

Kajian Hubungan Antara Debit Berubah dengan Tinggi Muka Air dan Kecepatan Aliran

Indratmo Soekarno

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132, E-mail: indratmo@lapi.itb.ac.id

Heruyoko

Program Magister Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132, E-mail: heruyoko@gmail.com

Abstrak

Banjir merupakan bencana alam yang perlu perhatian serius agar dampak yang diakibatkan dapat diminimalkan. Pada kejadian banjir terjadi suatu fenomena dimana debit, tinggi muka air dan kecepatan aliran mencapai nilai maksimum pada waktu yang tidak bersamaan. Penelitian ini ditujukan untuk membuktikan dan memperlihatkan fenomena tersebut dengan membuat suatu pemodelan aliran tak tunak pada flume di Laboratorium Uji Model Fisik Hidraulik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung. Selain pemodelan fisik, untuk mendukung penelitian ini dilakukan pula pemodelan numerik satu dimensi dengan syarat batas yang didapat dari hasil pemodelan fisik. Dari hasil pemodelan fisik maupun numerik diperoleh bahwa kecepatan aliran mencapai nilai maksimum terlebih dahulu, kemudian debit mencapai nilai maksimum dan tinggi muka air mencapai nilai maksimum terakhir. Dan hasil pemodelan numerik satu dimensi tidak jauh berbeda nilainya dengan hasil pemodelan fisik. Pemodelan numerik satu dimensi tidak hanya dilakukan untuk penampang berbentuk persegi panjang saja, pemodelan juga dilakukan untuk saluran dengan penampang berbentuk trapesium dengan kemiringan $z = 1$ dan $z = 2$. Hal ini dilakukan untuk melihat efek dari perbedaan bentuk penampang saluran. Dengan syarat batas, kekasaran saluran dan lebar dasar saluran yang sama didapatkan debit pada saluran berpenampang trapesium dengan $z = 2$ lebih besar dibandingkan dengan saluran berpenampang trapesium dengan $z = 1$ dan saluran berpenampang persegi panjang. Hal ini disebabkan karena pada saluran berpenampang trapesium dengan $z = 2$ memiliki luas penampang basah yang lebih besar dibandingkan saluran berpenampang trapesium dengan $z = 1$ dan saluran berpenampang persegi panjang, mengingat debit adalah fungsi dari kecepatan aliran dan luas penampang basah.

Kata-kata Kunci: Pengukuran debit, channel flow, gelombang dinamispreissman.

Abstract

Flood is a natural disaster needs a serious attention to minimize its negative impact. When flood occurs, a phenomenon happens where discharge, water level and stream velocity reach the maximum value at the different time. This research is conducted to prove and show the phenomenon by constructing an unsteady flow model in a The Hydraulic Laboratory, Civil and Environment Engineering Department. To support this research, besides physical model, one dimension numerical model is also being used as a boundary condition from the result of physical model. The result of physical and numerical model is that the stream velocity reaches the maximum point earlier, then the discharge reaches the maximum point and the water level reaches the last maximum point. The result of one dimension numerical model has similar value with the physical model. The one dimension numerical model is not only done for the rectangular shape, but also for the trapezium shape channel with inclination $z = 1$ and $z = 2$. It is done to see the effect of the different between channel shapes. With identical boundary condition of the roughness coefficient and width of the bottom channel, the discharge of the trapezium shape channel with inclination $z = 2$ is larger than the discharge of the trapezium shape channel with inclination $z = 1$ and the discharge of the rectangular shape channel. It is caused by the trapezium shape channel with inclination $z = 2$ that has larger wetted area compared to the trapezium shape channel with inclination $z = 1$ and the rectangular shape channel considering discharge is the function of stream velocity and wetted area

Keywords: Discharge measurement, channel flow, dynamic wave, preissman.

1. Pendahuluan

Perambatan aliran air dalam ruang dan waktu melewati sungai atau suatu jaringan sungai adalah suatu masalah yang cukup rumit. Keinginan untuk membangun dan hidup di daerah sepanjang sungai menciptakan keperluan untuk perhitungan tinggi muka air dan laju air yang akurat, sehingga mendorong kita untuk mengembangkan model *routing* aliran air yang kompleks seperti *dynamic wave models*.

Perambatan aliran air sepanjang saluran sungai atau pada drainase perkotaan adalah aliran tak tunak tak seragam. Dikatakan tak tunak karena berubah terhadap waktu dan dikatakan tak seragam karena tinggi muka air, kecepatan aliran dan debit tidak konstan (tetap) sepanjang aliran.

Persamaan Momentum:

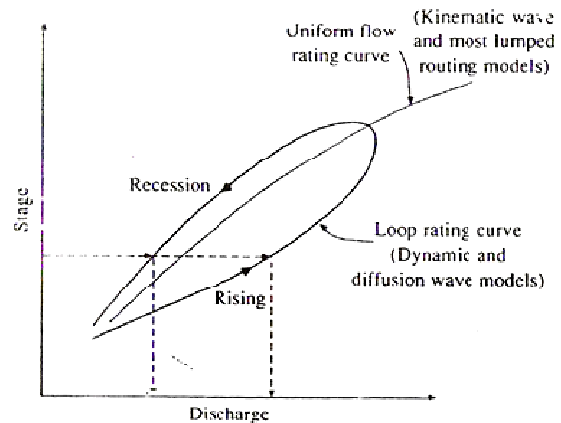
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} - gAS_0 + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{Ac^2 R} = 0$$

dimana :

- Q : debit aliran
- A : luas penampang basah
- t : waktu
- x : jarak
- S₀ : kemiringan saluran
- h : tinggi muka air
- c : kekasaran chezy
- R : A/P = luas penampang basah dibagi keliling penampang basah

Aliran dikatakan seragam bila kemiringan dasar saluran S₀ sama dengan *friction slope* S_f, sehingga hubungan antara debit dan tinggi muka air adalah suatu fungsi yang bernilai tunggal yang berasal dari persamaan Manning, seperti yang terlihat pada *rating curve* aliran seragam (*uniform flow*) di **Gambar 1**. Ketika suku-suku lain pada persamaan momentum tidak diabaikan, bentuk hubungan tinggi muka air dan debit akan membentuk suatu pengulangan (*loop*) seperti terlihat pada kurva terluar di **Gambar 1**, ini dikarenakan tinggi muka air adalah bukan hanya fungsi dari debit, tapi juga fungsi dari kemiringan garis energi. Pada umumnya untuk harga elevasi muka air yang sama debit akan lebih besar pada saat menaiknya debit pada hidrograph banjir dibandingkan pada saat turun.

Berdasarkan keterangan di atas maka dapat diambil asumsi bahwa pada saat debit maksimum belum tentu tinggi muka air juga maksimum dan kecepatan pun belum tentu pada keadaan maksimum pula. Untuk membuktikan fenomena aliran air pada saluran terbuka ini maka dilakukan kajian hubungan antara debit berubah cepat dengan tinggi muka air dan kecepatan



Gambar 1. Loop rating curve

aliran dengan melakukan pemodelan matematik serta model fisik aliran pada flume yang diharapkan dapat lebih mempermudah dalam melakukan kajian ini.

2. Pemodelan Fisik

Pemodelan fisik untuk menunjang kajian hubungan antara debit berubah cepat dengan tinggi muka air, dan kecepatan aliran dilakukan di Laboratorium Uji Model Hidraulika, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.

Kajian ini menggunakan bantuan flume seperti yang terlihat pada **Gambar 2**. Untuk menciptakan keadaan aliran yang tak tunak (*unsteady*) maka valve pada pompa (**Gambar 3**) diputar dengan kecepatan sudut 60 derajat per 5 detik.



Gambar 2. Flume



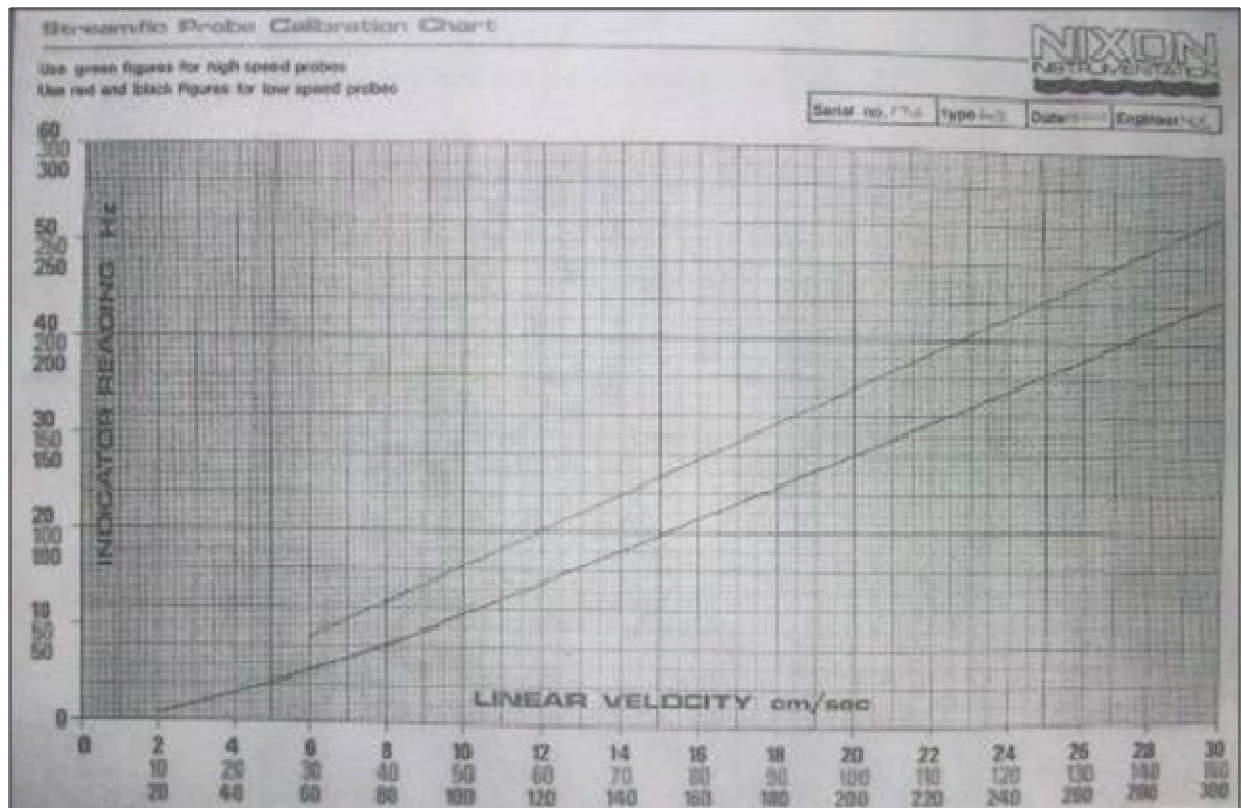
Gambar 3. Pompa

Alat ukur kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah *current meter* yang menggunakan baling-baling (*propeller*) yang dihubungkan menggunakan kabel ke sebuah mesin penghitung (*counter*) yang akan menunjukkan intensitas putaran dalam satuan Hertz (Hz).

Current meter ini dilengkapi dengan grafik kalibrasi untuk mengkonversi hasil pembacaan dari *counter* yang satuannya adalah Hertz ke satuan cm/detik. Grafik kalibrasi dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 5. Current meter



Gambar 4. Grafik kalibrasi current meter (Instruction Manual Propeller Velocity Meter)



Gambar 6. Frequency counter



Gambar 7. Frequency Counter dan Current Meter

Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, maka dilakukan kalibrasi *current meter* dengan menggunakan *flume*. Kalibrasi *current meter* dilakukan dengan menerapkan rumus sederhana dari debit aliran pada keadaan *steady flow* (aliran tunak) yaitu $Q = V \times A$. Dimana Q adalah debit aliran, V adalah kecepatan rata-rata aliran pada 0,8 h dan 0,2 h (h = tinggi muka air) dan A adalah luas penampang basah saluran. Dengan nilai debit yang bervariasi dan dapat dihitung lewat manometer air raksa, luas penampang basah yang dapat dihitung juga dan jumlah putaran pada propeler yang dapat dilihat pada *frequency counter* maka didapat hubungan nilai kecepatan aliran dengan jumlah putaran propeler. Grafik yang memberikan persamaan dari hasil proses kalibrasi dapat dilihat pada **Gambar 8**.

Pada pemodelan fisik ini dilakukan pengukuran terhadap perubahan kecepatan aliran dan perubahan tinggi muka air terhadap waktu. Dikarenakan sulitnya pengukuran perubahan debit terhadap waktu maka perubahan debit terhadap waktu didapat dari perkalian dari kecepatan aliran terhadap luas penampang basah.

Pengukuran kecepatan aliran dan tinggi muka air dilakukan dengan bantuan *current meter* beserta *counternya* dan juga *handycam* atau alat perekam video untuk merekam proses perubahan kecepatan dan tinggi muka air pada saat valve pompa diputar dengan kecepatan sudut 60 derajat per 5 detik.

Agar didapatkan kondisi yang menyerupai banjir maka valve pompa dibuka dengan kecepatan sudut 60 derajat per 5 detik selama 1 menit, lalu valve langsung

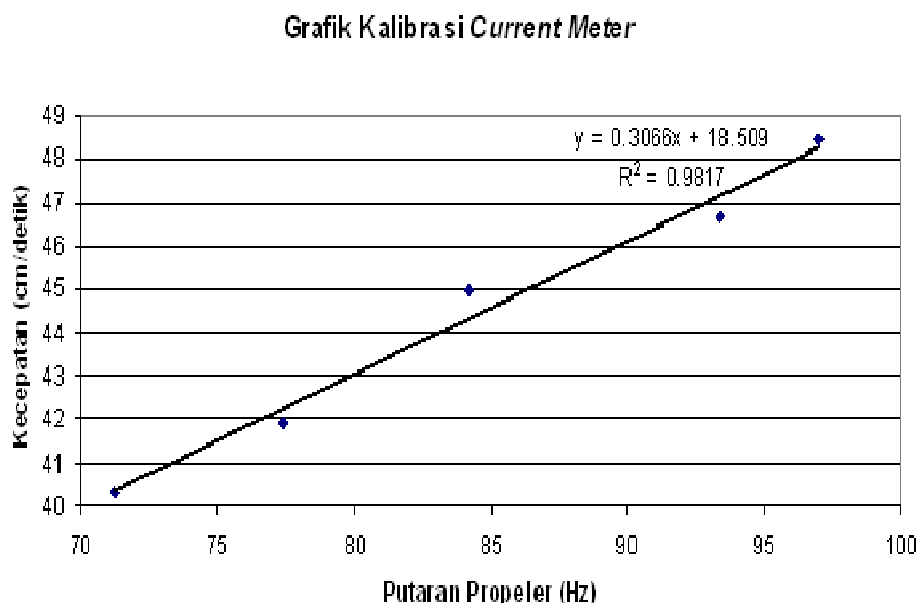
diputar arah sebaliknya (gerakan menutup valve) dengan kecepatan sudut yang sama yaitu 60 derajat per 5 detik.

Pertama-tama pengukuran kecepatan aliran dilakukan dengan cara menaruh *current meter* dengan ketinggian 1 cm dari dasar saluran kemudian valve pompa dibuka dengan kecepatan 60 derajat per 5 detik selama 1 menit, lalu valve ditutup dengan kecepatan yang sama yaitu 60 derajat per 5 detik sampai valve benar-benar tertutup dan muka air sampai pada ketinggian sekitar 1 cm dari dasar saluran. Setelah itu dengan cara yang sama dengan di atas, hanya *current meter* diletakkan pada ketinggian yang berbeda yaitu pada ketinggian 2 cm dari dasar saluran. Demikian seterusnya *current meter* ditaruh dengan selisih 1 cm sampai *current meter* ditaruh pada ketinggian 6 cm dari dasar saluran, dan semua kegiatan ini kita rekam untuk dapat memplot hasil pemodelan ini ke dalam tabel dan grafik untuk selanjutnya dianalisis.

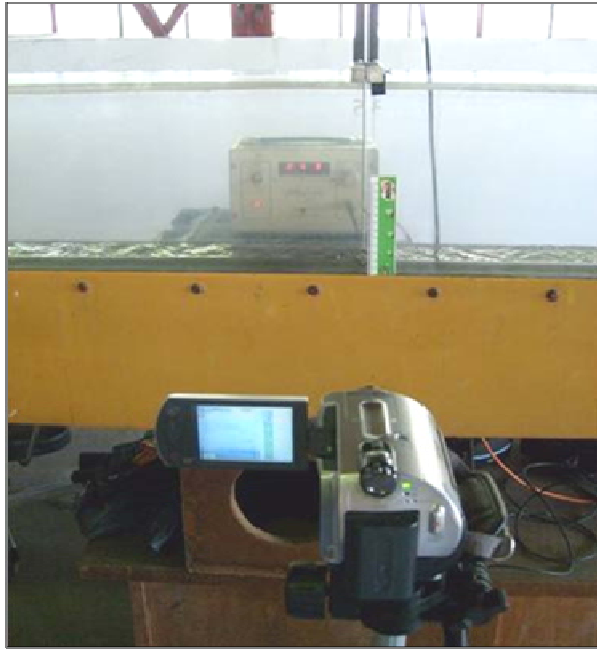
3. Model Numerik

Aliran air pada saluran terbuka merupakan gejala yang rumit. Aliran yang terjadi sebenarnya adalah tiga dimensi. Faktor-faktor yang mempengaruhi aliran sangat banyak, antara lain angin, putaran bumi, bentuk dan ukuran geometri saluran, kekasaran saluran, kemiringan dasar saluran dan sebagainya.

Persamaan matematik yang dihasilkan rumit dan sulit diselesaikan secara analitis sehingga penyelesaian yang umum digunakan adalah dengan metode numerik, yang salah satunya adalah dengan metoda beda hingga.



Gambar 8. Hasil kalibrasi current meter



Gambar 9. Perekaman pada pengukuran perubahan tinggi muka air dan kecepatan

Untuk merumuskan model matematika dengan mempertimbangkan semua faktor-faktor diatas adalah sangat sulit. Untuk itulah maka diperlukan beberapa penyederhanaan misalnya dengan mengabaikan beberapa faktor yang kecil pengaruhnya diantaranya:

1. Persamaan aliran dirumuskan dalam satu dimensi, yaitu dalam arah aliran karena dianggap sudah cukup untuk menunjukkan hubungan debit, tinggi muka air dan kecepatan aliran.
2. Kecepatan sesaat di setiap titik pada suatu irisan penampang melintang saluran dianggap sama dengan kecepatan rata-rata.
3. Aliran dianggap tidak mampu mampat (*incompressible flow*).
4. Distribusi tekanan air yang bekerja pada irisan penampang melintang saluran adalah tekanan hidrostatik, percepatan vertikal dianggap kecil.
5. Gesekan yang terjadi pada dinding saluran dianggap sama dengan gesekan yang terjadi pada aliran langgeng (*steady flow*) dan dicari dengan hubungan empiris dari rumus Chezy atau Manning.
6. Pengaruh angin pada gesekan permukaan diabaikan.
7. Pengaruh putaran bumi (gaya coriolis) diabaikan.

Pada kasus ini dianggap prismatic, kerapatan fluida dianggap sama, pengaruh viskositas diabaikan dan faktor koreksi penampang $b=1$.

Seperti yang telah dijelaskan di atas untuk syarat batas bagian hulu dan bagian hilir diperoleh dari hasil pemodelan fisik. Dan untuk koefisien kekasaran saluran didapat dengan cara trial & error dengan asumsi tidak akan melebihi nilai n untuk saluran kaca yang berkisar 0,009 – 0,013. Dalam kajian ini routing debit pada saluran menggunakan *Dynamic Wave* satu dimensi yang diturunkan dari persamaan *Saint-Venant* dan persamaan momentum yang memperhitungkan gaya inersia dan tekanan.

4. Penurunan Rumus

Untuk perhitungan numerik saluran terbuka dalam pemodelan ini menggunakan pendekatan *control volume* untuk mendapatkan persamaan kontinuitas dan momentum, berdasarkan referensi dari catatan kuliah hidraulika lanjut, pemodelan hidraulik aliran dan angkutan polutan di saluran (Cahyono, 2000) dan sungai dan buku *Applied Hydrology* (Chow, V.T., et.al., 1998).

Persamaan kontinuitas untuk *channel flow*, digunakan :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

dimana Q adalah debit aliran, A adalah luas penampang basah, t adalah waktu, x adalah jarak, q adalah debit aliran limpasan yang masuk ke saluran.

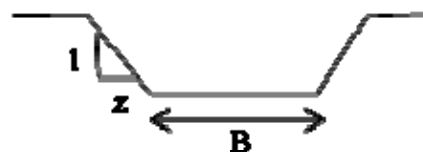
Untuk penampang berbentuk trapesium maka persamaan menjadi

$$(B + 2zh) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2)$$

dimana :

B : lebar dasar saluran

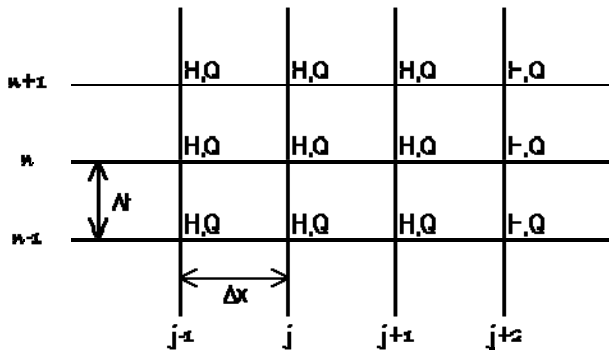
z : kemiringan dinding saluran



Persamaan momentumnya mengambil bentuk persamaan *dynamic wave* dengan memperhitungkan suku akselerasi lokal, akselerasi konvektif, dan gaya tekan dengan mengambil nilai $\beta=1$. Persamaan ini dapat ditulis kembali menjadi:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2 / A)}{\partial x} - gAS_0 + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{AC^2R} = 0 \quad (3)$$

Pembaganan dalam Metoda *Preissmann* terlihat pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Kisi-kisi pembagian Preissman

Bentuk pendekatan yang digunakan pada pembagian *Preissmann* untuk **Persamaan (2)** dan **(3)** adalah:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cong \frac{\theta}{\Delta x} (f_{j+1}^{n+1} - f_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{\Delta x} (f_{j+1}^n - f_j^n) \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \cong \frac{1}{2\Delta t} (f_{j+1}^{n+1} - f_{j+1}^n + f_j^{n+1} - f_j^n) \quad (5)$$

$$f(x, t) \cong \frac{\theta}{2} (f_{j+1}^{n+1} + f_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (f_{j+1}^n + f_j^n) \quad (6)$$

di mana:

q adalah faktor pemberat yang harganya antara 0,5 – 1,0.

4.1 Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial h}{\partial t} \cong \frac{\theta}{2\Delta t} (h_{j+1}^{n+1} - h_{j+1}^n + h_j^{n+1} - h_j^n) \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \cong \frac{\theta}{\Delta x} (Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{\Delta x} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) \quad (8)$$

Substitusi **Persamaan (7)** dan **(8)** ke **Persamaan (2)** menghasilkan :

$$\begin{aligned} & \frac{(B+2zh_j^n)}{2\Delta t} (h_{j+1}^{n+1} - h_{j+1}^n + h_j^{n+1} - h_j^n) + \frac{\theta}{\Delta x} (Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) \\ & + \frac{1-\theta}{\Delta x} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) = \frac{\theta}{2} (q_{j+1}^{n+1} - q_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (q_{j+1}^n - q_j^n) \end{aligned} \quad (9)$$

Jika $f_j^{n+1} - f_j^n = \Delta f_j$

maka **Persamaan (9)** menjadi:

$$\begin{aligned} & \frac{(B+2zh_j^n)}{2\Delta t} (\Delta h_{j+1} + \Delta h_j) + \frac{\theta}{\Delta x} (\Delta Q_{j+1} - \Delta Q_j) \\ & + \frac{1-\theta}{\Delta x} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) = \frac{\theta}{2} (q_{j+1}^{n+1} - q_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (q_{j+1}^n - q_j^n) \end{aligned} \quad (10)$$

atau dalam bentuk lain:

$$a_j \Delta h_{j+1} + b_j \Delta Q_{j+1} + c_j h_j + d_j \Delta Q_j = e_j$$

dimana:

$$a_j = \frac{(B+2zh_j^n)}{2\Delta t}$$

$$b_j = \frac{\theta}{\Delta x}$$

$$c_j = a_j$$

$$d_j = -b_j$$

$$e_j = \frac{\theta}{2} (q_{j+1}^{n+1} - q_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (q_{j+1}^n - q_j^n) - \frac{1}{\Delta x} (Q_j^n - Q_{j+1}^n)$$

4.2 Persamaan momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} & \cong \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{2} - \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{2} \right) \cong \\ & \frac{1}{2\Delta t} (\Delta Q_{j+1} + \Delta Q_j) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) & \cong \frac{\theta}{\Delta x} \left[\left(\frac{Q}{A} \right)_{j+1}^{n+1} - \left(\frac{Q}{A} \right)_j^{n+1} \right] + \\ & \frac{(1-\theta)}{\Delta x} \left[\left(\frac{Q}{A} \right)_{j+1}^n - \left(\frac{Q}{A} \right)_j^n \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial x} & \cong \frac{\theta}{\Delta x} (h_{j+1}^{n+1} - h_j^{n+1}) + \frac{(1-\theta)}{\Delta x} (h_{j+1}^n - h_j^n) \\ & \cong \frac{\theta}{\Delta x} (\Delta h_{j+1} - \Delta h_j) + \frac{1}{\Delta x} (h_{j+1}^n - h_j^n) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{gQ|Q|}{C^2AR} \cong \frac{g}{2} \left(\frac{|Q_j^n|Q_j^{n+1} + |Q_{j+1}^n|Q_{j+1}^{n+1}}{(C^2RA)_j^{n+\frac{1}{2}} + (C^2RA)_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} \right) \cong \frac{g}{2} \left(\frac{|Q_j^n|(Q_j^n + \Delta Q_j) + |Q_{j+1}^n|(Q_{j+1}^n + \Delta Q_{j+1})}{(C^2RA)_j^{n+\frac{1}{2}} + (C^2RA)_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} \right) \quad (15)$$

Substitusi **Persamaan (12), (13), (14), dan (15)** ke **Persamaan (3)** menghasilkan:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\Delta t} (\Delta Q_{j+1} + \Delta Q_j) + \frac{\theta}{\Delta x} \left[\left(\frac{Q}{A} \right)_{j+1}^{n+1} - \left(\frac{Q}{A} \right)_j^{n+1} \right] + \\ & \frac{(1-\theta)}{\Delta x} \left[\left(\frac{Q}{A} \right)_{j+1}^n - \left(\frac{Q}{A} \right)_j^n \right] - g \left[\frac{\theta}{2} (A_{j+1}^{n+1} + A_j^{n+1}) + \right. \\ & \left. \frac{1-\theta}{2} (A_{j+1}^n + A_j^n) \right] S_0 \\ & + g \left[\frac{\theta}{2} (A_{j+1}^{n+1} + A_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (A_{j+1}^n + A_j^n) \right] \\ & \left[\frac{\theta}{\Delta x} (\Delta h_{j+1} - \Delta h_j) + \frac{1}{\Delta x} (h_{j+1}^n - h_j^n) \right] + \\ & \frac{g}{2} \left(\frac{|Q_j^n|(Q_j^n + \Delta Q_j) + |Q_{j+1}^n|(Q_{j+1}^n + \Delta Q_{j+1})}{(C^2RA)_j^{n+\frac{1}{2}} + (C^2RA)_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

atau dalam bentuk lain:

$$a_j^* \Delta h_{j+1} + b_j^* \Delta Q_{j+1} + c_j^* h_j + d_j^* \Delta Q_j = e_j^* \quad (17)$$

dimana:

$$a_j^* = g\Delta t \left[\frac{\theta}{2} (A_{j+1}^{n+1} + A_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (A_{j+1}^n + A_j^n) \right] \frac{\theta}{\Delta x}$$

$$b_j^* = \frac{1}{2} + \frac{g\Delta t}{2} \left(\frac{|Q_{j+1}^n|}{(C^2RA)_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} \right)$$

$$c_j^* = -a_j^*$$

$$d_j^* = \frac{1}{2} + \frac{g\Delta t}{2} \left(\frac{|Q_j^n|}{(C^2RA)_j^{n+\frac{1}{2}}} \right)$$

$$e_j^* = -\frac{\theta\Delta t}{\Delta x} \left[\left(\frac{Q}{A} \right)_{j+1}^{n+1} - \left(\frac{Q}{A} \right)_j^{n+1} \right] - \frac{(1-\theta)\Delta t}{\Delta x}$$

$$- \left[\left(\frac{Q}{A} \right)_{j+1}^n - \left(\frac{Q}{A} \right)_j^n \right] + g\Delta t \left[\frac{\theta}{2} (A_{j+1}^{n+1} + A_j^{n+1}) + \right.$$

$$g\Delta t \left[\frac{\theta}{2} (A_{j+1}^{n+1} + A_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (A_{j+1}^n + A_j^n) \right] S_0 -$$

$$g\Delta t \left[\frac{\theta}{2} (A_{j+1}^{n+1} + A_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (A_{j+1}^n + A_j^n) \right]$$

$$\left[\frac{1}{\Delta x} (h_{j+1}^n - h_j^n) \right] - \frac{g\Delta t}{2} \left(\frac{|Q_j^n|Q_j^n + |Q_{j+1}^n|Q_{j+1}^n}{(C^2RA)_j^{n+\frac{1}{2}} + (C^2RA)_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} \right)$$

Persamaan (11) dan (17) adalah non-linier, karena harga-harga koefisiennya mengandung harga kisaran H, Q pada waktu sebelumnya, nDt, dan juga pada waktu yang akan dihitung, (n+1)Dt. Untuk itu perlu dilakukan linearisasi bentuk-bentuk non-linier. Linearisasi dilakukan dalam dua tahap perhitungan. Pada tahap pertama penyelesaian **Persamaan (11) dan (17)** dilakukan dengan menghitung koefisien a_j s/d e_j berdasarkan nilai kisaran pada tahap waktu nDt atau menganggap $DH = DQ = 0$. Kisaran yang didapat dari perhitungan tahap pertama ini kemudian digunakan untuk

menghitung koefisien a_j s/d e_j tahap kedua. Selanjutnya **Persamaan (11)** dan **(17)** diselesaikan kembali dengan nilai-nilai koefisien yang baru ini.

4.2.1 Penyelesaian dengan metoda sapuan ganda

Untuk menyelesaikan **Persamaan (11)** dan **(17)** yang mengandung empat buah parameter atau variabel, dibutuhkan dua persamaan lagi.

Misalkan terdapat hubungan linier sebagai berikut:

$$\Delta Q_j = E_j \Delta H_j + F_j \quad (18)$$

$$\Delta Q_{j+1} = E_{j+1} \Delta H_{j+1} + F_{j+1} \quad (19)$$

Substitusi **Persamaan 18** ke **Persamaan 11** diperoleh :

$$a_j \Delta H_{j+1} + b_j \Delta Q_{j+1} + c_j \Delta H_j + d_j (E_j \Delta H_j + F_j) = e_j$$

atau

$$\Delta H_j = -\frac{a_j}{c_j + d_j E_j} \Delta H_{j+1} - \frac{b_j}{c_j + d_j E_j} \Delta Q_{j+1} + \frac{e_j - d_j F_j}{c_j + d_j E_j}$$

atau

$$\Delta H_j = L_j \Delta H_{j+1} + M_j \Delta Q_{j+1} + N_j \quad (20)$$

dimana

$$L_j = -\frac{a_j}{c_j + d_j E_j}; M_j = -\frac{b_j}{c_j + d_j E_j}; N_j = \frac{e_j - d_j F_j}{c_j + d_j E_j}$$

Dengan cara yang sama, substitusi **Persamaan (19)** ke **Persamaan (17)** diperoleh:

$$\Delta H_j = L_j^* \Delta H_{j+1} + M_j^* \Delta Q_{j+1} + N_j^* \quad (21)$$

Eliminasi ΔH_j dari **Persamaan (20)** dan **Persamaan (21)** menghasilkan:

$$\left(\frac{a_j}{c_j + d_j E_j} + \frac{a_j^*}{c_j + d_j E_j} \right) \Delta H_{j+1} + \left(\frac{b_j}{c_j + d_j E_j} + \frac{b_j^*}{c_j + d_j E_j} \right) \Delta Q_{j+1} + \frac{e_j - d_j F_j}{c_j + d_j E_j} - \frac{e_j^* - d_j^* F_j^*}{c_j + d_j E_j} = 0$$

atau

$$\Delta Q_{j+1} = \frac{a_j (c_j^* + d_j^* E_j) - a_j^* (c_j + d_j E_j)}{b_j^* (c_j + d_j E_j) - b_j (c_j^* + d_j^* E_j)} \Delta H_{j+1} + \frac{(e_j^* - d_j^* F_j^*) (c_j + d_j E_j) - (e_j - d_j F_j) (c_j^* + d_j^* E_j)}{b_j^* (c_j + d_j E_j) - b_j (c_j^* + d_j^* E_j)}$$

$$\Delta Q_{j+1} = E_{j+1} \Delta H_{j+1} + F_{j+1} \quad (22)$$

4.2.2 Syarat batas dan syarat awal

4.2.2.1 Syarat batas

Ada tiga kemungkinan syarat batas yaitu:

$$Q = Q(t)$$

$$H = H(t)$$

$$Q = f(H)$$

Dalam hal ini digunakan syarat batas $Q=Q(t)$ di hulu saluran, sehingga *sweep* ke depan dapat dilakukan sbb:

$$\Delta Q_1 = E_1 \Delta \eta_1 + F_1$$

$$E_1 = 0$$

$$F_1 = \Delta Q_1$$

Selain itu syarat batas di hilir diberikan juga $\eta=\eta(t)$, sehingga *sweep* ke belakang dapat dilakukan.

4.2.2.2 Syarat awal

Syarat awal adalah kondisi awal aliran.

Dalam hal ini sebagai syarat awal diketahui $Q=Q(x)$.

5. Analisa dan Diskusi

Pemodelan fisik dengan menggunakan flume telah dilakukan di Laboratorium Uji Model Hidraulika, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung. Hasil dari pemodelan fisik pada jarak 100 cm dari syarat batas hulu (tengah-tengah flume) tersebut dapat dilihat dalam bentuk grafik pada **Gambar 11**. Dari **Gambar 11** dapat dilihat bahwa kecepatan aliran mencapai nilai maksimumnya terlebih dahulu yang kemudian diikuti oleh debit mencapai nilai maksimumnya dan yang terakhir mencapai nilai maksimum adalah tinggi muka air.

Dilihat dari nilai error yang cukup besar maka hasil pemodelan numerik di atas perlu dikaji ulang.

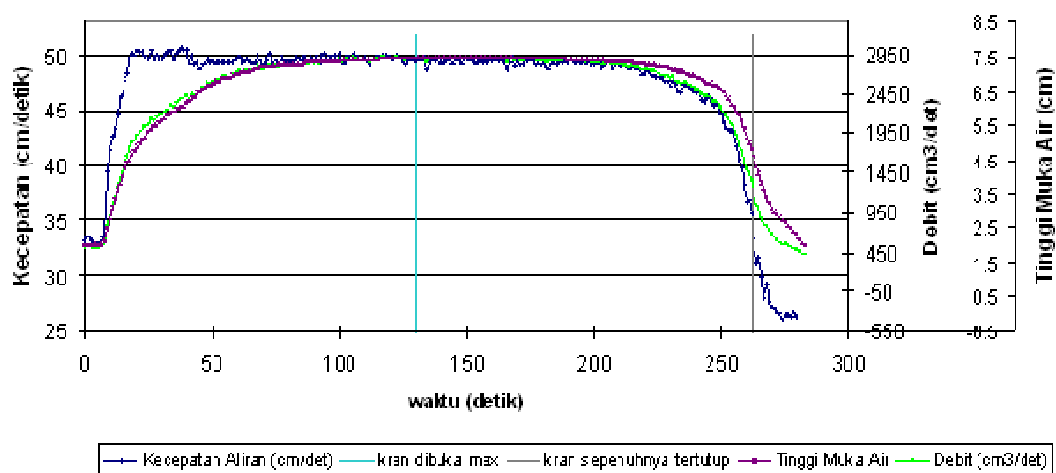
Dari hasil diskusi diambil keputusan bahwa nilai n (koefisien kekasaran saluran) yang diperoleh dari perhitungan korelasi debit, kecepatan dan koefisien kekasaran saluran menggunakan rumus manning pada aliran tunak atau langgeng atau steady pada media yang sama hasilnya kurang tepat, mengingat jika mengambil nilai n (koefisien kekasaran saluran) dari buku literatur seperti pada buku ven te chow (**Tabel 1**) untuk saluran kaca nilai n berkisar 0,009 – 0,013. Setelah melakukan pencarian nilai koefisien kekasaran saluran yang cocok untuk saluran flume ini dengan cara trial & error maka didapat angka sebesar 0,0022. Angka ini dianggap cukup mewakili dikarenakan nilai n dari buku literatur dipergunakan

untuk saluran yang lebar (perbandingan antara lebar saluran dengan tinggi muka air di atas 10), dimana pengaruh dari dinding kiri dan kanan saluran kecil. Sedangkan pada kajian ini media flume yang digunakan mempunyai lebar saluran 7,8 cm dan tinggi muka air maksimum kurang lebih 7 cm sehingga efek dari dinding saluran dirasakan cukup besar dan juga dikarenakan umur pakai yang telah cukup lama membuat dinding serta dasar saluran flume yang tergerus aliran menjadikan dasar dan dinding saluran semakin licin sehingga nilai n yang dipakai sedikit lebih kecil dari buku literatur. Namun untuk memastikan nilai kekasaran saluran (n) yang sesuai dengan media flume ini diperlukan kajian yang lebih lanjut.

Tabel 1. Nilai kekasaran saluran (n) (Chow,1959)

| Type of channel and description | | Minimum | Normal | Maximum |
|--|--|---------|--------|---------|
| A. Closed Conduits Flowing Partly Full | | | | |
| A-1. Metal | | | | |
| a. Brass, smooth | | 0.009 | 0.010 | 0.013 |
| b. Steel | | | | |
| 1. Lock bar and welded | | 0.010 | 0.012 | 0.014 |
| 2. Riveted and spiral | | 0.013 | 0.016 | 0.017 |
| c. Cast iron | | | | |
| 1. Coated | | 0.010 | 0.013 | 0.014 |
| 2. Uncoated | | 0.011 | 0.014 | 0.016 |
| d. Wrought iron | | | | |
| 1. Black | | 0.012 | 0.014 | 0.015 |
| 2. Galvanized | | 0.013 | 0.016 | 0.017 |
| e. Corrugated metal | | | | |
| 1. Sub drain | | 0.017 | 0.019 | 0.021 |
| 2. Storm drain | | 0.021 | 0.024 | 0.030 |
| A-2. Nonmetal | | | | |
| a. Lucite | | 0.008 | 0.009 | 0.010 |
| b. Glass | | 0.009 | 0.010 | 0.013 |
| c. Cement | | | | |
| 1. Neat, surface | | 0.010 | 0.011 | 0.013 |
| 2. Mortar | | 0.011 | 0.013 | 0.015 |

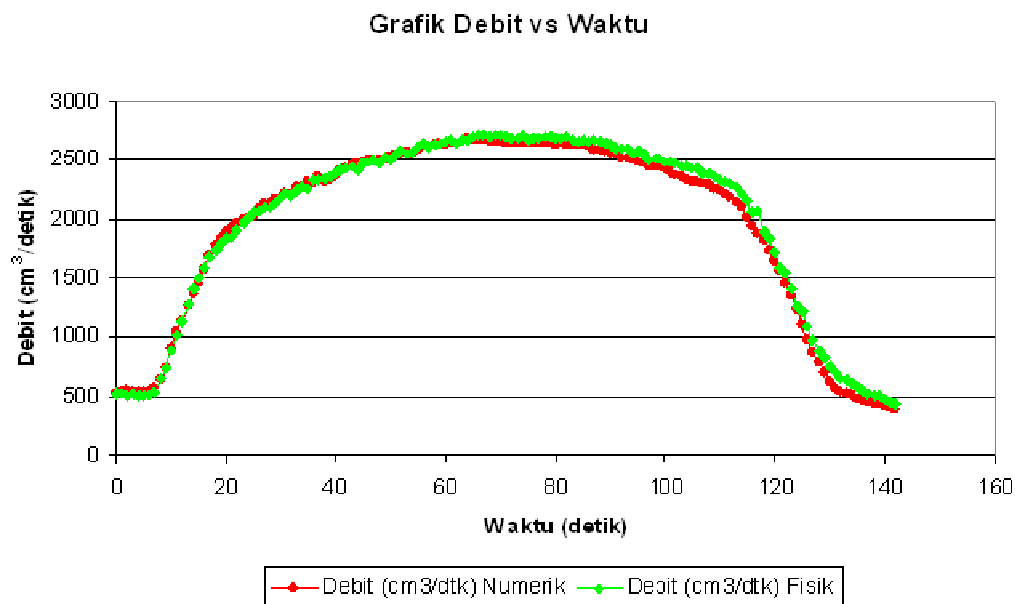
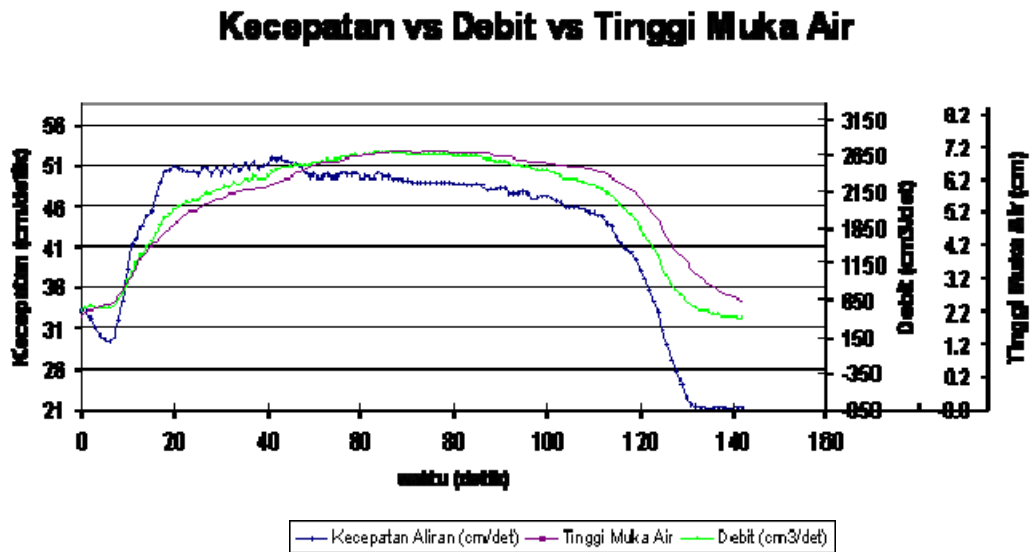
Kecepatan vs Debit vs Tinggi Muka Air



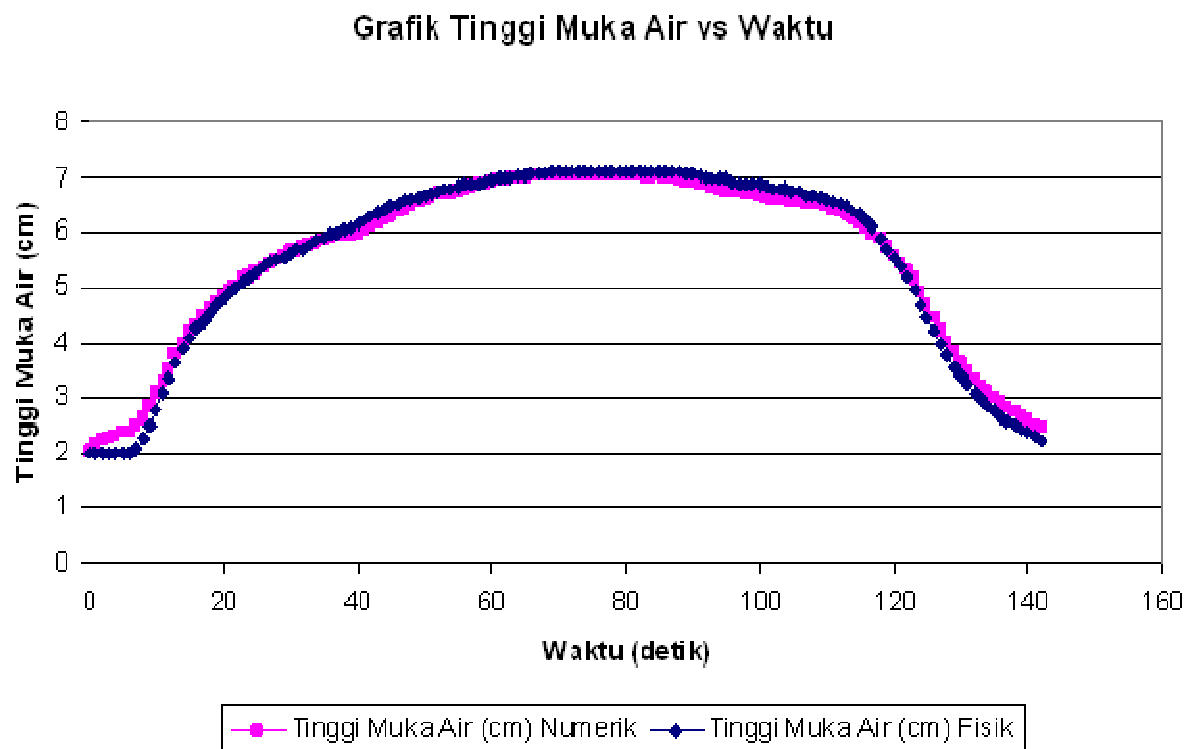
Gambar 11. Grafik kecepatan aliran, debit dan tinggi muka air terhadap waktu (Pemodelan Fisik)

Dengan syarat batas pada bagian hulu dan hilir yang diperoleh dari pemodelan fisik dan nilai n (koefisien kekasaran saluran) yang baru sebesar 0,0022 serta nilai θ (faktor pemberat) sebesar 0,75 maka dilakukan kembali pemodelan numerik satu dimensi dengan metoda beda hingga (*finite difference*) dengan hasil yang dapat dilihat dalam bentuk grafik pada **Gambar 12**. Dimana angka 0 (hulu) sampai dengan 10 (hilir) menunjukkan titik peninjauan per 20 cm dari syarat batas hulu.

Perbandingan hasil perhitungan dari pemodelan fisik dengan hasil pemodelan numerik pada posisi tengah (100 cm dari syarat batas hulu) dapat dilihat berupa grafik pada **Gambar 13 - 15**. Seperti yang terlihat pada **Gambar 13**, hasil perhitungan debit pada pemodelan numerik tidak jauh berbeda (rata-rata error sebesar 3,84%) dengan hasil pengukuran pada pemodelan numerik.

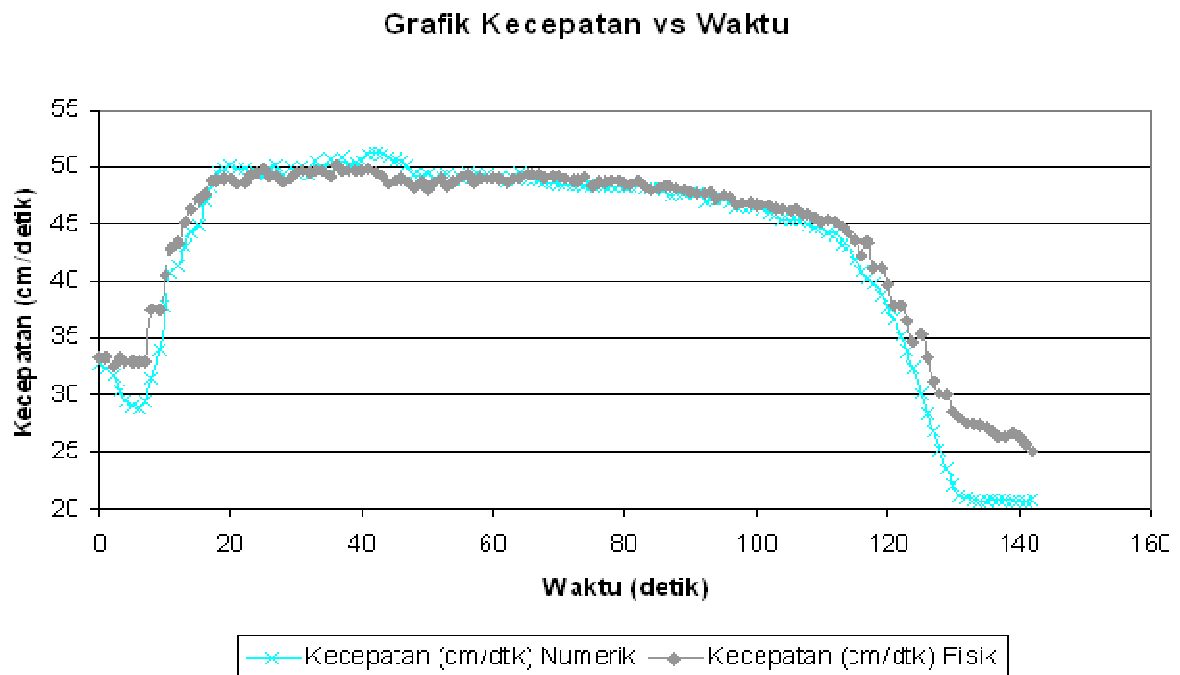


Seperti yang terlihat pada **Gambar 14**, hasil perhitungan tinggi muka air pada pemodelan numerik tidak jauh berbeda (rata-rata error sebesar 3,32%) dengan hasil pengukuran pada pemodelan numerik.



Gambar 14. Grafik tinggi muka air terhadap waktu

Seperti yang terlihat pada **Gambar 15**, hasil perhitungan kecepatan aliran pada pemodelan numerik tidak jauh berbeda (rata-rata error sebesar 4,63%) dengan hasil pengukuran pada pemodelan numerik.

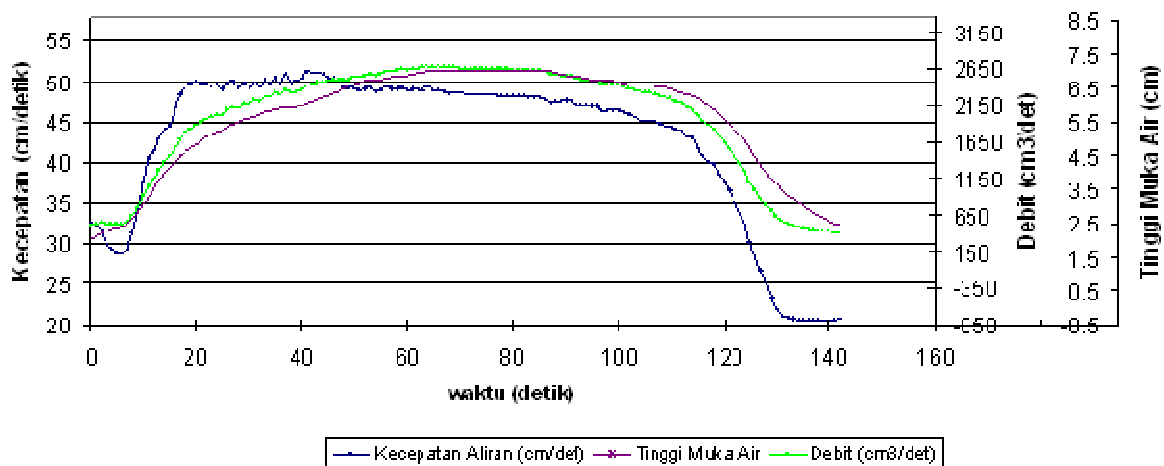


Gambar 15. Grafik kecepatan aliran terhadap waktu

Untuk melihat pengaruh dari perbedaan bentuk penampang pada saluran, maka dibuatlah pemodelan numerik satu dimensi dengan metoda beda hingga (*finite difference*) dengan 3 macam bentuk penampang dengan lebar dasar saluran yang sama yaitu 7,8 cm dan syarat batas pada bagian hulu dan hilir yang diperoleh dari pemodelan fisik dan n (nilai koefisien kekasaran) sebesar 0,0022. Penampang pertama berbentuk persegi panjang (sama dengan penampang flume/pemodelan fisik/ $z = 0$), yang kedua penampang berbentuk trapesium dengan kemiringan $z = 1$ dan yang ketiga berbentuk trapesium juga, hanya kemiringannya $z = 2$.

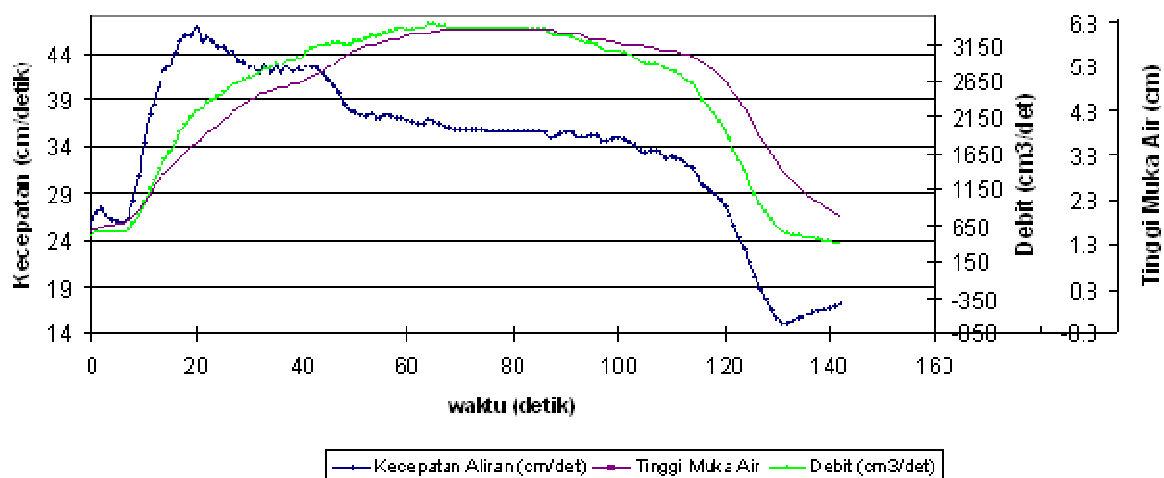
Hasil dari dari pemodelan numerik satu dimensi dengan metoda beda hingga (*finite difference*) dapat dilihat berupa grafik pada **Gambar 16 - 18**. **Gambar 16** merupakan hasil perhitungan pemodelan numerik dengan bentuk penampang persegi panjang ($z = 0$), **Gambar 17** merupakan hasil perhitungan pemodelan numerik dengan bentuk penampang trapesium dengan $z = 1$, dan yang terakhir **Gambar 18** merupakan hasil perhitungan pemodelan numerik dengan bentuk penampang trapesium dengan $z = 2$.

Kecepatan vs Debit vs Tinggi Muka Air ($z = 0$)



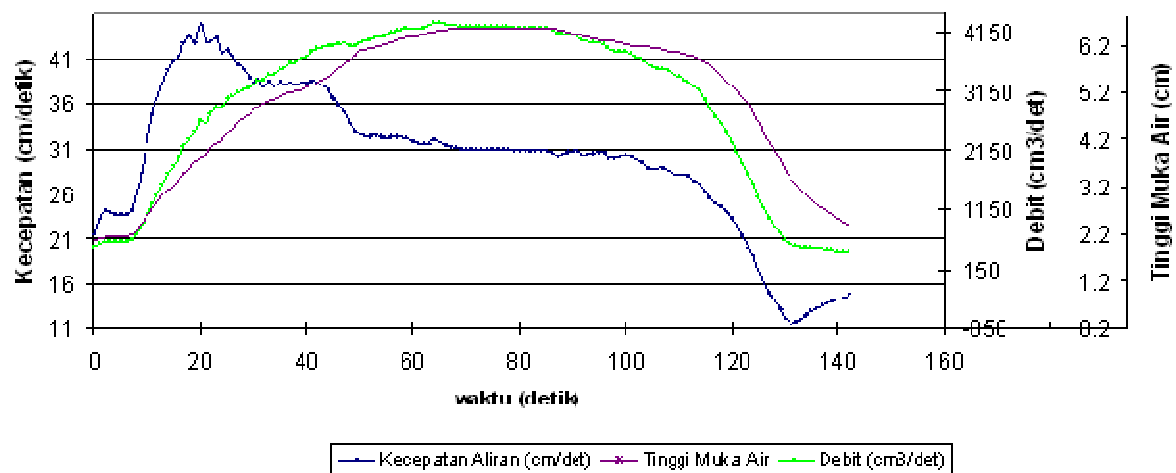
Gambar 16. Grafik kecepatan aliran, debit dan tinggi muka air terhadap waktu ($z=0$)

Kecepatan vs Debit vs Tinggi Muka Air ($z = 1$)



Gambar 17. Grafik kecepatan aliran, debit dan tinggi muka air terhadap waktu ($z=1$)

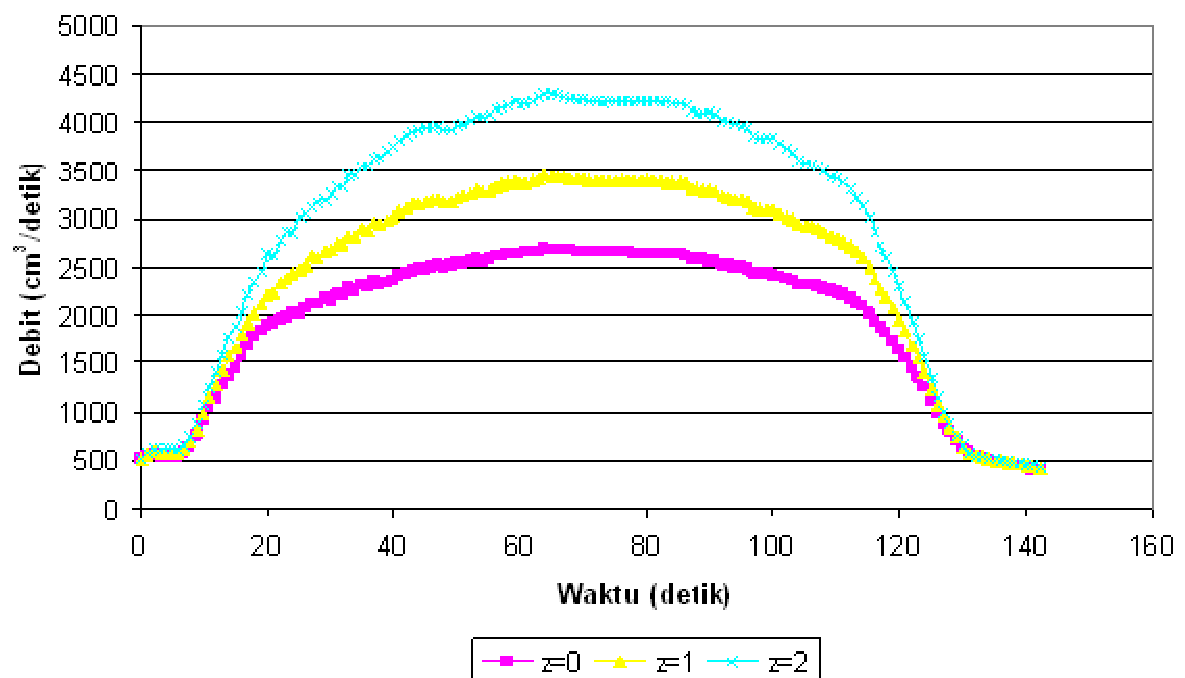
Kecepatan vs Debit vs Tinggi Muka Air ($z = 2$)



Gambar 18. Grafik kecepatan aliran, debit dan tinggi muka air terhadap waktu ($z=2$)

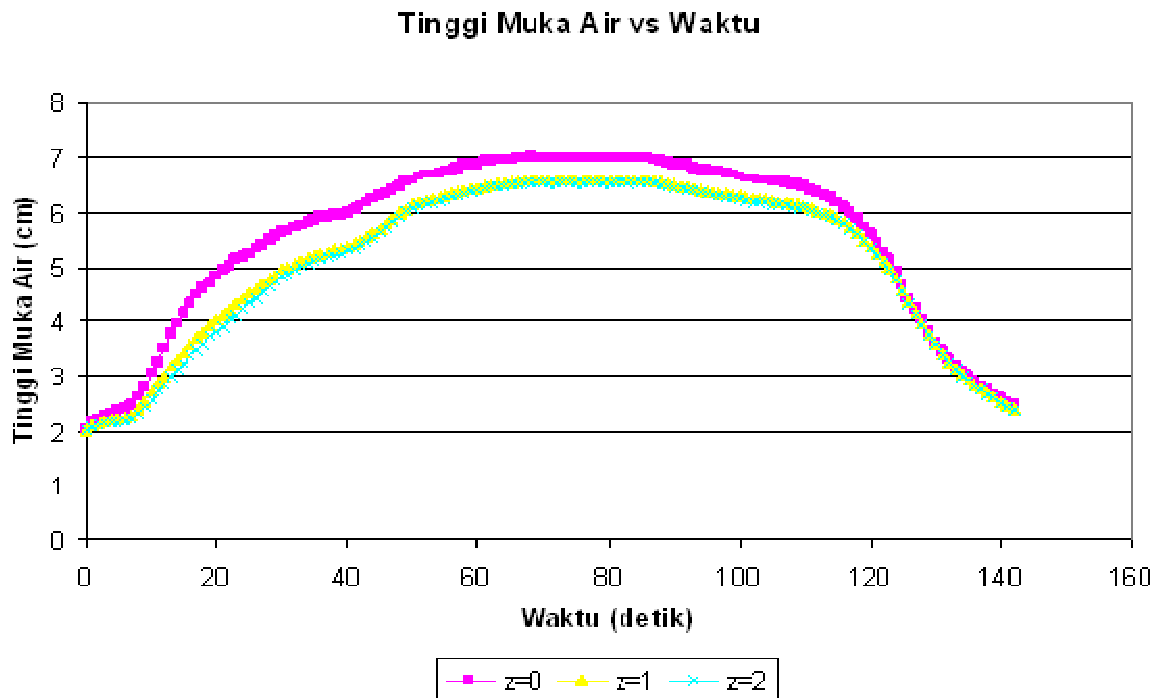
Perbandingan hasil perhitungan pemodelan numerik berpenampang trapesium dengan $z = 0$ (persegi panjang), $z = 1$ dan $z = 2$ pada posisi tengah (100 cm dari syarat batas hulu) dapat dilihat berupa grafik pada **Gambar 19 - 21**. Seperti yang terlihat pada **Gambar 19**, hasil perhitungan debit pada penampang trapesium dengan $z = 2$ lebih besar dari pada debit dengan penampang trapesium dengan $z = 1$ dan $z = 0$ (persegi panjang).

Debit Air vs Waktu



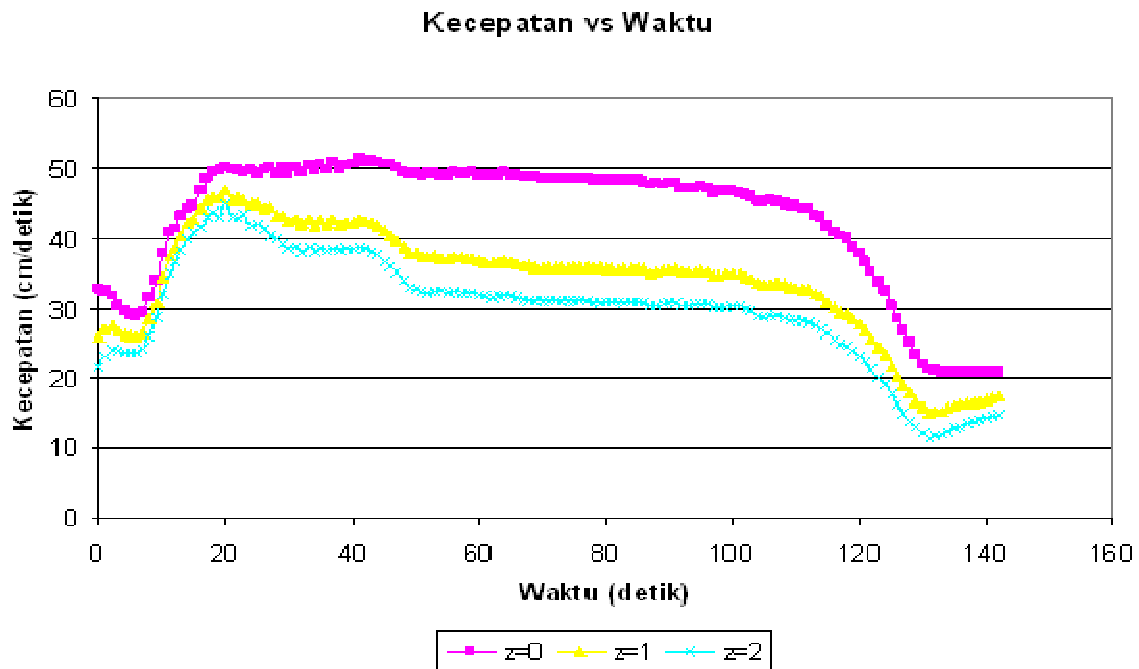
Gambar 19. Grafik debit terhadap waktu

Seperti yang terlihat pada **Gambar 20**, hasil perhitungan tinggi muka air pada penampang persegi panjang (trapesium dengan $z = 0$) lebih besar dari pada debit dengan penampang trapesium dengan $z = 1$ dan $z = 2$.



Gambar 20. Grafik tinggi muka air terhadap waktu

Seperti yang terlihat pada **Gambar 21**, hasil perhitungan kecepatan aliran pada penampang persegi panjang (trapesium dengan $z = 0$) lebih besar dari pada debit dengan penampang trapesium dengan $z = 1$ dan $z = 2$.



Gambar 21. Grafik kecepatan aliran terhadap waktu

Dengan syarat batas hulu (berupa debit dan tinggi muka air) dan hilir (selisih tinggi muka air) yang sama, nilai n (koefisien kekasaran) yang juga sama menghasilkan nilai tinggi muka air yang tidak jauh berbeda (untuk penampang trapesium dengan $z = 1$ dan $z = 2$) dan nilai kecepatan yang tidak jauh berbeda bila dibandingkan hasil perhitungan debit yang lebih jelas perbedaannya. Hal ini disebabkan oleh debit merupakan fungsi dari kecepatan dan luas penampang basah. Dimana dengan tinggi muka air yang boleh dikatakan relatif sama terdapat perbedaan luas permukaan basah yang cukup besar antara penampang berbentuk persegi panjang (trapesium dengan $z = 0$), penampang berbentuk trapesium dengan $z = 1$ dan penampang berbentuk trapesium dengan $z = 2$.

6. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil pemodelan dan perhitungan-perhitungan yang sudah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan pada pemodelan fisik dan pemodelan numerik menunjukkan bahwa kecepatan aliran terlebih dahulu mencapai nilai maksimum yang kemudian diikuti oleh debit dan yang terakhir mencapai nilai maksimum adalah tinggi muka air.
2. Pada kehidupan nyata kejadian debit yang berubah cepat terjadi pada saat banjir, runtuhnya tanggul penahan air atau bendung, pembukaan pintu air. Saat kejadian debit berubah cepat, pada daerah sepanjang alirannya perlu perhatian khusus dikarenakan dengan tinggi muka air yang belum terlalu tinggi kecepatan alirannya sudah mencapai nilai maksimum dan ini dapat membahayakan struktur bangunan atau pun makhluk hidup yang ada di sepanjang aliran tersebut.
3. Hasil perhitungan debit, tinggi muka air dan kecepatan aliran dari pemodelan numerik tidak terlalu berbeda jauh (rata-rata error 3,83%, 3,34% dan 4,60%) dengan hasil perhitungan pada pemodelan fisik.
4. Dengan syarat batas dari pemodelan fisik, nilai n (koefisien kekasaran) sebesar 0,0022 dan lebar dasar yang sama yaitu 7,8 cm harga debit yang didapat dengan penampang trapesium dengan $z = 2$ paling besar dibandingkan penampang trapezium dengan $z = 1$ dan penampang persegi panjang ($z = 0$). Hal ini disebabkan dengan tinggi muka air yang relatif sama antara tiga penampang tersebut menghasilkan luas penampang basah yang cukup besar pada penampang saluran dengan $z = 2$, sedangkan debit merupakan fungsi dari kecepatan dan luas penampang basah.

Berdasarkan hasil penelitian ini, ada beberapa saran yang bisa diajukan, antara lain:

1. Jika memungkinkan pengukuran pada pemodelan fisik mempergunakan alat ukur yang lebih akurat.
2. Diperlukan perawatan secara berkala pada peralatan di laboratorium model uji fisik seperti flume dan current meter.
3. Perlu kajian lebih lanjut untuk menentukan nilai kekasaran saluran (n) dikarenakan pada kajian ini nilai n didapat dari hubungan empiris dari rumus Manning dengan asumsi aliran yang terjadi adalah aliran tunak atau langgeng atau *steady flow* dan kecepatan arah melintang adalah seragam.
4. Untuk penelitian lebih lanjut, sebaiknya diperhatikan faktor koreksi untuk nilai kecepatan rata-rata terhadap perbandingan lebar saluran dengan tinggi muka air.
5. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan dengan pemodelan 2 dimensi atau digabung dengan pergerakan sedimen dan dengan kemiringan dasar saluran yang berbeda-beda agar hasil yang didapat lebih mendekati keadaan yang sebenarnya.

Daftar Pustaka

- Cahyono, M., 2000, Catatan Kuliah Hidraulika Lanjut, *Pemodelan Hidraulik Aliran dan Angkutan Polutan di Saluran dan Sungai*, Penerbit ITB.
- Chow, V.T., 1959, *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Kogakusha.
- Chow, V.T, Maidment, D.R., Mays, L.W., 1998, *Applied Hydrology*, Singapore: McGraw-Hill, 272 – 288.

