



KARAKTERISTIK ALIRAN AIR DALAM MODEL SALURAN TERBUKA MENUJU KAJIAN HIDROLIKA EROSI DAN TRANSPOR SEDIMEN

Bakhtiar¹, Joetata Hadihardaja¹

Diterima 12 Maret 2009

ABSTRACT

This paper is prepared as a comprehensive resume of results of continuing research of the author at Fluid Mechanics and Hydro dynamics Laboratory, Departement of Civil Engineering, Engineering Faculty, Sangga Buana YPKP University, in collaborating with lecturer team and last year student researchers. The propose of this research is to prove theoretical and mathematical of fluid mechanics and fluid dynamics with observation and measurements to the real water flow in laboratory channel model. Two parts of experiments was done, first allowing water discharge in glass ditch model, and second with add the bottom channel with sand layer. So these research included the difference viscosity of fluids. The results proved that theoretical and mathematical models of fluid mechanics and fluid dynamics characteristic are agreed with experimental observations and measurements in laboratory. Those characteristics included discharge, velocity, flow depth, Froude number, hydraulic radius, and shear stress. Next, these research also propose to be continue to observe the characteristic of sediment transport in water flow.

Keywords : *Theoretical discharge, theoretical velocity, Froude number, observed discharge, observed velocity, water flow depth, hydraulic radius, shear stress.*

ABSTRAK

Makalah ini merupakan rangkuman hasil pekerjaan penelitian yang dilakukan penulis selama di Laboratorium Mekanika Fluida dan Hidrodinamika Jurusan Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP, bersama tim dosen dan para mahasiswa tugas akhir. Tujuan penelitian terutama adalah untuk pembuktian model-model teoritik melalui

¹ S3 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Kampus Peleburan Jl. Hayam Wuruk Semarang
Email : bakhtiar_usb@yahoo.co.id (081394936664)

pengamatan langsung aliran air nyata dalam saluran yang dimodelkan. Dua bagian eksperimen telah dilakukan yaitu dengan saluran kaca dan saluran kaca yang dasarnya dihampar pasir, dengan demikian aliran air pada eksperimen kedua akan membawa pasir, sehingga penelitian ini menguji karakteristik dua aliran dengan viskositas yang berbeda. Hasil menunjukkan bahwa karakteristik aliran air di saluran terbuka yang diturunkan secara teoritik dan didekati dengan model matematik sesuai dengan hasil pengamatan dan pengukuran pada model saluran di laboratorium. Karakteristik yang terbukti menyangkut debit, kecepatan, kedalaman aliran, bilangan Froude, jari-jari hidrolis, dan tegangan geser. Penelitian ini ditujukan pula untuk mendalami aspek transportasi sedimen, sebagai penelitian lanjutannya.

Kata kunci: *Debit teoritik, kecepatan aliran teoritik, bilangan Froude, debit pengamatan, kecepatan aliran pengamatan, kedalaman aliran pengamatan, jari-jari hidrolis, tegangan geser.*

PENDAHULUAN

Penelitian ini bertujuan untuk mendalami karakteristik dasar dan hubungan antar variabel menyangkut aliran air dalam suatu saluran terbuka, dengan jalan membandingkan antara hasil penurunan logika dan rumus matematis dengan hasil pengukuran langsung variabel aliran air dalam suatu model saluran terbuka yang dialiri air di laboratorium. Dalam penelitian ini diupayakan pula pemodelan untuk menuju pengenalan erosi dan hidrolika transpor sedimen, dengan jalan menambahkan lapisan pasir pada dasar model saluran yang terbuat dari kaca lalu di alirkan air kedalamnya dan diamati serta diukur variabel-variabel dasarnya.

Karakteristik dan variabel-variabel dasar aliran air yang menjadi objek pengamatan dan pembahasan dalam penelitian ini adalah : Beda tinggi permukaan air, kecepatan aliran, energi spesifik, keliling basah, jari-jari hidrolis, debit aliran, bilangan Froude, beda energi, luas basah, dan tegangan geser.

Karakteristik Aliran Air Menurut Pendekatan Teoritik Dan Model Matematik

Material yang ada di alam dapat berwujud padat, cair, gas. Semua material dapat berubah wujudnya dari padat menjadi cair atau dari cair menjadi gas dan sebaliknya. Pada semua material dapat terjadi perubahan bentuk (deformasi). Apabila pada benda padat diberi gaya geser yang relatif besar maka akan menimbulkan deformasi yang relatif kecil, namun sebaliknya apabila pada benda cair (fluida) diberi gaya geser yang relatif kecil maka akan menimbulkan tegangan geser yang relatif besar. Fluida didefinisikan sebagai suatu substansi yang terus menerus berdeformasi apabila diberi gaya geser. Tegangan geser pada fluida nyata akan timbul jika fluida nyata tersebut dalam keadaan bergerak dan memiliki kekentalan (viskositas). Pada fluida ideal (*ideal fluids*) tidak memiliki kekentalan (tidak berviskositas) dan tidak ada tegangan geser dalam keadaan bergerak. Tegangan geser dalam fluida berviskositas merupakan hasil dari gerak relatif antara lapisan aliran yang satu

dan lapisan yang lain, jika terjadi pembesaran tegangan relatif maka akan mengakibatkan terjadinya pembesaran tegangan geser. Aliran disebut laminar apabila hanya tegangan geser akibat viskositas yang ada. Pada kasus ini setiap partikel fluida bergerak pada lintasan yang sejajar dengan garis pembatas (antar lapisan aliran). Dalam kenyataan aliran yang terjadi dalam saluran biasanya bukan aliran laminar tetapi menunjukkan ciri lain yang disebut turbulensi. Dalam keadaan nyata gerak fluida adalah tidak beraturan dalam waktu dan ruang, pada teknik analisis hidrolika didekati dengan penyederhanaan, antara lain dengan mengambil kecepatan rata-rata. Viskositas suatu fluida ditentukan oleh tingkat hambatan yang ditimbulkan pada aliran fluida bersangkutan, hambatan geser terukur sebagai gaya geser total, dimana gaya geser adalah tegangan geser per satuan luas (Makrup, 2001). Menurut postulat Newton tegangan geser dalam fluida sebanding dengan tingkat perubahan kecepatan pada satu potongan melintang aliran, disebut gradien kecepatan yaitu merupakan tingkat perubahan waktu pada deformasi sudut. Untuk fluida dengan viskositas tinggi dan aliran fluida dalam kecepatan rendah maka fluida mengalir dalam lapisan yang paralel, dengan tegangan geser (τ) pada setiap harga z , adalah seperti persamaan (1).

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan μ adalah faktor proporsionalitas (kesebandingan) yang dikenal sebagai viskositas dinamik. Sedangkan

viskositas kinematik (ν) didefinisikan sebagai perbandingan antara viskositas dinamik dan rapat massa, digambarkan oleh persamaan (2).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(2)$$

Untuk memberi gambaran tentang gerak fluida dalam batas ruang tertentu dibutuhkan persamaan dasar yaitu persamaan kontinuitas (konservasi massa) dan persamaan gerak (konservasi momentum) yang berkaitan dengan Hukum Newton II (1642-1727). Persamaan gerak fluida tak berviskositas disebut persamaan Euler (1707-1783), dimana integrasi dari persamaan ini untuk kondisi aliran tunak tidak mampat dan tidak berotasi menghasilkan persamaan Bernoulli (1700-1782). Persamaan Bernoulli dapat menjelaskan karakteristik aliran fluida tak-berviskositas yang berkaitan dengan kecepatan, tekanan dan elevasi, dan dapat diaplikasikan untuk fluida berviskositas dengan syarat viskositas diabaikan. Gerak pada aliran fluida berviskositas dapat digambarkan oleh persamaan Navier-Stokes (Claude Louis Navier, 1785-1836 dan Sir George Gabriel Stokes 1819-1903), dimana aplikasi persamaan Navier-Stokes untuk aliran turbulen bisa diturunkan melalui persamaan Reynold (1842-1912).

Aliran yang lewat pada potongan memiliki vektor kecepatan v dan luas potongan dA , maka besarnya flux massa dan flux volume yang lewat potongan dapat digambarkan oleh persamaan (3) dan (4).

$$\text{Flux massa} = \int_A \rho v dA \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Flux volume} = \int_A v dA = \text{konstan} \dots\dots(4)$$

Percepatan aliran fluida berubah-ubah dalam ruang dan waktu, dapat digambarkan persamaan (5).

$$v = f(r, t) = dr / dt \dots\dots\dots(5)$$

Dengan :

$v = Ui + Vj + Wk =$ vektor kecepatan fluida dengan komponen ruang U, V, W
 $r = xi + yj + zk =$ vektor posisi dengan komponen ruang x, y, z

Persamaan keseimbangan massa atau persamaan konservasi massa tiga dimensi untuk fluida tak-mampumampat (*incompressible fluid*) dapat digambarkan dalam notasi skalar oleh persamaan (6) dan dalam notasi vektor persamaan (7).

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{div } v = \nabla \cdot v \dots\dots\dots(7)$$

Persamaan keseimbangan momentum (Hukum Newton II) dalam notasi vektor dapat ditulis seperti persamaan (8) dan dalam notasi skalar adalah persamaan (9).

$$F dt = d(mv) \dots\dots\dots(8)$$

$$F_x = m \frac{\partial U}{\partial t} = ma_x; F_y = m \frac{\partial V}{\partial t} = ma_y; F_z = m \frac{\partial W}{\partial t} = ma_z \dots\dots\dots(9)$$

Persamaan kekekalan momentum untuk fluida tak-berviskositas ($\mu = 0$) dapat digambarkan oleh persamaan Euleur,

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} + \frac{\partial VW}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right)$$

yaitu secara vektor oleh persamaan (10) dan secara skalar oleh persamaan (11).

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - gk \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \dots\dots\dots(11)$$

Dari persamaan-persamaan diatas kemudian melalui penyederhanaan dimensional, diturunkan Hukum Bernoulli, yang berlaku pada setiap titik dalam medan aliran untuk aliran langgeng tak-berotasi, yaitu persamaan (12).

$$H_e = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = \text{konstan} \dots\dots(12)$$

Untuk fluida dengan viskositas tidak sama dengan nol ($\mu \neq 0$), persamaan kekekalan momentum dijelaskan oleh persamaan Navier-Stokes, secara vektor oleh persamaan (13) dan secara skalar dalam koordinat cartesians oleh persamaan (14).

$$\frac{Dv}{Dt} + (\nabla \cdot v)v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu(\nabla^2 v) - gk \dots\dots(13)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial UW}{\partial x} + \frac{\partial VW}{\partial y} + \frac{\partial WW}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - g$$

.....(14)

Dari hasil percobaannya Reynold menyimpulkan perubahan dari aliran laminar ke aliran turbulen akan terjadi pada suatu besaran dengan nilai batas tertentu yang dikenal sebagai bilangan Reynold (R_e), yang mengekspresikan nilai perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskositas, yaitu persamaan (15).

$$R_e = \frac{UL}{\nu} \dots\dots\dots(15)$$

Dimana :
 U = skala kecepatan
 L = skala panjang
 ν = koefisien kekentalan kinematik.

Untuk menghitung debit aliran, berdasarkan data empirik untuk aliran turbulen, formula perhitungan debit pertama kali dikemukakan oleh Chezy (1718-1783) yaitu persamaan (16), kemudian koefisien Chezy dikembangkan oleh Robert Manning (1816-1897) yaitu persamaan (17) dan koefisien untuk kecepatan rata-rata menjadi persamaan (18), kemudian oleh Strickler (1923) menjadi persamaan (19).

$$Q = CA(Ri_e)^{0.5} ; \bar{u} = C\sqrt{Ri_e} \dots\dots(16)$$

Dimana :
 Q = debit pengaliran [m^3/det]
 A = luas tampang aliran [m^2]
 \bar{u} = kecepatan rata-rata tampang aliran [m/det]

C = konstanta Chezy [$m^{0.5}/det$]
 R = jari-jari hidrolis
 i_e = kemiringan garis energi.

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \dots\dots\dots(17)$$

$$\bar{u} = C\sqrt{Ri_e} = \frac{1}{n} R^{2/3} i_e^{1/2} \dots\dots\dots(18)$$

Dimana :
 n = koefisien kekasaran Manning
 R = jari-jari hidrolis yaitu penampang basah saluran dibagi keliling basah saluran ($R = A/P$).

$$\bar{u} = C\sqrt{Ri_e} = K_s R^{2/3} i_e^{1/2} \dots\dots\dots(19)$$

dengan koefisien kekasaran strickler

$$K_s = \frac{1}{n}$$

Strickler (1923) mendefinisikan nilai kekasaran Manning n sebagai fungsi dari ukuran partikel (Morris dan Fan, 1998), yaitu seperti pada persamaan (20).

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} \dots\dots\dots(20)$$

Disamping aliran laminar dan turbulen, pembagian jenis aliran fluida berdasarkan fungsi kecepatan terhadap waktu, dikenal pula aliran langgeng atau aliran tunak (*steady*) dan tak lenggeng (*unsteady*), aliran langgeng jika kecepatan pada satu titik sepanjang waktu konstan (untuk satu

dimensi $\partial U / \partial t = 0$). Jadi untuk aliran turbulen, aliran langgeng adalah apabila kecepatan aliran rata-rata sepanjang waktu pada suatu tampang lintang aliran adalah konstan. Aliran langgeng terdiri dari aliran langgeng seragam dan aliran langgeng tidak seragam. Aliran langgeng seragam merupakan aliran dengan kecepatan rata-rata sepanjang alur aliran sama sepanjang waktu ($\partial u / \partial t = 0$ dan $\partial u / \partial x = 0$), aliran seragam dapat dibagi berdasarkan pola perambatan gelombang menjadi 3 jenis aliran, yaitu aliran sub kritik, aliran kritik, dan aliran superkritik. Untuk identifikasi 3 jenis aliran ini dapat digunakan bilangan Froude, F_r (William Froude, 1810-1879), yang merupakan perbandingan antara kecepatan rata-rata kedalaman (u) dengan cepat rapat gelombang (c), yaitu persamaan (21). Aliran disebut super kritik apabila $F_r > 1$, kritik $F_r = 1$, dan sub kritik $F_r < 1$.

$$F_r = \frac{u}{c} = \frac{u}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots(21)$$

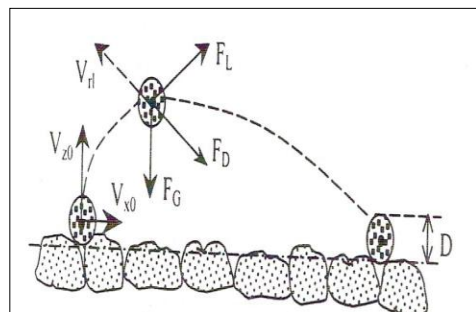
Dimana :

- U = kecepatan aliran
- g = percepatan gravitasi
- h = kedalaman aliran.

Aliran langgeng tak seragam adalah aliran dengan kecepatan pada satu titik sepanjang waktu adalah konstan ($\partial u / \partial t = 0$) tetapi kecepatan sepanjang arah aliran tidak konstan ($\partial u / \partial x \neq 0$, $\partial u / \partial y \neq 0$). Ketidaksagaman diakibatkan perubahan penampang basah akibat adanya penghalang, atau perubahan dasar saluran. Terdapat dua tipe aliran tak seragam, yaitu aliran berubah lambat (*gradually varied flow*) dan aliran

berubah cepat (*rapidly varied flow*). Dalam aliran berubah cepat, variasi kedalaman, lebar, dan kecepatan terjadi pada jarak yang pendek dalam saluran, serat aliran memiliki kelengkungan yang tajam, tekanan yang terjadi pada aliran bukan tekanan hidrostatik. Contohnya adalah aliran pada puncak mercu, aliran jatuh bebas, dan loncatan air.

Adanya suatu benda (butiran sedimen) dalam medan aliran, akan menimbulkan diterimanya gaya-gaya oleh benda tersebut dari fluida yang sedang bergerak, apabila ada kecepatan relatif antara fluida dan benda. Gaya fluida yang bekerja pada arah gerak dari benda, disebut gaya seret (*drag force*), dan yang bekerja tegak lurus dengan arah gerak benda, disebut gaya angkat (*lift force*). Komponen parameter gaya dan kecepatan yang bekerja pada butiran sedimen terdiri dari kecepatan awal, $V_0 = [V_{x0}, V_{z0}]$; kecepatan relatif, (V_{rt}); gaya berat, (F_G); gaya angkat, (F_L) dan gaya seret (F_D), lihat Gambar 1.



Gambar 1 Gaya pada butiran sediment dalam aliran
(sumber: Makrup, 2001)

Gaya seret dapat di ekspresikan oleh persamaan (22), gaya akibat percepatan gravitasi oleh persamaan (23), dan gaya angkat oleh persamaan (24).

$$F_D = C_D 1/2 \rho u^2 A \dots\dots\dots(22)$$

Dimana :

- C_D = koefisien gaya seret
- $u=U_0$ = kecepatan aliran
- A = potongan dari benda normal dalam arah aliran
- ρ = rapat massa fluida.

$$F_G = (\rho_s - \rho) g \pi D^3 / 6 \dots\dots\dots(23)$$

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho u_0^2 A \dots\dots\dots(24)$$

Dimana :

- C_L = koefisien gaya angkat.

Transpor sedimen berupa pasir menurut observasi Yang (1983, dalam Morris dan Fan, 1998) berbasis pada korelasi antara transpor sedimen dengan satu variabel hidrolika menggunakan salah satu dari persamaan dasar (25) sampai persamaan (30).

$$q_s = A(Q - Q_{cr})^B \dots\dots\dots(25)$$

$$q_s = A(V - V_{cr})^B \dots\dots\dots(26)$$

$$q_s = A(S - S_{cr})^B \dots\dots\dots(27)$$

$$q_s = A(\tau - \tau_{cr})^B \dots\dots\dots(28)$$

$$q_s = A(\tau V - \tau_{cr} V_{cr})^B \dots\dots\dots(29)$$

$$q_s = A(VS - V_{cr} S_{cr})^B \dots\dots\dots(30)$$

Dimana :

- q_s = debit sedimen per satuan lebar saluran

- Q = debit air
- V = kecepatan rata-rata
- S = energi kemiringan permukaan air
- τ = adalah tegangan geser di dasar saluran
- τV = daya seret per unit luas dasar saluran
- VS = satuan daya seret
- A dan B = parameter yang berhubungan dengan kondisi hidrolis dan kondisi sedimen dan memiliki nilai berbeda di tiap persamaan.

MODEL LABORATORIUM DAN DISAIN EKSPERIMEN

Penelitian dilakukan di laboratorium dengan menggunakan model saluran terbuka terbuat dari kaca dengan tinggi 27cm, lebar 15cm dan panjang 355cm serta ketebalan kaca 5mm. Eksperimen dilakukan dengan variasi tahapan percobaan yaitu pertama mengalirkan air di dalam saluran kaca lalu tahap berikutnya mengalirkan air di dalam sluran kaca yang sama tetapi dasar saluran ditambahkan lapisan pasir. Ekperimen lain dilakukan pula pada kondisi model saluran ditambah lapisan pasir dan ditempatkan model ambang terbuat dari kayu. Alat yang digunakan dalam penelitian eksperimen ini termasuk : pompa air, alat ukur debit, alat ukur kecepatan, meteran, kamera, sekop kecil, plat strip. Pengamatan, pengukuran dan pencatatan dilakukan terhadap variasi besaran dari variabel : debit aliran air (yang diatur dengan harga ber beda), kedalaman aliran air, kedalaman pasir, kecapatan aliran, kedalaman gerusan pasir.

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

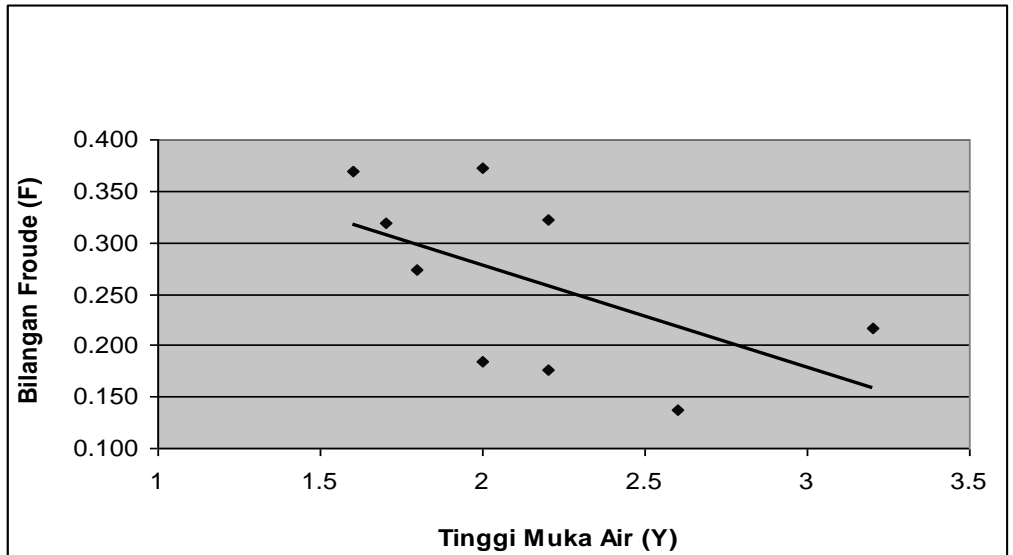
Untuk menentukan suatu aliran air nyata dalam klasifikasi jenis alirannya (laminer-turbulen, seragam-tak seragam, langgeng-tak langgeng, sub kritik-kritik-super kritik, berubah lambat-berubah cepat), ternyata tidak serta-merta dapat dipastikan langsung. Diperlukan suatu upaya berupa percobaan, pengamatan, pengukuran dan pencatatan secara berulang-ulang. Dalam penelitian ini upaya tersebut dilakukan untuk membandingkan karakteristik teoritik dengan kenyataan aliran air yang diamati melalui suatu model saluran di laboratorium. Percobaan dilakukan berulang-ulang dengan menetapkan variasi debit, perubahan kondisi dasar saluran (yaitu dengan penghamparan pasir), dan penempatan model ambang melintang model saluran.

Pencatatan dilakukan terhadap debit, kedalaman air pada beberapa titik pengamatan dengan jarak divariasikan. Setiap variasi akan merupakan suatu set kondisi aliran, dan dilakukan analisa perhitungan serta penggambaran hubungan antar variabel karakteristik aliran, baik hasil pengamatan maupun hasil hitungan. Hasilnya adalah seperti tersaji dalam Gambar (2) sampai Gambar (21).

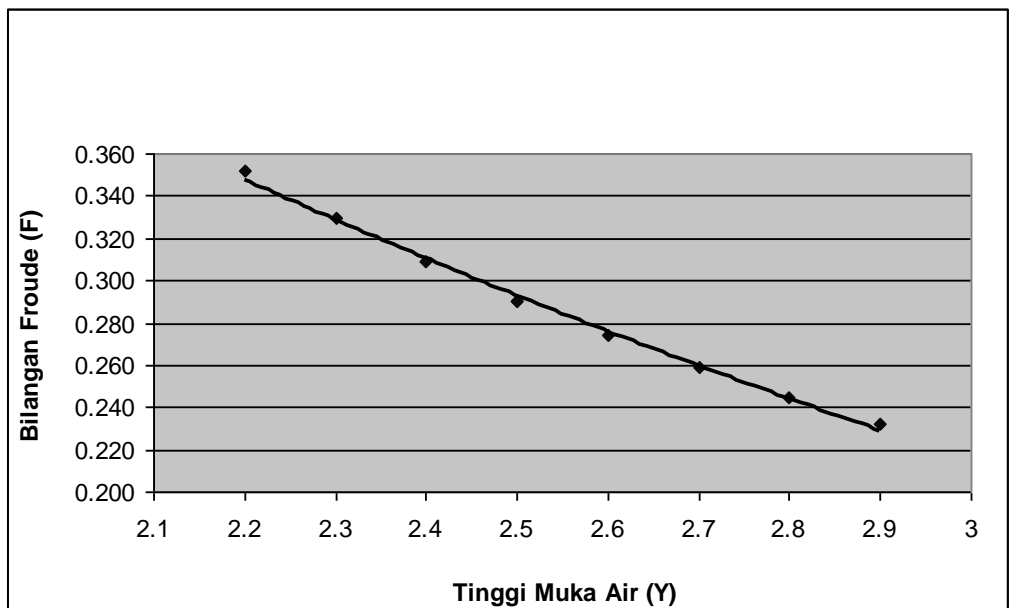
Grafik tinggi permukaan air (kedalaman aliran) terhadap nilai bilangan Froude (persamaan 21) untuk kondisi debit berbeda adalah Gambar 2 untuk debit 269,726 cm³/det, Gambar 3 untuk debit 539,452 cm³/det, dan Gambar 4 untuk

debit 1338, 215 cm³/det, pada lebar model saluran yang sama, dan aliran diatur oleh pompa. Pengambilan selisih skala 0,02 untuk nilai bilangan Froude untuk debit 539,452 cm³/det (Gambar 4), dan untuk nilai bilangan Froude antara 0,20-0,360 menunjukkan suatu hubungan yang sesuai dengan model matematik karakteristik aliran, dimana nilai bilangan Froude berbanding terbalik dengan kedalaman aliran. Kondisi ini menunjukkan ciri identitas jenis aliran laminer, seragam, tunak, sub kritik.

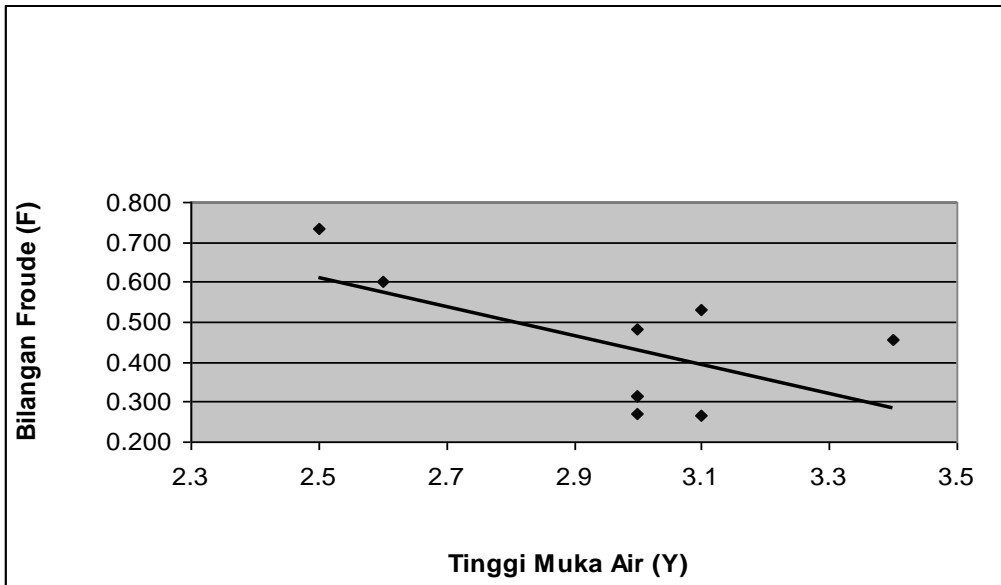
Hubungan antara kecepatan aliran (persamaan 17, 18 dan 19) terhadap tinggi permukaan air tertera pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7, untuk nilai besaran debit berbeda. Gambar 6 menunjukkan ciri kejadian yang sama dengan Gambar 3. Grafik yang merupakan penggambaran hasil pengamatan menunjukkan kesesuaian dengan model teoritik matematis secara jelas, dimana untuk menghasilkan debit yang sama tinggi muka air makin kecil dengan semakin besarnya kecepatan. Pada pasangan Gambar 2 dan Gambar 5 serta Gambar 4 dan Gambar 7, kesesuaian antara model teoritik matematis dan pengamatan tidak mudah disimpulkan, ini menunjukkan bahwa aliran air yang terjadi semakin hilang ciri laminer, seragam, dan tunaknya, sementara itu penentuan sub-kritik atau kritik, tidak terlalu mudah juga untuk diamati, mengingat pengukuran sulit dilakukan ketika ciri tunak (langgeng, *steady*) dan ciri laminer mulai bergeser.



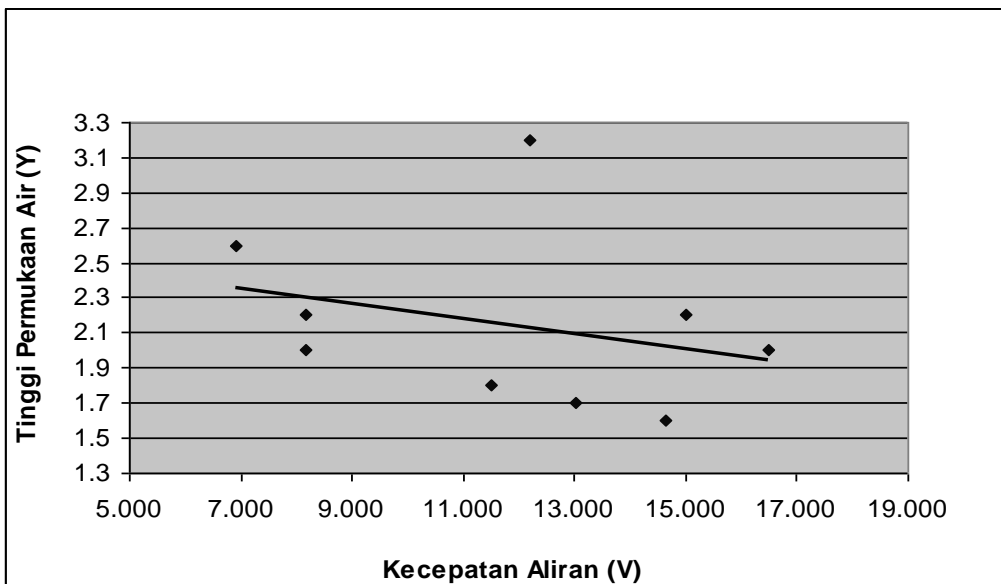
Gambar 2. Grafik Hubungan Tinggi Permukaan Air (Y) dengan Bilangan Froude (F) dimana Debitnya 269.726 cm³/det



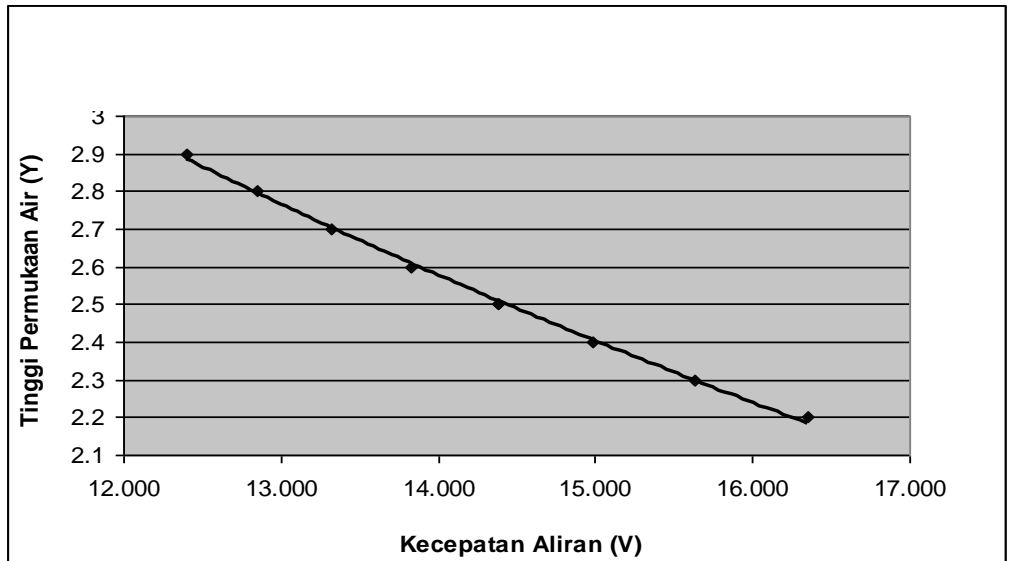
Gambar 3. Grafik Hubungan Tinggi Permukaan Air (Y) dengan Bilangan Froude (F) dimana Debitnya 539.452 cm³/det



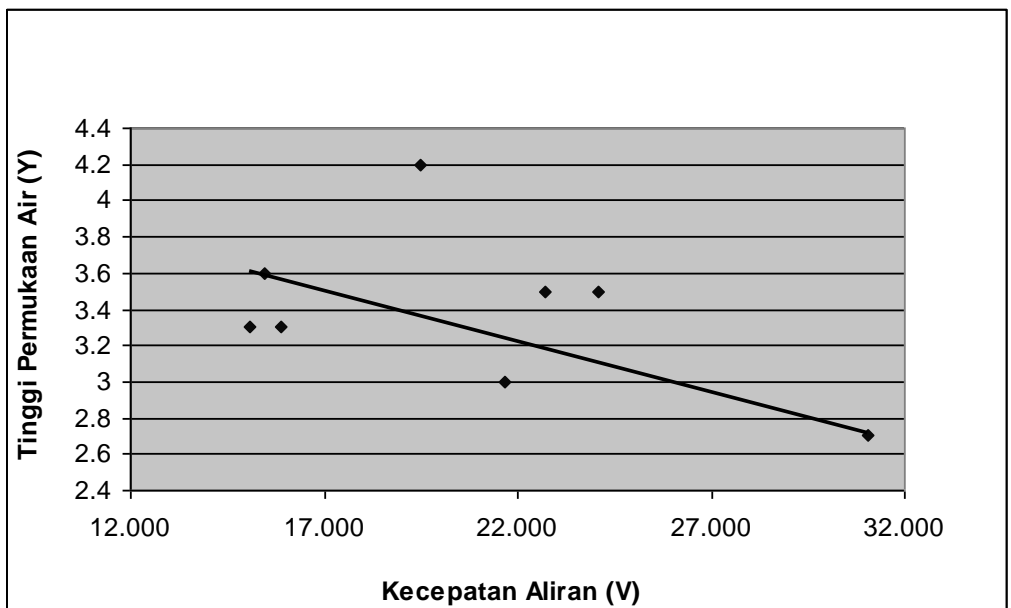
Gambar 4. Grafik Hubungan Tinggi Permukaan Air (Y) dengan Bilangan Froude (F) dimana Debitnya 1338.215 cm³/det



Gambar 5. Grafik Hubungan Kecepatan Aliran (V) dengan Tinggi Permukaan Air (Y) dimana Debitnya 269.726 cm³/det



Gambar 6. Grafik Hubungan Kecepatan Aliran (V) dengan Tinggi Permukaan Air (Y) dimana Debitnya 593.452 cm³/det



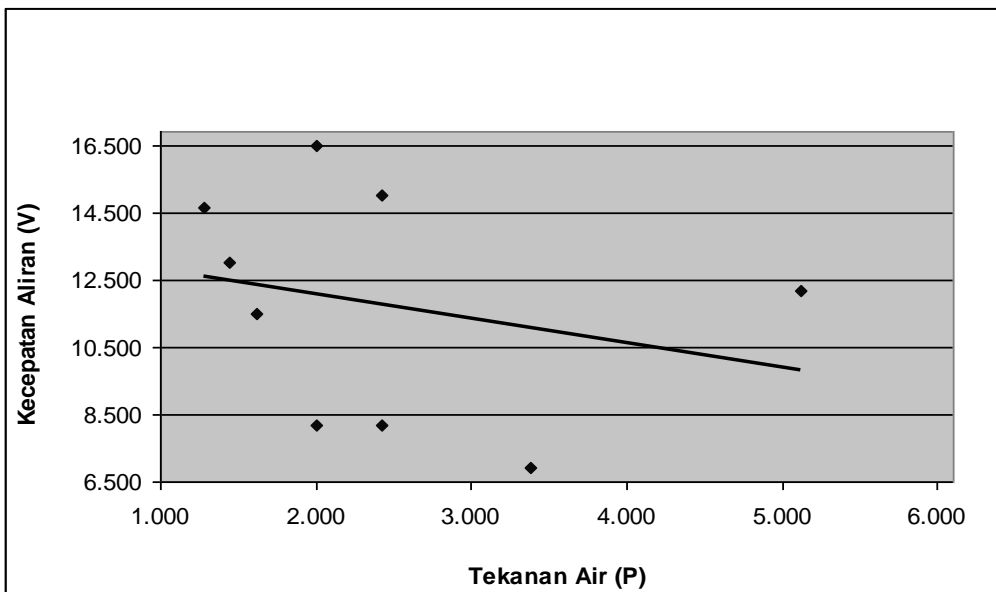
Gambar 7. Grafik Hubungan Kecepatan Aliran (V) dengan Tinggi Permukaan Air (Y) dimana Debitnya 1265.127 cm³/det

Debit besar yang tercapai pada Gambar 7, dapat dipastikan adalah konsekuensi dari kondisi kecepatan aliran yang besar, dimana skala kedalaman air serupa dengan nilai debit yang lebih kecil.

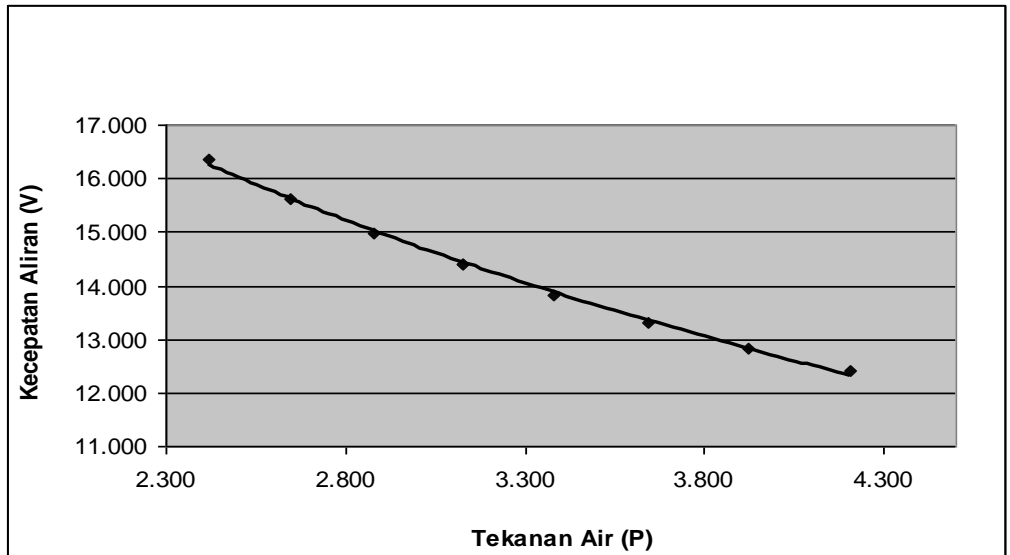
Pada Gambar 4 dengan nilai debit yang besar dan tinggi muka air kecil (2,5 cm), terlihat nilai bilangan Freud sudah mendekati 1, dengan kata lain kondisi tinggi muka air kecil pada debit yang besar sudah hampir menunjukkan kondisi aliran kritis.

Hubungan tekanan air dan kecepatan aliran (persamaan 19 dan 20) menurut pengamatan dan pengukuran digambarkan secara grafis pada Gambar 8,

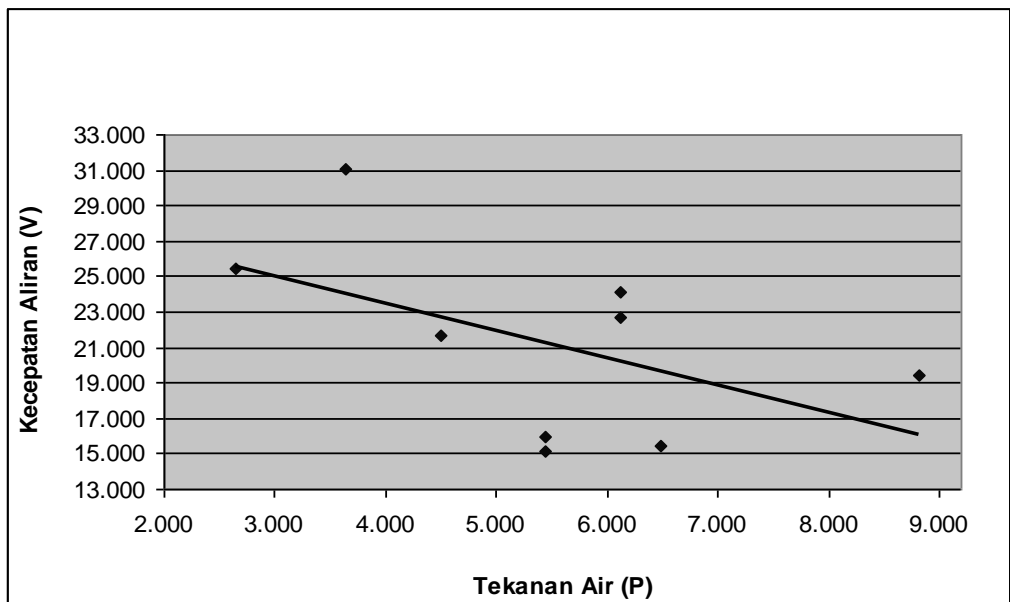
Gambar 9 dan Gambar 10. Gambar 9, menunjukkan set kejadian aliran yang sama dengan Gambar 3 dan Gambar 6, yaitu pada debit $593,452 \text{ cm}^3/\text{det}$. Dengan kecepatan antara $12 - 16 \text{ cm}/\text{det}$, dan kedalaman aliran antara $2,3 - 4,3 \text{ cm}$. Aliran laminar, seragam, sub kritis. Pada kecepatan besar tekanan kecil, dan pada kecepatan kecil tekanan besar. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan yang tergambarkan adalah tekanan hidrostatik yang besarnya berbanding lurus dengan tinggi muka air untuk debit yang sama. Tekanan yang besar pada kecepatan yang kecil adalah akibat kedalaman air yang besar.



Gambar 8. Grafik Hubungan Tekanan Air (P) dengan Kecepatan Aliran (V) dimana Debitnya $269.726 \text{ cm}^3/\text{det}$



Gambar 9. Grafik Hubungan Tekanan Air (P) dengan Kecepatan Aliran (V) dimana Debitnya 593.452 cm³/det

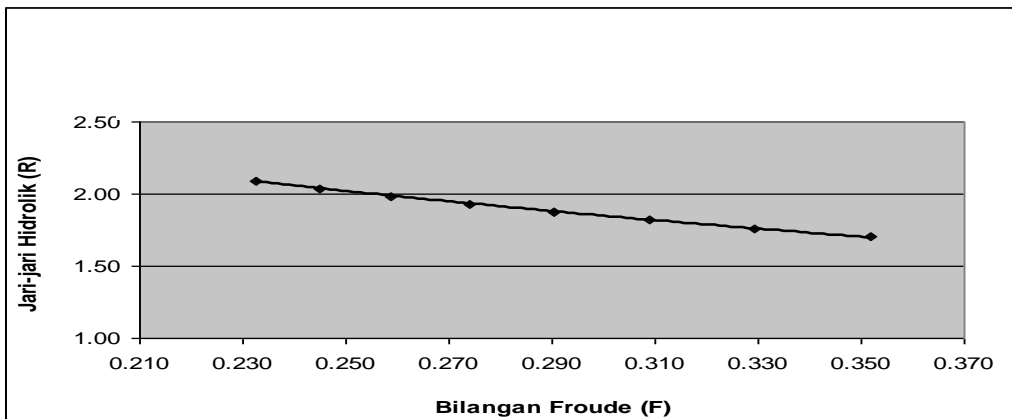


Gambar 10. Grafik Hubungan Tekanan Air (P) dengan Kecepatan Aliran (V) dimana Debitnya 1265.127 cm³/det

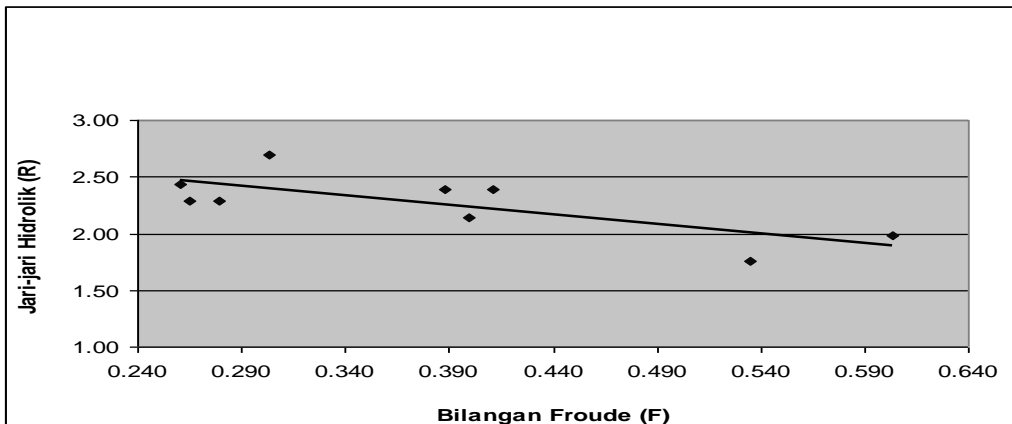
Kesulitan pengukuran dialami pada tinggi muka air yang kecil dan kecepatan yang besar, yaitu hasilnya disajikan Gambar 8 dan Gambar 10, ciri langgeng atau tunak (*steady*) untuk kedua kejadian aliran ini mulai bergeser ke arah tidak tunak (*unsteady*), atau $\frac{\partial u}{\partial t} \neq 0$. Untuk penampang model saluran yang sama, dengan dimensi lebar

yang tetap, dan dalam kejadian ini kedalaman air yang berubah-ubah.

Hubungan antara nilai bilangan Freude dan jari-jari hidrolis diplot pada Gambar 11 untuk debit tetap 539,452 cm³/det dan Gambar 12 untuk debit tetap 1265,127 cm³/det. Gambar 11 menunjukkan kejadian aliran dengan kecepatan tetap (langgeng), dan Gambar 12 kejadian aliran air dimana ciri langgeng mulai bergeser.



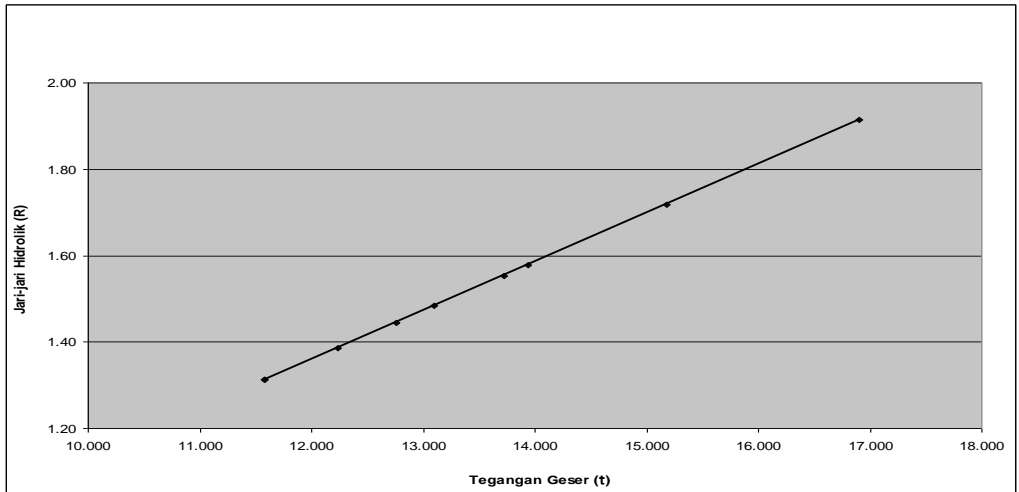
Gambar 11. Grafik Hubungan Bilangan Froude (F) dengan Jari-jari Hidrolik (R) dimana Debitnya 539.452 cm³/det



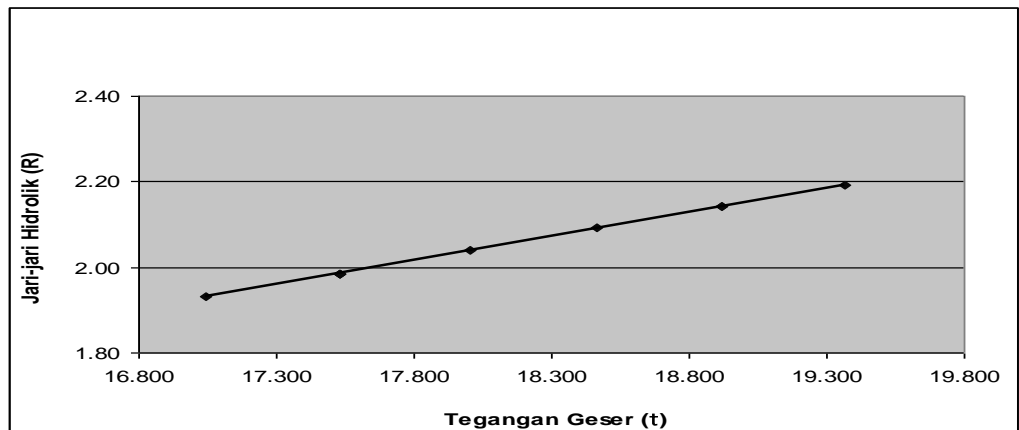
Gambar 12. Grafik Hubungan Bilangan Froude (F) dengan Jari-jari Hidrolik (R) dimana Debitnya 1265.127 cm³/det

Menurut postulat Newton tegangan geser dalam fluida sebanding dengan tingkat perubahan kecepatan pada satu potongan melintang aliran, tingkat perubahan kecepatan atau gradien kecepatan merupakan tingkat perubahan waktu pada deformasi sudut.

Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan hubungan antara tegangan geser dan jari-jari hidrolis untuk dua kejadian debit, yaitu 381,640 cm³/det dan 1236,040 cm³/det. Dengan gambar ini penelitian membuktikan pula bahwa tegangan geser dalam aliran air berbanding lurus dengan jari-jari hidrolis.



Gambar 13. Grafik Hubungan Tegangan Geser (τ) dengan Jari-jari Hidrolik (R) dimana Debitnya 381.640 cm³/det



Gambar 14. Grafik Hubungan Tegangan Geser (τ) dengan Jari-jari Hidrolik (R) dimana Debitnya 1236.040 cm³/det

Eksperimen yang hasil pengamatan dan pengukurannya diplot dalam Gambar 2 sampai Gambar 14 diatas kemudian dilakukan kembali dengan menambahkan hamparan pasir pada dasar model saluran. Hasil pengamatan, pengukuran, dan analisa perhitungannya diplot pada Gambar 15 sampai Gambar 21.

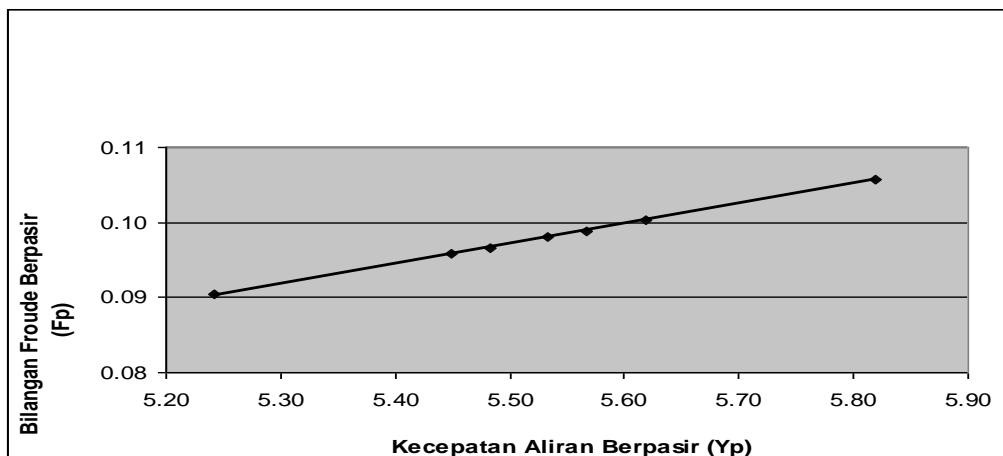
Hal pertama yang dapat teramati dari eksperimen kedua ini adalah bahwa perubahan kekasaran dasar saluran yang semula dari bahan kaca menjadi pasir menyebabkan pengurangan capaian besaran nilai kecepatan aliran, yang selanjutnya terkait pada pengurangan capaian besaran nilai debit. Ini membuktikan kebenaran dari model matematik kecepatan yang secara teoritik telah dikemukakan oleh Manning, Chezy dan Strickler, seperti dikemukakan pada bahasan teoritik diatas.

Selain itu pada eksperimen kedua ini diuji pula sifat aliran air pada viskositas

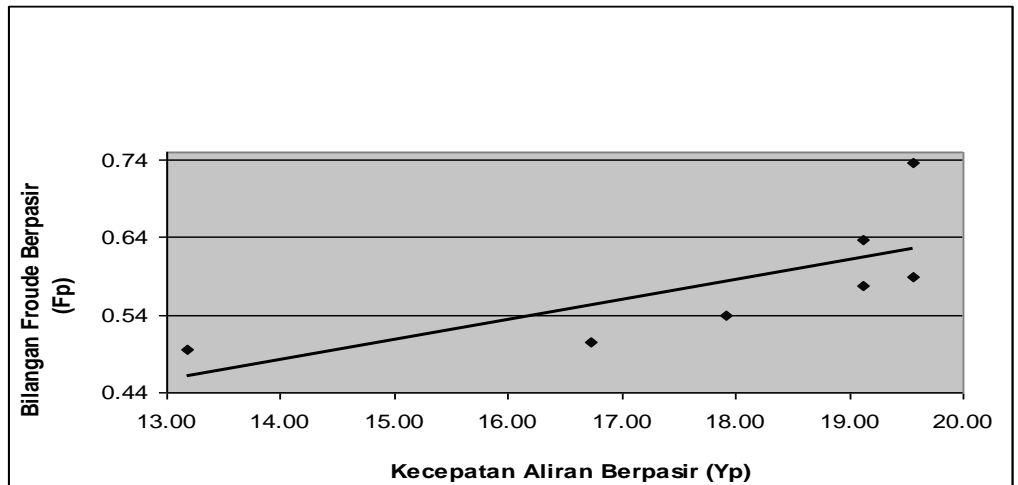
yang berbeda, dimana pada air sudah mengandung pasir (aliran air berpasir). Dasar teoritik untuk kejadian ini adalah hukum kekekalan momentum untuk aliran fluida yang ber-viskositas dari Navier-Stokes (persamaan 13 dan persamaan 14).

Pada nilai besaran debit $269,726 \text{ cm}^3/\text{det}$ hubungan kecepatan aliran dan bilangan Froude diplot (per 0,01) pada Gambar 15, terlihat bilangan Freude berbanding lurus dengan kecepatan aliran secara meyakinkan. Sementara untuk nilai debit yang lebih besar yaitu $381,450 \text{ cm}^3/\text{det}$ (Gambar 16) dengan pembagian skala bilangan Froude yang lebih renggang (per 0,10) posisi kelurusan data menjadi tidak selurus pada Gambar 15.

Hal ini mengindikasikan perbedaan sifat aliran dari kedua kejadian debit tersebut. Sifat langgeng pada kejadian debit pertama (Gambar 15) lebih kuat dibanding kejadian debit kedua (Gambar 16).



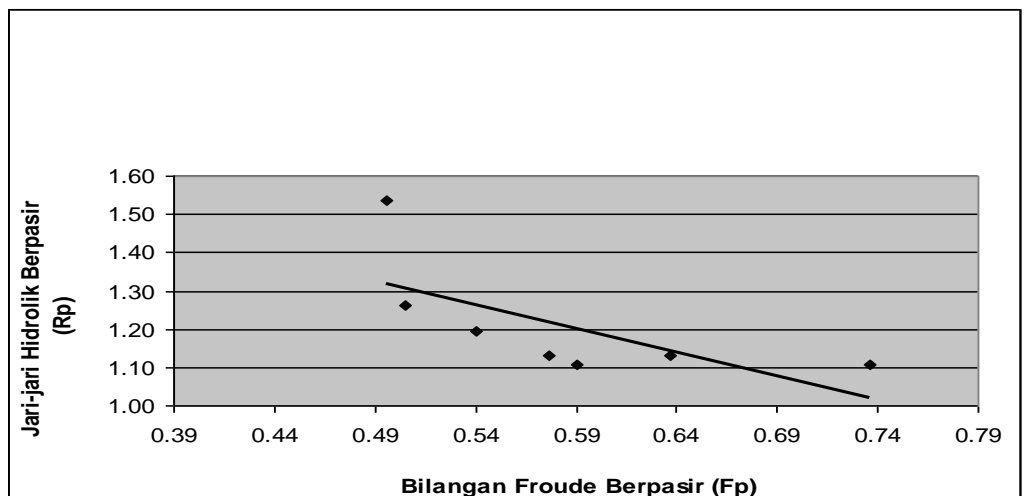
Gambar 15. Grafik Hubungan Kecepatan Aliran Berpasir (V_p) dengan Bilangan Froude Berpasir (F_p) dimana Debitnya $269.726 \text{ cm}^3/\text{det}$



Gambar 16. Grafik Hubungan Kecepatan Aliran Berpasir (V_p) dengan Bilangan Froude Berpasir (F_p) dimana Debitnya $381.450 \text{ cm}^3/\text{det}$

Hubungan antara nilai bilangan Froude dengan jari-jari hidrolis untuk air berpasir pada kejadian debit $381,450 \text{ cm}^3/\text{det}$ diplot oleh Gambar 17. Sama dengan kejadian aliran air tak berpasir,

kecenderungannya adalah bahwa pada aliran air berpasir bilangan Froude berbanding terbalik dengan jari-jari hidrolis.



Gambar 17. Grafik Hubungan Bilangan Froude Berpasir (F_p) dengan Jari-jari Hidrolik Berpasir (R_p) dimana Debitnya $381.450 \text{ cm}^3/\text{det}$

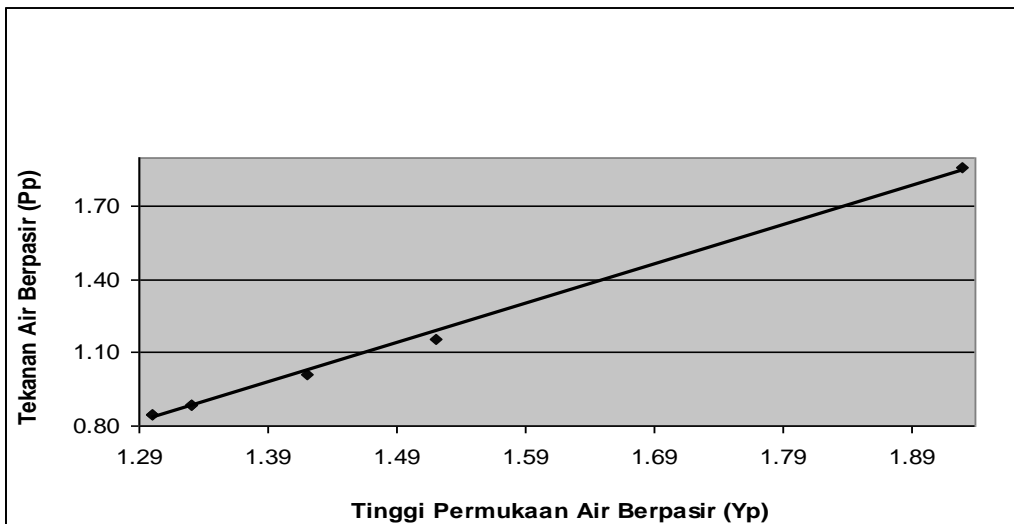
Untuk kejadian aliran air berpasir dengan debit $381,450 \text{ cm}^3/\text{det}$, kedalaman antara 1 sampai 2 cm, hubungan antara kedalaman air dan tekanan air terlihat secara meyakinkan berbanding lurus (Gambar 18). Ini menunjukkan bahwa kecepatan air masih relatif kecil, dan debit pada kejadian ini termasuk debit air yang cenderung tenang, dimana tekanan yang terukur adalah dominan merupakan tekanan hidrostatis.

Pengamatan terhadap kejadian aliran air berpasir untuk hubungan antara kecepatan aliran dan tekanan air pada debit dan penampang saluran yang sama menunjukkan bahwa kecepatan aliran berbanding terbalik dengan tekanan air (Gambar 19). Jadi dalam hal ini pada debit yang sama kecepatan bertambah jika kedalaman air berkurang, dan pengurangan kedalaman air

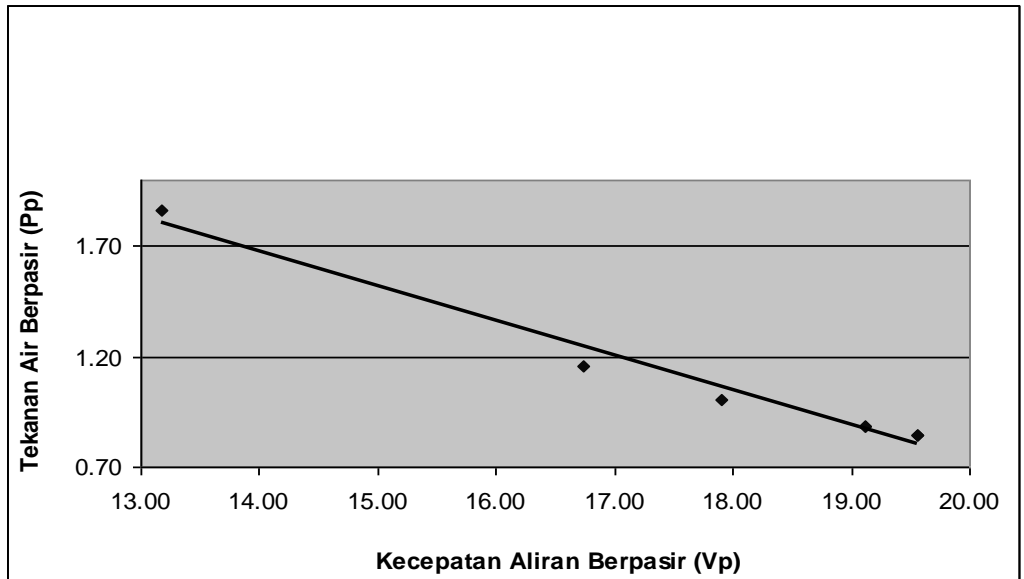
mengurangi tekanan, berarti tekanan ini adalah tekanan hidrostatis.

Pada debit tertentu diukur luas penampang pada beberapa titik yang berbeda sesuai dengan ketidak rataan permukaan pasir dasar saluran, kemudian hubungan antara kecepatan aliran dan luas penampang basah diplot pada Gambar 20. Terlihat bahwa kecepatan aliran berbanding terbalik dengan luas penampang basah, pada debit yang sama. Hasil pengamatan uji model laboratorium ini membuktikan kebenaran model teoritik yang dikemukakan oleh Chezy, Manning, dan Strickler (persamaan 16,17,18,19 dan 20).

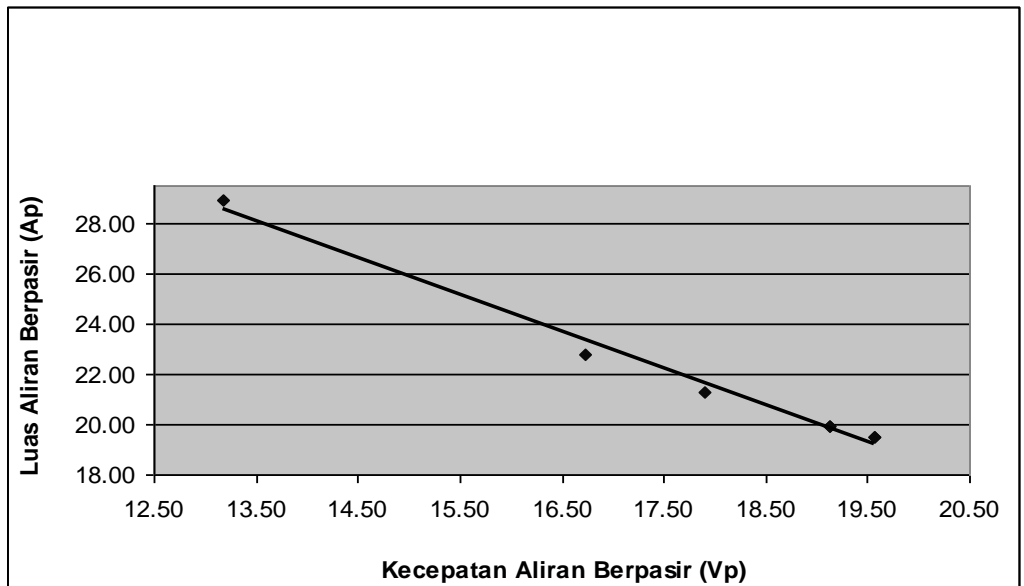
Hubungan antara tegangan geser dan debit untuk aliran air berpasir menurut hasil pengamatan berbanding lurus, hal ini terlihat pada Gambar 21. Kecenderungan ini sama dengan untuk aliran air tak berpasir (Gambar 14).



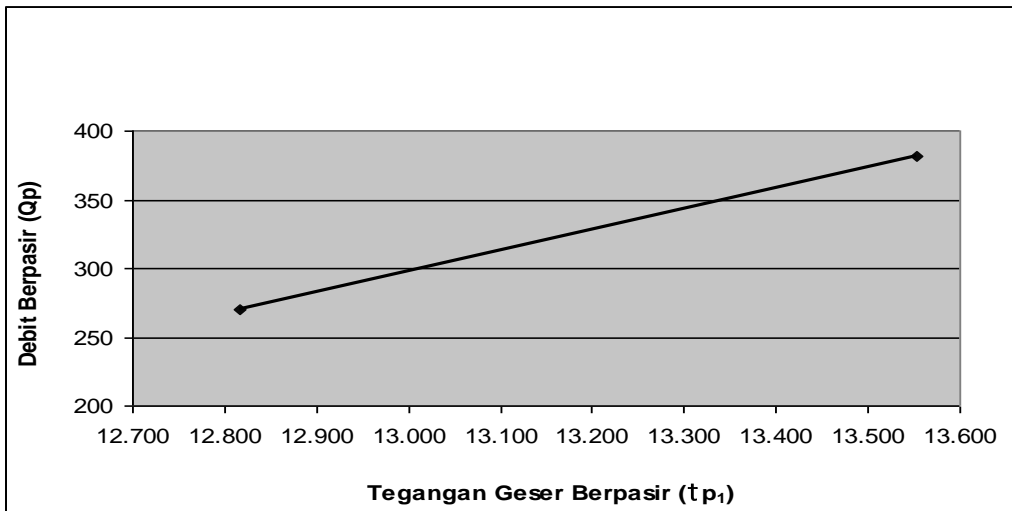
Gambar 18. Grafik Hubungan Tinggi permukaan Air Berpasir (Y_p) dengan Tekanan Air Berpasir (P_p) dimana Debitnya $381.450 \text{ cm}^3/\text{det}$



Gambar 19. Grafik Hubungan Kecepatan Aliran Berpasir (V_p) dengan Tekanan Air Berpasir (P_p) dimana Debitnya $385.450 \text{ cm}^3/\text{det}$



Gambar 20. Grafik Hubungan Kecepatan Aliran Berpasir (V_p) dengan Luas Permukaan Basah Berpasir (A_p) dimana Debitnya $381.450 \text{ cm}^3/\text{det}$



Gambar 21. Grafik Hubungan Tegangan Geser Berpasir (τ_{p1}) dengan Debit Berpasir (Q_p)

KESIMPULAN

Dengan penelitian ini teramati bahwa karakteristik hidrolis aliran di saluran terbuka antara air murni dan air berpasir cenderung sama, dan terbukti bahwa pola hubungan antara variabel karakteristik hidrolis yang dikemukakan para ahli secara teoritik melalui penurunan model matematis (persamaan 12) sama dengan hasil pengamatan dan pengukuran terhadap aliran air nyata dalam model saluran, baik untuk aliran air murni maupun aliran air berpasir (kondisi *viskositas* berbeda). Hubungan-hubungan karakteristik aliran air tersebut pada setiap titik (masing-masing titik) adalah :

- Tinggi permukaan air (kedalaman air) berbanding terbalik dengan bilangan Froude pada debit dan penampang saluran yang tetap
- Kecepatan aliran air berbanding terbalik dengan kedalaman aliran,

pada debit dan penampang saluran yang tetap

- Tekanan air berbanding terbalik dengan kecepatan aliran pada debit dan penampang saluran yang tetap
- Nilai bilangan Froude berbanding terbalik dengan jari-jari hidrolis, pada debit dan penampang saluran yang tetap
- Pada beberapa nilai debit di saluran terbuka dengan penampang tetap, tegangan geser berbanding lurus dengan jari-jari hidrolis.

SARAN

Pada penelitian ini karakteristik hidrolis yang menyangkut aspek debit dan kecepatan terfokus pada elemen air. Sebagai saran yang hendak dikemukakan disini adalah diperlukan pengembangan penelitian untuk pola uji yang serupa tetapi fokus debit dan kecepatan

ditujukan pada elemen sedimen. Sebagai hipotesa dapat dikemukakan pada saran ini bahwa gerak sedimen bisa diamati melalui penguatan warna objek (butir sedimen) dan penggunaan kamera dengan resolusi tinggi. Sebagai acuan pendekatan teoritik antara lain dapat digunakan pendekatan Yang (persamaan 25 sampai 30).

DAFTAR PUSTAKA

Chow, Ven Te, (1959). "*Open-Channel Hydraulics*", International Student Edition, McGraw-Hill International Book Company, Kogakusha, xviii + 680 pages.

Kodoatie, Robert, (2002). "*Hidrolika Terapan, Aliran Pada Saluran Terbuka dan Pipa*", Penerbit ANDI Yogyakarta, xii + 342 hlm

Morris, Gregory L. Dan Fan, Jiahua, (1998). "*Reservoir Sedimentation Handbook, Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*", Mc Graw Hill, xxiv+ 735 hlm

Makrup, Lalu, (2001). "*Dasar-Dasar Analisis Aliran di Sungai dan Muara*", UII Press Jogjakarta, cetakan pertama, vii + 241 hlm