ke kolam tandon yang dasarnya diberikan kelereng serta dindingnya dilapisi dengan bahan kasar yang mampu mengurangi olakan;
- (3) Air selanjutnya masuk ke kolam pengarah;
- (4) Melalui bangunan pengukur debit *V Notch*, aliran diatur sehingga debit yang keluar adalah 20, 300, dan 40 l/dt;
- (5) Air selanjutnya masuk ke saluran luncur;
- (6) Kemiringan saluran luncur dibuat berturut-turut 20°, 30°, serta 40 °;
- (7) Memasang *point gauge* di hulu dan hilir saluran luncur;
- (8) Memasang lampu halogen di atas saluran luncur di zona *developing*;
- (9) Menentukan kecepatan dan jumlah gelembung udara di tiga titik tengah vertikal pada $x=6,0; 6,5; \text{ dan } 7,0$ di zona “*developing*” yang divariasikan dalam lima titik vertikal, yaitu $z=0,02; 0,04; \text{ dan } 0,06$;
- (10) Menentukan tekanan di dasar aliran pada $x=6,0; 6,5; \text{ dan } 7,0$ di zona “*developing*”;
- (11) Menentukan terjadinya erosi di dasar saluran di zona *developing*;



Gambar 3. Rencana eksperimen pada model saluran lancar

Analisis Data

Analisis Kecepatan Gelembung Udara

Data yang tersimpan di kamera video yang berupa aliran gelembung udara, kemudian dipindahkan ke komputer dengan bantuan Software Asus Live dalam bentuk file AVI. Selanjutnya dengan ADOBE Premiere data file AVI diubah dalam bentuk video klip dalam file Bitmap. File ini selanjutnya diubah menjadi file JPG menggunakan software Irfan View.

Pada prinsipnya analisis yang dilakukan adalah menghitung jarak tempuh partikel yang diperoleh dari selisih absis (Δx) partikel pada frame ke- n dan frame ke- $(n+1)$. Jika pada selisih frame ke- $(n+1)$, partikel belum mengalami perubahan posisi maka diamati pada *frame* yang lebih tinggi sampai diperoleh perubahan posisi partikel yang dapat terukur. Kecepatan partikel diperoleh dengan membagi selisih absis dengan selisih waktu antar frame. Selisih waktu antar frame diatur 1/30 detik berdasarkan kapasitas *capture 30 fps (frame per second)*.

Di samping dianalisis secara manual seperti yang diuraikan di atas, dapat juga dilakukan dengan program *tracking*. Program ini menganalisis kecepatan gelembung udara dengan cara menghitung perubahan letak gelembung udara secara otomatis. Program ini disebut *Particle Tracking Velocymetry (PTV)* yang disusun dalam bahasa Program Delphi.

Analisis Konsentrasi Gelembung Udara

Data yang tersimpan di kamera video yang berupa aliran gelembung udara dan air, kemudian dipindahkan ke komputer dengan bantuan *Software Asus Live* dalam bentuk file AVI. Selanjutnya dengan *ADOBE Premiere* data file AVI diubah dalam bentuk video klip dalam file Bitmap. File ini selanjutnya diubah menjadi file JPG menggunakan *software Irfan View*.

Dalam analisis data dilakukan perbaikan bayangan yaitu pengurangan intensitas warna, pengaturan kontras dan penajaman obyek. Pada penelitian ini digunakan software *Colordesk Photo* dan *Adobe Photoshop*. Software untuk mengukur diameter dan gerakan gelembung udara digunakan *AutoCad* Software ini mempunyai kemampuan dalam memperbesar ukuran gelembung sesuai skala yang sesungguhnya. Dalam penelitian ini diperoleh lebar gelembung, tinggi gelembung, dan diameter gelembung.

Pada kenyataannya, ukuran gelembung sangat bervariasi, sehingga jika dilakukan pengukuran lebar atau tinggi gelembung secara satu per satu maka akan memakan waktu, di samping itu ketelitian menjadi berkurang. Oleh karena itu, perlu ditemukan kecenderungan hubungan antara lebar dan tinggi gelembung, yaitu dengan cara analisis regresi yang selanjutnya ditemukan garis kecenderungannya serta persamaan regresinya yang dapat digunakan untuk menghitung lebar atau tinggi gelembung udara. Wijayanti (1998:) menemukan persamaan

regresi gelembung udara sebagai berikut $y = 0,1273 \ln x + 0,3964$ atau $x = e^{7,8576 y - 3,113904}$. Selanjutnya, dapat dihitung lebar atau tinggi gelembung serta volume gelembung udara. Kemudian dengan menghitung jumlah gelembung dalam suatu volume kontrol (volume kontrol adalah luasan yang diakibatkan oleh sinar lampu *halogen* dikalikan dengan 1 cm ketinggian aliran) dikalikan volume gelembung yang selanjutnya diperoleh konsentrasi gelembung udara pada titik ketinggian yang diinginkan.

Analisis Tegangan Geser τ_0

Tegangan geser τ_0 dianalisis menggunakan metode kemiringan garis energi yang didekati dengan kemiringan dasar saluran atau talang i_b melalui persamaan sebagai berikut:

$$\tau_0 = \rho g R i_f$$

Di samping itu, digunakan metode pengukuran langsung menggunakan instrumen yang dikembangkan sendiri. Instrumen ini berupa suatu balok yang dihubungkan dengan per. Balok dapat bergerak maju mundur jika mendapatkan dorongan dari aliran. Per dihubungkan dengan instrument berupa potensiometer yang lazim digunakan di equalizer. Data yang diperoleh berupa panjang geseran balok dari tempat semula yang merupakan wujud dari tegangan geser τ_0 .

DAFTAR PUSTAKA

- Anggrahini, S., 2005, *Hidrolika Saluran Terbuka*, Srikandi, Surabaya.
- Afshar, N., R., Raju, R., dan Asawa, G., L., 1994, "Air concentration distribution in self-aerated flow", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 4.
- Bhajantri, M.R., Eldho, T.I., dan Deolalikar, P.B., 2006, "Hydrodynamic modeling of flow over a spillway using a two dimensional finite volume based numerical model", *Sadhana* Vol. 31, Part 6, Desember.
- Chanson, H, 2004, "Drag reduction in open channel flow by aeration and suspended load", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 1.

- Chanson, H., 1997, "Self aeration on chute and stepped spillways air entrainment and flow aeration in open channel flows", *Dept. Of Civil Engrg. Univ. of queensland, Brisbane QLD 4072, Australia*.
- Chanson, H., 1995, "Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerator", *Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 3*.
- Chanson, H., 1994, "Drag reduction in skimming flow on stepped spillways by aeration", *Journal of Hydraulic Research, Vol. 32, No. 1*.
- Chanson, H., 1993, "Self aerated flows on chute and spillway", *Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 2, February*.
- Chanson, H., 1989, "Flow downstream of an aerator-aerator spacing", *Journal of Hydraulic Research, Vol. 27, No. 4*.
- Chanson, H., 1988, "Study of air entrainment and aeration devices on spillway model", *Thesis Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of Canterbury Christchurch, New Zealand*.
- Falvey, H., T., 1980, *Air Water Flow Hydraulic Structure*, United States Departement of Interior, Water and Power Resources Service.
- Ferrando, A.M., 2002, "On the incipient aerated flow in chutes and spillways", *Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, No. 1*.
- Kramer, K., dan Hager W., H., 2005, "Air transport in chute flows", *International Journal of Multiphase Flow*, pp. 1181-1197.
- Kironoto, A., B., 2007, "Penggunaan metode Clauser untuk penentuan kecepatan gesek u_* , pada saluran Mataram tampang segi segi empat", *Media Teknik No. 4, Th. XXIX Edisi November, pp. 253-260*.
- Munson, B., R., Young, D., F., dan Okiishi, T., H., 2004, *Mekanika Fluida*, Terjemahan Harinaldi dan Budiarmo, UI, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Purwatana, B., 2004, "Metode eliminasi sinyal getaran bebas pada pengukuran gaya tumbukan dengan transducer gaya strain gauge", *Dipresentasikan pada Seminar Hasil Penelitian Jurusan Teknik Pertanian FTP-UGM*.