

STUDI EKSPERIMENTAL ALIRAN BERUBAH BERATURAN PADA SALURAN TERBUKA BENTUK PRISMATIS

Edy Harseno¹⁾, Setdin Jonas V.L²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UKRIM Yogyakarta

²⁾Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UKRIM Yogyakarta

Abstract

The open channel flow water has free surface condition. Many problems of flows not always can't be solved with analytic method. The objective of this study is to observe the height of free surface water in order at along of the open channel.

This research studied the spatially varied flow was done on the open channel with has a length 4 mm, width 10 cm, and height 20 c. to obtain Manning's coefficient (n) was done 4 times test with has the depth of water 0,029 m, 0,023 m and 0,015 m and the slope of channel 0, 0001, 0,003 and 0,005 and the weir has 5 cm, 10 cm height was installed in an open channel.

Installing weir with 5 cm and 10 cm height on the open channel with the slope differ result the height of water surface on each interval spatially varied flow occurs and backwater surface cab be measured the effect of installing weir result water surface profile mild type (M) caused $y > y_n > y_c$. The computing of normal water depth y_n and critical water depth using Manning Formula, measurement of channel and numerical integration method use Taylor series have the relative same result.

Keywords: open channel, flow, water surface

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saluran terbuka adalah saluran dimana air mengalir dengan muka air bebas. Pada semua titik disepanjang saluran, tekanan dipermukaan air adalah sama. Pada saluran terbuka, misalnya sungai (saluran alam), Parameter saluran sangat tidak teratur baik terhadap ruang dan waktu. Parameter tersebut adalah tampang lintang saluran, kekasaran, kemiringan dasar, belokan, pembendungan, debit aliran dan sebagainya.

Ketidakteraturan tersebut mengakibatkan analisis aliran sangat sulit untuk diselesaikan secara analitis. Pembendungan pada saluran merupakan suatu peralihan yang berfungsi untuk mengetahui tinggi permukaan air di sepanjang

saluran, sifat-sifat aliran yang dalam hal ini adalah aliran yang cenderung berubah secara beraturan. Hal ini mendorong penulis untuk mengamati dan meneliti perilaku aliran berubah beraturan sesuai dengan teori-teori dalam ilmu hidrolika.

Dari eksperimen aliran pada saluran yang dirancang, selanjutnya dirumuskan permasalahan yaitu, bagaimana kesesuaian hasil analisis data berdasarkan pengukuran debit aliran pada saluran terbuka melalui pembendungan dengan hasil hitungan analitis teoritis.

B. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui tinggi permukaan air secara bertahap di sepanjang saluran agar dapat digunakan sebagai informasi dalam perencanaan saluran dan bermanfaat memberikan sumbangan pengetahuan tentang perilaku aliran berubah beraturan pada saluran terbuka prismatic.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Saluran Terbuka

Saluran terbuka adalah saluran di mana air mengalir dengan muka air bebas. Kajian tentang perilaku aliran dikenal dengan mekanika fluida (*fluid mechanics*). Hal ini menyangkut sifat-sifat fluida dan pengaruhnya terhadap pola aliran dan gaya yang akan timbul di antara fluida dan pembatas (dinding). Telah diketahui secara umum bahwa akibat adanya perilaku terhadap aliran untuk memenuhi kebutuhan manusia, menyebabkan terjadinya perubahan alur aliran dalam arah horizontal maupun vertikal.

Berbagai permasalahan teknik yang berhubungan dengan aliran terkadang tidak dapat diselesaikan dengan analitis, maka harus melakukan pengamatan dengan membuat suatu bentuk saluran atau alat peraga, bentuk saluran ini mempunyai bentuk yang sama dengan permasalahan yang diteliti, tetapi ukuran dimensi lebih kecil dari yang ada di lapangan.

Saluran digolongkan menjadi dua macam yaitu, saluran alam (*natural*) dan saluran buatan (*artificial*). Saluran alam merupakan suatu aliran yang meliputi semua alur aliran air secara alami, seperti sungai yang kecil dan besar dimana alirannya mengalir dari hulu ke hilir. Saluran buatan saluran yang dibuat dan direncanakan sesuai dengan konteks pemanfaatannya seperti, saluran irigasi, saluran drainase, saluran pembawa pada pembangkit listrik tenaga air dan saluran untuk industri. Karakteristik aliran yang terjadi pada saluran buatan merupakan aliran seragam yang terjadi di sepanjang saluran.

1. Klasifikasi aliran

Aliran melalui saluran terbuka disebut seragam (*uniform*) yaitu apabila berbagai jenis aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan dan debit pada

setiapampang di sepanjang aliran adalah konstan. Adapun klasifikasi aliran pada saluran terbuka adalah :

a. Aliran tunak (*steady flow*)

Aliran tunak (*steady flow*) terjadi jika kedalaman aliran tidak berubah atau selalu dalam keadaan konstan pada selang waktu tertentu. Untuk menentukan debit aliran (Q) pada suatu penampang saluran dapat dirumuskan sebagai :

$$Q = V \cdot A \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan V adalah kecepatan rata-rata dan A adalah luas penampang melintang tegak lurus terhadap arah aliran. Pada aliran tunak, disimpulkan bahwa debit aliran dianggap konstan di sepanjang saluran yang bersifat kontinyu. Maka persamaan (2.1) diubah menjadi :

$$Q = V1 \cdot A1 = V2 \cdot A2 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Persamaan (2.2) menunjukkan penampang saluran berbeda dan tidak dapat digunakan apabila aliran tunak tidak seragam (*nonuniform*) di sepanjang saluran dan jika air mengalir dengan muka air bebas di sepanjang saluran maka jenis aliran akan berubah beraturan (*spatially varied flow*) atau aliran tidak kontinyu (*diskontinou flow*), misalnya : terdapat pada saluran pembawa pada irigasi, saluran pembuang, pelimpah luapan samping, air pembilas dari penyaringan dan terdapat pada selokan.

b. Aliran seragam (*uniform flow*)

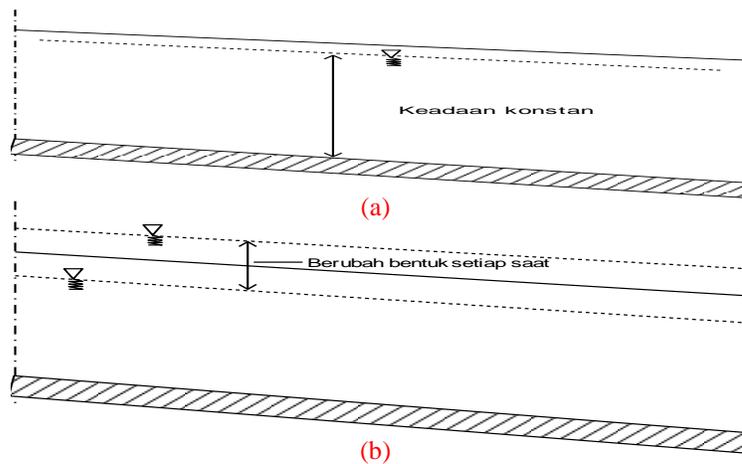
Aliran seragam merupakan aliran dengan kecepatan rata-rata sepanjang alur aliran adalah sama sepanjang waktu. Aliran dikatakan seragam, jika kedalaman aliran sama pada setiap penampang saluran. Di dalam aliran seragam, dianggap bahwa aliran adalah mantap dan satu dimensi yang berarti kecepatan aliran di setiap titik pada tampang lintang tidak berubah, misalnya aliran melalui saluran irigasi yang sangat panjang dan tidak ada perubahan penampang. Pada umumnya aliran seragam pada saluran terbuka dengan tampang lintang prismatic adalah aliran dengan kecepatan konstan dan kedalaman air konstan. Di samping itu permukaan aliran sejajar dengan permukaan dasar saluran, sehingga kecepatan dan kedalaman aliran disebut dalam kondisi seimbang (kondisi *equilibrium*).

c. Aliran tak seragam (*varied flow*)

Aliran tak seragam adalah kedalaman dan kecepatan aliran disepanjang saluran tidak konstan, garis tenaga tidak sejajar dengan garis muka air dan dasar saluran. Analisis aliran tak seragam biasanya bertujuan untuk mengetahui profil aliran di sepanjang saluran atau sungai. Analisis ini banyak dilakukan dalam perencanaan perbaikan sungai atau penanggulangan banjir, elevasi jembatan dan sebagainya. Dalam hal ini analisis aliran menjadi jauh lebih mudah dan hasil hitungan akan lebih aman, karena debit yang diperhitungkan adalah debit puncak yang

sebenarnya terjadi sesaat, tetapi dalam analisis ini dianggap terjadi dalam waktu yang lama. Aliran tak seragam dapat dibedakan dalam dua kelompok berikut ini :

- 1). Aliran berubah beraturan (*gradually varied flow*), terjadi jika parameter hidraulis (kecepatan, tampang basah) berubah secara progresif dari satu tampang ke tampang yang lain. Apabila di ujung hilir saluran terdapat bendung maka akan terjadi profil muka air pembendungan dimana kecepatan aliran akan berkurang (diperlambat), sedangkan apabila terdapat terjunan maka profil aliran akan menurun dan kecepatan akan bertambah (dipercepat) contoh aliran pada sungai
- 2). Aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*), terjadi jika parameter hidraulis berubah secara mendadak (saluran transisi), loncat air, terjunan, aliran melalui bangunan pelimpah dan pintu air.



Gambar 2.1 (a) Aliran seragam (b) Aliran seragam tak tunak

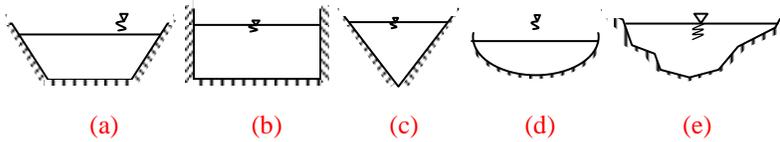
Kecepatan rata-rata aliran seragam turbulen pada saluran terbuka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V = C R^x S^y \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan : V adalah kecepatan rata-rata satuan meter kubik per detik, R adalah jari-jari hidrolis satuan meter, S adalah kemiringan energi, x dan y merupakan eksponen , dan C adalah faktor tekanan aliran yang berlainan sesuai dengan kecepatan rata-rata, jari-jari hidroulis, kekasaran slauran-saluran dan berbagai faktor-faktor lainnya.

2. Bentuk saluran

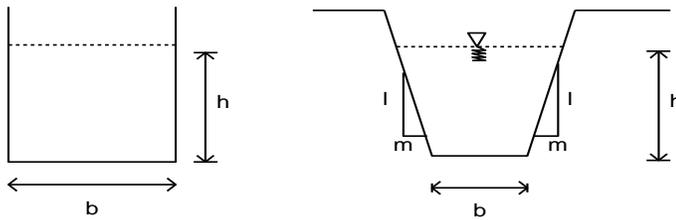
Bentuk penampang saluran terbuka memiliki berbagai macam sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2. Berbagai macam bentuk saluran terbuka (a)Trapesium, (b)Persegi, (c)Segitiga, (d)Setengah lingkaran, (e)Tak beraturan

3. Geometri saluran

Geometri (penampang) saluran, (*channel section*) adalah tegak lurus terhadap arah aliran sedangkan penampang vertikal saluran (*vertical channel section*) adalah suatu penampang melalui titik terbawah atau terendah dari penampang saluran Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Geometri penampang persegi dan trapesium

Luas (A) = $b \times h$

Keliling basah $P = b + 2h$

Jari-jari hidraulik $R = \frac{bh}{b + 2h}$

dngan b = lebar dasar saluran dan h = tinggi kedalaman air

4. Rumus Chezy

Zat cair yang mengalir melalui saluran terbuka akan menimbulkan tegangan geser (tahanan) pada dinding saluran. Tahanan ini akan diimbangi oleh komponen gaya berat yang bekerja pada zat cair dalam arah aliran. Pada aliran seragam, kompoen gaya berat dalam arah aliran adalah seimbang dengan tahanan geser, dimana harus dipengaruhi oleh kecepatan aliran.

Penurunan rumus Chezy dapat dilihat pada Gambar 2.4, diturunkan secara matematis dengan anggapan berikut :

- a. Gaya yang menahan aliran tiap satuan luas dasar saluran adalah sebanding dengan kuadrat kecepatan dalam bentuk :

$$\tau_0 = k \cdot V^2 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

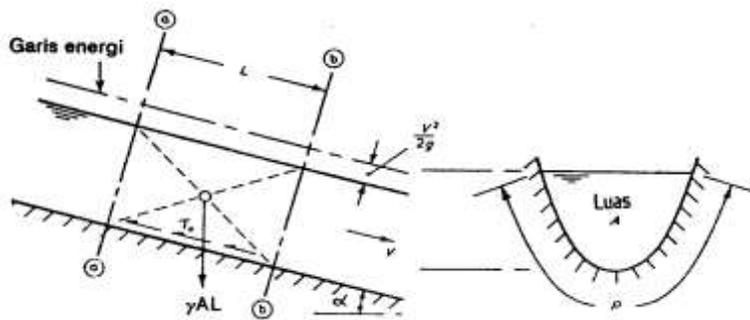
dengan k adalah konstanta. Bidang singgung (kontak) antara aliran dengan dasar saluran adalah sama dengan perkalian antara keliling basah (P) dan panjang saluran (L) yang ditinjau, maka gaya total yang menahan aliran adalah :

$$\text{Gaya tahan} = \tau_0 P \cdot L \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

- b. Pada aliran mantap, komponen gaya berat (searah aliran) mengakibatkan aliran harus sama dengan gaya tahan total adalah komponen gaya berat = $\gamma A \cdot L \sin \alpha$.

Dengan γ = berat jenis zat cair, A = luas tampang basah, L= panjang saluran, α = sudut kemiringan saluran.

Dalam aliran seragam, komponen efektif gaya berat (Gambar 2.4) sejajar dengan dasar saluran dan sama dengan $\omega AL \sin \theta = \omega ALS$, dengan W adalah kemiringan saluran. Maka $\omega ALS = KV^2 PL$, dengan $A/P = R$ dan $\sqrt{\omega/k}$



Gambar 2.4. Penurunan rumus Chezy

disebut menjadi suatu faktor C, kemudian persamaan di atas digabung ke rumus Chezy, maka :

$$V = \sqrt{\left(\frac{\omega}{K}\right)\left(\frac{A}{P}\right)S} \quad ; \quad C\sqrt{RS} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

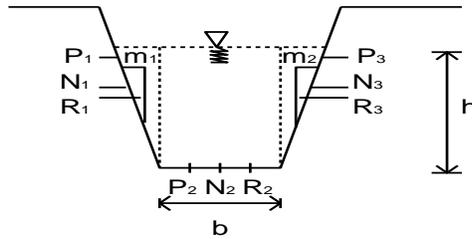
5. Rumus Manning

Rumus Manning pada pengaliran di saluran terbuka dan untuk saluran tertutup (pipa), dapat dirumuskan dalam bentuk :

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan V = kecepatan , R = jari-jari hidraulik, n = koefisien kekasaran Manning , dan I = kemiringan dasar saluran

Koefisien Manning untuk talud dan dasar yang berbeda dapat ditentukan sebagai berikut :



Gambar 2.5. Koefisien Manning

Maka :

$$nc_1 = \frac{PR^{5/2}}{\frac{P_1 R_1^{5/2}}{n_1} + \frac{P_2 R_2^{5/2}}{n_2} + \frac{P_n R_n^{5/2}}{n_n}} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan n = koefisien kekasaran Manning , P = keliling basah , dan R = jari-jari Hidraulik

Tabel 2.1. Harga Koefisien Manning

No	Permukaan	Harga n yang disarankan
1	Kaca, plastik, kuningan	0,010
2	Kayu	0,011 – 0,014
3	Besi tuang	0,013
4	Plesteran semen	0,011
5	Pipa pembuangan	0,013
6	Beton	0,01-0,017
7	Pasangan batu	0,017-0,040
8	Batu pecah	0,035-0,040
9	Batu bata	0,014
10	Bata dilapisi mortar	0,015

6. Klasifikasi kurva permukaan aliran

Persamaan untuk menentukan berbagai bentuk profil muka air banyak dijumpai dalam aliran tak seragam. Di dalam persamaan tersebut pembilang dan penyebut yang ada pada ruas kanan dipengaruhi oleh karakteristik saluran dan debit aliran. Untuk menyederhanakan analisis maka ditinjau pada suatu saluran yang lebar dan dangkal berbentuk segiempat, dengan debit saluran konstan.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I_0 \left(1 - \frac{I_f}{I_0} \right)}{1 - \frac{Q^2 \cdot T}{g \cdot A^3}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Berdasarkan rumus Manning kemiringan garis energi untuk saluran lebar dan dangkal adalah :

$$I_f = \frac{n^2 \cdot V^2}{y^{4/3}} = \frac{n^2 \cdot Q^2}{B^2 \cdot y_n^{10/3}} \dots\dots\dots (2.10)$$

Untuk aliran seragam dimana $I_f = I_0$ dan kedalaman aliran adalah Y_n (kedalaman normal) maka :

$$I_0 = \frac{n^2 \cdot V^2}{y_n^{4/3}} = \frac{n^2 \cdot Q^2}{B^2 \cdot y_n^{10/3}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan menggabungkan Persamaan (2.10) dan (2.11), maka persamaan baru dapat ditulis dalam bentuk :

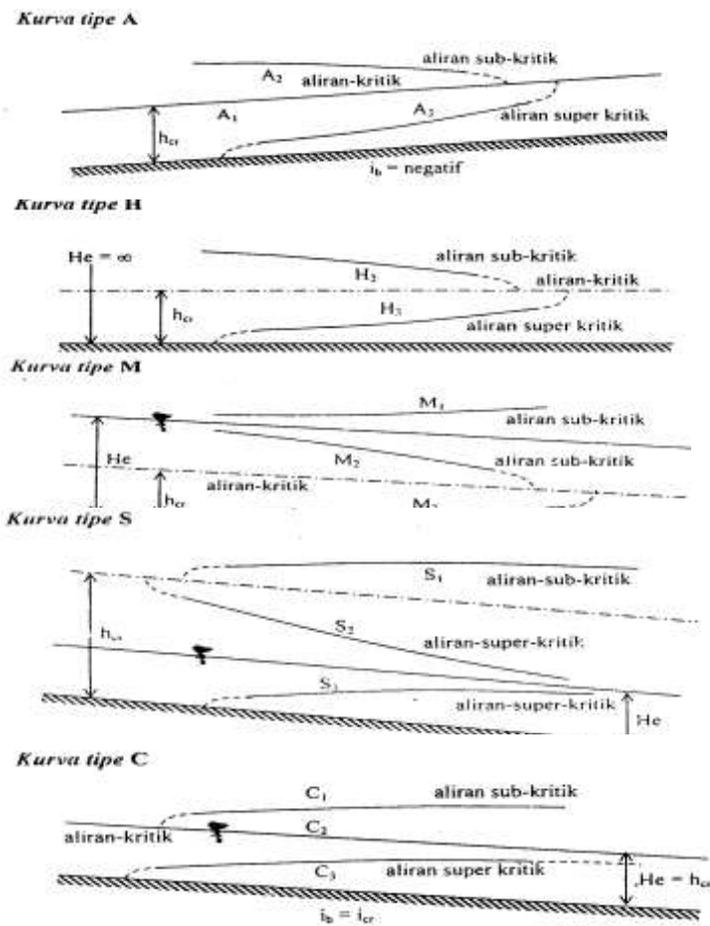
$$\frac{dy}{dx} = I_0 \frac{1 - (y_n/y)^{10/3}}{1 - (y_c/y)^3} \dots\dots\dots (2.12)$$

Profil muka air akan berubah tergantung pada I_0 dan $Y_{n/y}$, $Y_{c/y}$ lebih besar atau lebih kecil dari satu. Kemiringan dasar saluran dapat negatif dan positif. Kemiringan negatif disebut kemiringan balik yang diberi simbol A (*adverse slope*), apabila elevasi dasar saluran bertambah dalam arah aliran. Kemiringan dasar nol, apabila dasar saluran horizontal diberi simbol H. kemiringan positif dapat dibedakan menjadi lantai (*mild*), kritik (*critical*) dan curam (*sleep*) yang disimbolkan M, C dan S.

Aliran disebut mengalir apabila $y_n > y_c$, kritik jika $y_n = y_c$, dan curam apabila $y_n < y_c$ (Gambar 2.6). beberapa jenis tipe profil muka air adalah :

- a. Kurva M (*mild*)
 - Kurva M terjadi apabila $I_0 < I_c$ dan $y_n > y_c$ tipe kurva M dibagi menjadi:
 1. Profil M_1 , apabila $y > y_n > y_c$, misalnya terjadi pada suatu bangunan air bendung, penyempitan belokan pada sungai sebagai terjadi

- pembendungan pada daerah sebelah hulu. Kurva M_1 mempunyai asimtot dengan kedalaman normal di sebelah hulu dan asimtot dengan garis horizontal di sebelah hilir.
2. Profil M_2 , apabila $y_c > y > y_c$, tipe ini terjadi pada saluran landai dengan ujung hilirnya adalah saluran anam, pelebaran atau terjunan.
 3. Profil M_3 , apabila $y_n > y_c > y$, tipe ini terjadi apabila air mengalir dari saluran curam menuju saluran landai, yaitu bagian hulu dari loncat air. Disimpulkan bahwa untuk profil M_2 dan M_3 adalah sangat pendek dibandingkan dengan profil M_1 .
- b. Kurva S (*steep*)
 Kurva S terjadi apabila $I_0 > I_c$ dan $y_n < y_c$, tipe kurva S dibagi menjadi :
1. Profil S_1 , yaitu $y > y_c > y_n$, tipe ini terjadi apabila sebelah hulu bangunan (bendung) yang berada di saluran anam, dimana di sebelah hulunya terdapat loncat air.
 2. Profil S_2 , apabila $y > y > y_n$, tipe ini terjadi apabila, adanya perubahan aliran dari saluran landai masuk ke saluran anam, profil S_2 ini sangat pendek.
 3. Profil S_3 , apabila $y_c > y_n > y$, tipe ini terjadi apabila terdapat di sebelah hilir dari pintu air yang berada di saluran anam ke saluran kurang curam. Profil ini merupakan transisi antara profil M dan S.
- c. Kurva C (*critical*)
 Profil ini terjadi apabila $I_0 < I_c$ dan $y_n > y_c$, karena garis kedalaman normal dan kritis, maka hanya ada dua profil C_1 dan C_3 yang memiliki asimtot terhadap garis horizontal di sebelah hilir.
- d. Kurva H (*horizontal*)
 Profil H terjadi apabila $I_0 = 0$ dan $y_n = \infty$ sehingga ada dua profil H_2 dan H_3 sama dengan profil M_2 dan M_3 .
- e. Kurva A (*adverse*)
 Profil A terjadi apabila $I_0 < 0$, karena nilai y_n tidak nyata, maka ada dua profil A_2 dan A_3 sama dengan profil H_2 dan H_3 .

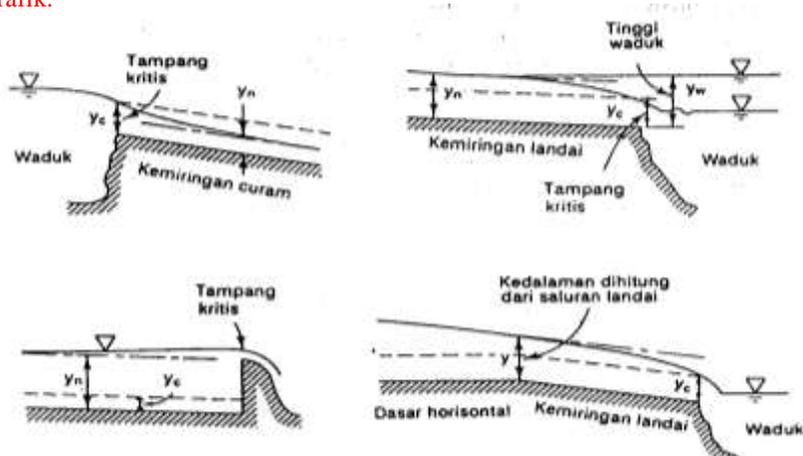


Gambar 2.6. Beberapa bentuk kurva permukaan aliran

B. Profil muka air

Kedalaman aliran di sepanjang saluran dapat dihitung dengan menyelesaikan persamaan difrensial untuk aliran berubah beraturan. Hitungan biasanya dimulai dari satu tampang dimana hubungan antara elevasi muka air (kedalaman) dan debit diketahui. Tampang tersebut dikenal dengan tampang (titik) kontrol seperti pada (Gambar 2.7.).

Hitungan profil muka air biasanya dilakukan secara bertahap dari satu tampang berikutnya yang berjarak cukup kecil sehingga permukaan air diantara kedua tampang dapat di dekati dengan garis lurus. Apabila aliran adalah subkritis hitungan dimulai dari titik paling hilir dan menuju ke arah hulu. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan aliran berubah beraturan adalah metode integrasi numerik, metode langkah langsung dan metode grafik.



Gambar 2.7. Hitungan profil muka air

C. Aliran Berubah Beraturan

Aliran berubah beraturan (*spatially varied flow*) atau lambat laun (*gradually*) memiliki debit seragam akibat pertambahan ataupun pengurangan air di sepanjang saluran. Pertambahan maupun pengurangan air ini akan menyebabkan gangguan pada energi atau kadar momentum (*momentum content*) aliran. Maka sifat-sifat hidrolis aliran berubah beraturan akan lebih rumit dibandingkan dengan aliran yang debitnya tetap. Sifat-sifat hidrolis aliran berubah beraturan yang debitnya bertambah besar dalam hal-hal tertentu berbeda dengan aliran yang sama namun debitnya berkurang. Adapun jenis aliran berubah beraturan ada saluran adalah :

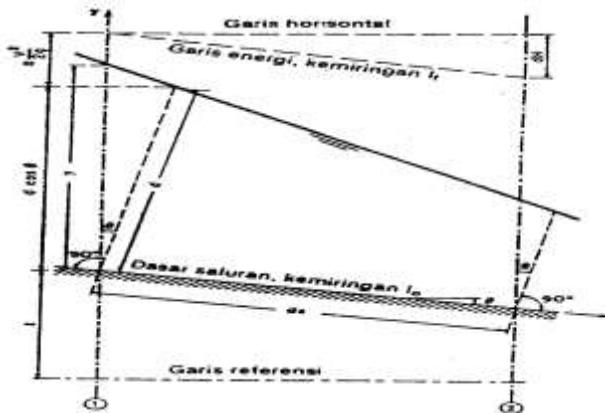
1. Aliran dengan penambahan debit (*flow with increasing discharge*)
Aliran ini terjadi jika campuran turbulensi pertamahan air yang mengalir di sepanjang aliran. Maka kehilangan energi yang besar membuat saluran yang direncanakan untuk aliran berubah beraturan secara hidrolis kurang berfungsi secara tepat.
2. Aliran dengan penurunan debit (*flow with decreasing discharge*)

Pada dasarnya aliran berubah beraturan ini dapat dianggap sebagai aliran terbagi yaitu : air yang terbagi tidak mempengaruhi tinggi energi. Jenis aliran ini telah diteliti dan diperiksa secara teori maupun hasil percobaan. Maka penggunaan persamaan energi dapat mempermudah dalam menyelesaikan masalah ini.

Langkah-langkah untuk menurunkan persamaan aliran berubah beraturan adalah :

1. Aliran bergerak dalam satu arah, adanya arus melintang yang cukup deras berbentuk aliran melingkar, khususnya pada saluran pelimpah. Akibat efek arus dan turbulensi yang ditimbulkan tidak dapat diuraikan, untuk mengatasi hal tersebut dapat menggunakan prinsip momentum. Permukaan air dalam arah lateral yang tidak menentu akibat adanya arus melintang dapat diabaikan.
2. Pembagian kecepatan pada penampang melintang selalu tetap dan seragam yaitu : koefisien pembagian kecepatan diambil = 1. Tetapi jika diperlukan nilai koefisien yang tepat dapat diterapkan.
3. Tekanan pada aliran bersifat hidrostatis, terjadi akibat aliran sejajar. Akan tetapi pada bagian pengeluaran aliran akan melengkung dan cukup menyimpang dari berbagai anggapan. Nilai koefisien pembagian tekanan yang tepat dapat diterapkan bila diperlukan.
4. Kemiringan saluran relatif kecil sehingga efeknya terhadap tinggi tekanan dan gaya pada penampang saluran sangat kecil. Bila kemiringan cukup besar, dapat dilakukan koreksi terhadap efek saluran.
5. Rumus Manning dapat digunakan untuk menghitung kehilangan energi akibat gesekan dan gaya geser yang terjadi di sepanjang dinding saluran.
6. Efek udara yang masuk dapat diabaikan. Akan tetapi dapat juga dilakukan koreksi terhadap hasil perhitungan apabila diperlukan.

Aliran berubah beraturan (*gradually varied flow*), merupakan aliran yang berubah secara bervariasi terhadap kecepatan yang berubah secara sedikit demi sedikit (*gradually*) dari satu potongan ke potongan yang lain. Serat aliran pada dasarnya sejajar dan tekanan hidrostatik dapat ditentukan, kecepatan dan tampang basah yang berubah secara progresif dari suatu tampang ke tampang yang lain. Kecepatan aliran di sepanjang saluran dapat dipercepat atau diperlambat, sesuai dengan kondisi saluran.



Gambar 2.8. Ketentuan persamaan aliran berubah beraturan

Sifat penting dari aliran berubah beraturan adalah perbedaan kedalaman di sepanjang saluran bervariasi secara gradual, sehingga lengkung garis aliran dapat diabaikan. Maka distribusi tekanan vertikalnya dapat ditentukan menjadi hidrostatis. Pada aliran berubah beraturan dianggap tidak mempunyai komponen kecepatan dalam arah vertikal sehingga energi kinetik persatuan berat dapat dinyatakan dengan $V^2/2g$. Dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Pada umumnya yang diterapkan pada tipe aliran ini adalah kehilangan tinggi tenaga pada setiap potongan melintang aliran. Ada dua tipe kurva permukaan air pada aliran ini, yaitu :

- Kurva *backwater*, jika kedalaman aliran bertambah besar pada arah aliran ($dy/dx > 0$)
- Kurva *dawdown*, jika kedalaman aliran bertambah kecil pada arah aliran ($dy/dx < 0$)

Kurva *backwater* akan timbul bila ada hambatan aliran oleh pembendungan, sedang kurva *drawdown* akan timbul jika ada terjunan. Jenis aliran yang dihasilkan oleh aliran berubah beraturan merupakan aliran air bebas. Persamaan aliran pada aliran berubah beraturan dapat diturunkan berdasarkan persamaan Bernoulli, untuk aliran pada titik 1 dan 2, seperti terdapat pada Gambar 2.8 dirumuskan sebagai berikut :

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Elemen di sepanjang saluran dx dibatasi oleh tampang 1 dan 2 yang berbentuk persegi dengan kemiringan konstan, maka aliran tersebut akan menjadi

berubah secara beraturan, sehingga tekanan total terhadap garis referensi pada tampang adalah :

$$H = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan H = tinggi tekanan total, Z = jarak vertikal dasar saluran terhadap garis referensi, d = kedalaman aliran hitung terhadap garis tegak lurus dasar, θ = sudut kemiringan dasar saluran, α = koefisien energi, dan V = kecepatan aliran rerata pada tampang.

Koefisien α biasanya mempunyai nilai 1.05 dan 1.40 yang dihitung berdasarkan distribusi vertikal dari kecepatan, maka biasanya profil kecepatan dianggap $\alpha = 1$. Untuk pengaliran berubah beraturan, sudut kemiringan dasar saluran biasanya kecil sehingga $d \cos \theta = y$ dengan demikian Persamaan (2.14) dapat ditulis menjadi :

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

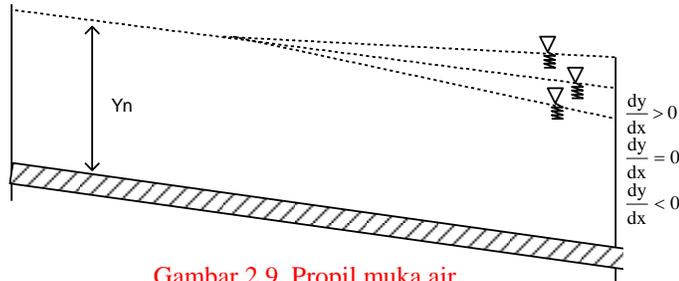
dan diferensiasi persamaan tersebut terhadap x menghasilkan ;

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Kemiringan garis energi di dapat menjadi : $I_f = -dH/dx$, sedangkan untuk dasar saluran adalah $I_o = dz/dx$, maka Persamaan (2.16) disubstitusikan menjadi :

$$\left. \begin{aligned} I_f &= -I_o + \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \\ -I \frac{dy}{dx} &= \frac{I_o - I_f}{1 + \frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} \right)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Persamaan (2.17) adalah pengaliran berubah beraturan pada nilai d/dy ($V^2/2g$) merupakan perubahan tinggi kecepatan.



Gambar 2.9. Propil muka air

Jika $\frac{dy}{dx} = 0 \rightarrow$ muka air sejajar dengan dasar saluran

Jika $\frac{dy}{dx} > 0 \rightarrow$ kedalaman air bertambah searah aliran sepanjang saluran,

Jika $\frac{dy}{dx} < 0 \rightarrow$ kedalaman air berkurang dengan arahnya di sepanjang saluran

D. Metode Integrasi Numerik

Metode integrasi numerik untuk saluran prismatis bertampang persegi merupakan metode analisis pendekatan yang mencakup integrasi pada aliran berubah beraturan.

$$\left. \begin{aligned} \bar{V} &= \frac{1}{n} R^{2/3} I_f^{1/2} \\ Q &= A \frac{1}{n} R^{2/3} I_f^{1/2} \\ I_f &= \frac{n^2 Q^2}{AR^{2/3}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.18)$$

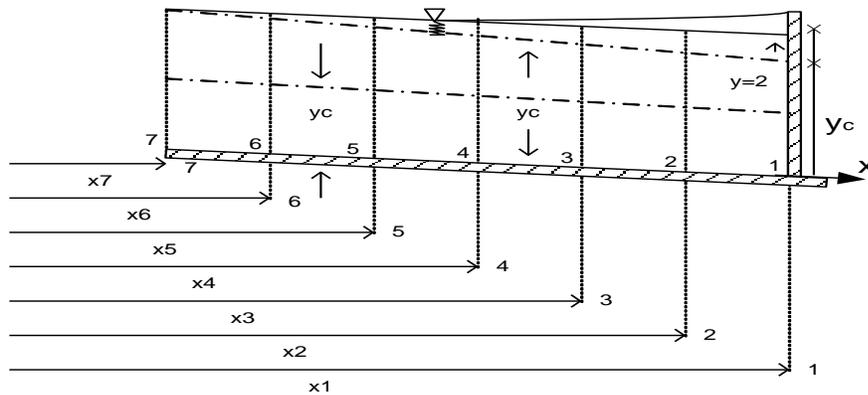
Kombinasi bentuk Persamaan (2.18) memberikan persamaan diferensial non linier berikut :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I_o - \left(\frac{n^2 Q^2}{R^{4/3} A^2} \right)}{1 - \left(\frac{Q^2 T}{g A^3} \right)} \dots\dots\dots (2.19)$$

Penyelesaian secara numerik dilakukan dengan menggunakan persamaan deret Taylor dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Berdasarkan nilai y_i awal yang diketahui, hitung nilai f_i .
2. Pertama kali harus diasumsikan bahwa $f_{i+1} = f_i$
3. Dihitung nilai y_{i+1} dan dengan menggunakan nilai y_{i+1} yang telah diperoleh pada langkah 2.
4. Hitung nilai baru y_{i+1} dengan menggunakan nilai f_{i+1} yang dihitung dari nilai f_{i+1} dari langkah 3.
5. Jika nilai f_{i+1} yang telah diperoleh pada langkah 3 dan 4 menghasilkan perbedaan yang besar, maka langkah 3 dan 4 harus diulangi.
6. Setelah nilai y_{i+1} yang benar diperoleh, dihitung nilai y_{i+2} yang berjarak Δx dan y_{i+1} .
7. Prosedur di atas diulangi lagi sampai diperoleh nilai y di sepanjang saluran.

Metode integrasi numerik dilakukan dengan membagi saluran menjadi sejumlah pias dengan panjang Δx . Mulai dari ujung batas hilir dimana karakteristik hidraulik diampang tersebut diketahui, dihitung kedalaman air pada tampang di sebelah hulu berikutnya, sampai akhirnya didapat kedalaman air pias, semakin kecil Δx , semakin teliti hasilnya yang diperoleh, dapat dilihat pada Gambar 2.11.



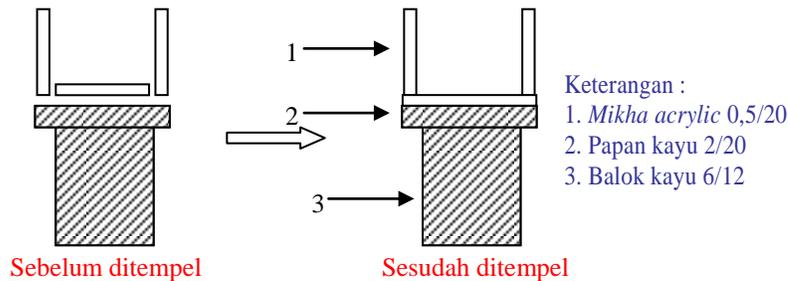
Gambar 2.10. Titik hitungan profil muka air

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Bahan Pembuatan Saluran

Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat saluran adalah papan dan balok kayu bangkirai, *mikha Acrylic*, Plat alumunium berbentuk siku, baut, seng, pipa besi $\varnothing 1\frac{1}{4}$ " dan 1", dongkrak sebagai penyangga saluran yang digunakan untuk meninggikan dan menurunkan dasar saluran sesuai dengan yang dikehendaki, pompa air, pipa peralon $\phi 3$ " , $\phi 1$ " dan selang $\phi 1\frac{1}{4}$ " , bak penampung air, lem *silicone* dan lem PVC, cat kolam, cat minyak dan kuas, amplas, *resin*, paku, dan alat bantu lainnya.

B. Pembuatan Saluran



Gambar 3.2. Bentuk saluran tampang persegi

Papan dan balok kayu bangkirai disatukan dengan cara dilem, setelah kering diperkuat dengan paku. Selanjutnya *mikha acrylic* ditempelkan diatas papan sebagai dasar saluran dan pada sisi kanan dan kiri sebagai dinding saluran yang kemudian diperkuat dengan plat siku alumunium dan dibaut sehingga membentuk saluran bertampang persegi. Seperti pada Gambar 3.2. Saluran yang telah siap digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Saluran

Pemasangan bak kolam air yang terbuat dari seng dibagian hulu dan hilir saluran, kemudian diperkuat dengan penyangga dari besi pada bagian alas bak tersebut. Pemasangan dua buah kaki penyangga dari besi pada bagian bawah balok kayu diposisi hulu dan hilir bentang balok. Pada kaki penyangga bagian hulu dipasang dongkrak dan di bagian hilir akan mengikuti, apabila dongkrak dinaikkan atau diturunkan sesuai dengan kemiringan dasar saluran. Pemasangan pompa air, yang berfungsi untuk mengangkat air dari bak penampungan yang ada di bagian bawah saluran, kemudian dialirkan ke bak kolam hulu sehingga terjadi aliran air dari hulu ke hilir hingga air kembali lagi menuju bak penampungan melalui pipa peralon yang dipasang miring dibawah saluran. Proses aliran ini akan terjadi secara berulang-ulang.

C. Pengukuran Debit Aliran Saluran Terbuka (Q)

Pengukuran debit aliran pada saluran dilakukan dengan cara pengisian air pada *bucket* yang sudah diketahui volumenya yaitu 6,5 liter. Setelah air mengalir melalui saluran akan jatuh ke *bucket*, pada waktu yang bersamaan *stopwatch* dihidupkan, setelah *bucket* penuh *stopwatch* dimatikan. Dari pengukuran ini dapat diketahui lama waktu aliran (t dalam detik). Pengukuran ini dilakukan sebanyak 6 kali untuk mendapatkan waktu aliran rata-rata (t rata-rata). Debit aliran saluran terbuka dapat dirumuskan dengan :

$$Q \text{ aliran} = \frac{\text{Volume takaran air (m}^3\text{)}}{\text{Waktu aliran rata - rata (det ik)}}$$

D. Pengukuran Kemiringan Dasar Saluran (I_0)

Untuk menentukan besarnya kemiringan dasar saluran, maka diambil langkah-langkah sebagai berikut :

- Memberi tanda jarak antara hulu dan hilir saluran sepanjang $L = 3$ m.
- Mengisi slang kecil dengan air sampai permukaan air dikedua slang sama dan dikedua slang tidak ada gelembung udara.
- Mengatur posisi dongkrak yang berada di bagian hulu sehingga saluran dibagian hilir akan mengikuti bagian hulu sesuai dengan kemiringannya.
- Slang yang ada dibagian hulu harus dalam keadaan nol dan dibagian hilir dengan jarak $L = 3$ m, menunjukkan besarnya Δh .

Kemiringan dasar saluran dirumuskan dengan :

$$I_0 = \frac{\Delta h}{L}$$

dengan I_0 = dasar saluran , Δh = tinggi kemiringan saluran (cm), dan L = panjang saluran (m).

E. Pengukuran Koefisien Kekasaran Manning (n)

Untuk memperoleh nilai koefisien kekasaran Manning pada alat peraga, terlebih dahulu menetapkan kemiringan saluran, sehingga dapat diperoleh nilai n rata-rata, dari beberapa kali percobaan. Dari persamaan Manning dapat dirumuskan untuk n adalah :

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} I_0^{\frac{1}{2}}}{V} ; \quad V = \frac{Q}{A}$$

dengan : R = jari-jari hidrolisis, I_0 = kemiringan dasar saluran , dan V = kecepatan rata-rata

F. Pengukuran Profil Permukaan Aliran (garis pembendungan)

Pembendungan pada saluran terbuka memakai kemiringan 0,001, 0,003, dan 0,005. Mengingat aliran adalah sub kritis maka hitungan profil muka air dilakukan dari hilir ke hulu, dengan nomor titik hitungan yang telah ditentukan , kedalaman air di titik 1 telah diketahui, yaitu y_1 , kemudian dihitung kedalaman di titik 2, 3 dan seterusnya yang berjarak $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$. Rumus yang digunakan dalam perhitungan profil muka air adalah :

$$y_{1+1} = y_1 + \frac{f_i + f_{i+1}}{2} (x_{i+1} - x_i) = y_1 + \frac{f_i + f_{i+1}}{2} (-\Delta x_i)$$

$$y_{1+1} = y_1 - \frac{f_i + f_{i+1}}{2} \times \Delta x_i$$

dan

$$f_i = \frac{I_o - \left(\frac{n^2 Q^2}{A^2 T} \right)}{1 - \left(\frac{Q^2 T}{g A^3} \right)_i}$$

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Koefisien Manning (n) Terukur

Perhitungan koefisien Manning terukur dilakukan empat kali peragaan sesuai dengan kemiringan dasar saluran dan kedalaman air yang berbeda. Untuk mencari waktu aliran air digunakan ember berkapasitas 6,5 liter serta alat bantu *stopwath*. Dalam peragaan dilakukan enam kali secara berulang-ulang sehingga waktu aliran rata-rata dapat dicari. Rumus koefisien Manning terukur adalah :

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} I_o^{\frac{1}{2}}}{V}$$

dengan R = jari-jari hidrolis, V = kecepatan rata-rata, dan I_o = kemiringan dasar saluran.

Sesuai dengan koefisien Manning (n) terukur, dapat dicari debit aliran (Q), kecepatan (V) dan jari-jari hidraulis (R).

$$Q_{\text{terukur}} = \frac{\text{Volume}}{\text{Waktu rata - rata}} = \frac{0,0065}{6,73} = 9,66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{det}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{9,66 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 0,022} = 0,439 \text{ m / det} \quad ; \quad R = \frac{bh}{b + 2h} = 0,0153$$

Maka koefisien manning terukur dapat diperoleh :

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} I_o^{\frac{1}{2}}}{V} = \frac{(0,0153)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,003)^{\frac{1}{2}}}{0,439} = \frac{4,460 \cdot 10^{-3}}{0,439} = 0,010$$

Tabel 4.1. Koefisien Manning (n) terukur

Kemiringan	Kedalaman air	Waktu aliran	Koefisien manning
------------	---------------	--------------	-------------------

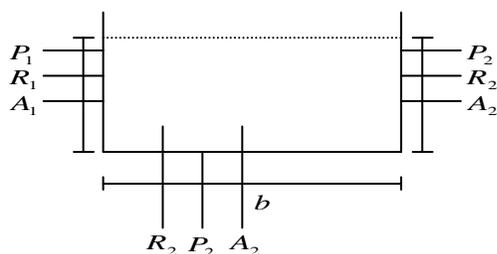
saluran I_0 (m)	normal (m)	rata-rata (detik)	(n)
0,001	0,024	6,048	0,099
0,003	0,022	6,730	0,010
0,005	0,020	6,620	0,011

Koefisien Manning rata-rata adalah :

$$n = \frac{nr_1 + nr_2 + nr_3}{3} = \frac{0,099 + 0,010 + 0,011}{3} = 0,040$$

B. Koefisien Manning (n) teori

Perhitungan koefisien Manning (n) teori dilakukan empat kali percobaan sesuai dengan kedalaman air yang berbeda. Untuk tiap percobaan dapat dihitung Manning (n) rata-rata pada setiap kemiringan. Koefisien Manning (n) teori dihitung berdasarkan bentuk saluran, maka rumus yang digunakan berbentuk persegi. Penyelesaian hitungan bentuk persegi dapat dilihat pada Tabel 5.2.



Gambar 4.1. Saluran terbuka bentuk persegi

Tabel 4.2. Perhitunganampang persegi

A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3	$A=b.h$	$P=2h+b$	$R=A/P$
0	0,076	0	0,098	0,1	0,038	0	0,38	0	0,0038	0,176	0,0215

Dari hasil perhitungan bentuk persegi, maka diperoleh hasil perhitungan koefisien Manning (n) teori seperti terdapat pada tabel 5.3.

Tabel 4.3. Koefisien Manning (n) teori

Kemiringan saluran I_0 (m)	Kedalaman air normal (m)	Koefisien Manning teori (n)
0,001	0,029	$4,997.10^{-3}$
0,003	0,023	$1,776.10^{-3}$
0,005	0,015	$1,457.10^{-3}$

C. Perhitungan Debit Aliran Saluran Terbuka

Perhitungan debit aliran dilakukan sesuai dengan kemiringan saluran yaitu pada kemiringan 0.001, 0.003 dan 0.005. Perhitungan debit aliran dihitung berdasarkan rumus $Q = A \times V$, di mana Q terukur merupakan perbandingan volume dan waktu. Nilai kekasaran saluran diambil $n = 0,04$. Pada percobaan ini dilakukan untuk mencari waktu aliran air, dengan menggunakan alat bantu penampungan air berkapasitas 6,5 liter dan alat pengukur waktu *stopwacth*. Dari percobaan diperoleh debit Q terukur dan teoritis pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4. Data kedalaman air dan debit Q terukur

Kemiringan saluran I_0 (m)	Lebar saluran b (m)	Manning (n)	Kedalaman air normal h (m)		Waktu aliran rata-rata t (m^3/dt)
			Hulu	Hilir	
0,001	0,1	0,04	0,035	0,024	$1,074 \cdot 10^{-3}$
0,003	0,1	0,04	0,024	0,022	$9,658 \cdot 10^{-4}$
0,005	0,1	0,04	0,016	0,015	$9,819 \cdot 10^{-4}$

Tabel 4.5. Debit aliran Q teori

Kemiringan saluran I_0 (m)	Lebar saluran b (m)	Tinggi air rata-rata h (m)	$A = b \times h$ (m^2)	$P = b + 2h$	$R = A/P$	$V = \frac{(1/n) \times R^{2/3} \times I^{1/2}}$	$Q = A \times V$ (m^3/dt)	Q terukur (l/dt)
0,001	0,1	0,024	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,148	0,016	0,066	$1,584 \cdot 10^{-4}$	0,1584
0,003	0,1	0,022	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,144	0,015	0,110	$2,420 \cdot 10^{-4}$	0,2420
0,005	0,1	0,020	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,140	0,014	0,136	$2,720 \cdot 10^{-4}$	0,2720

D. Perhitungan Kedalaman Air Normal (y_n) dan Kritis (y_c) Pada Saluran

Pembendungan pada saluran dilakukan pada ketinggian 5 cm dan 10 cm. Pada masing-masing bendung dihitung debit aliran, kecepatan aliran dan beda tinggi aliran pada tiap-tiap jarak yang ditentukan. Perhitungan debit aliran akibat bendung dengan kondisi bebas Q terukur digunakan dengan menggunakan perbandingan volume dan waktu aliran. Data hasil pengukuran pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Data pengukuran debit

Kemiringan saluran I_0 (m)	Waktu aliran (dt)	Volume V (m^3)	Q terukur = V/tr (m^3/dt)
0,001	6,10	0,0065	$1,075 \cdot 10^{-3}$
	6,09		
	6,00		
	6,10		
	6,00		
t rata-rata	6,048		
0,003	6,88	0,0065	$9,658 \cdot 10^{-4}$
	6,88		
	6,56		
	6,69		
	6,59		
t rata-rata	6,730		
0,005	6,57	0,0065	$9,819 \cdot 10^{-4}$
	6,66		
	6,63		
	6,67		
	6,59		
t rata-rata	6,620		

Hasil hitungan kedalaman air normal y_n dan kedalaman air kritis y_c menggunakan persamaan Manning untuk kemiringan dasar saluran 0,001, 0,003, dan 0,005 dirangkum dalam Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7. Perhitungan kedalaman air normal (y_n) dan kedalaman air kritis (y_c)

Kemiringan saluran I_0 (m)	Lebar saluran b (m)	Debit terukur Q (m^3/dt)	Aliran subkritis $y_n > y_c$	
			y_n (cm)	y_c (cm)
0,001	0,1	$1,075 \cdot 10^{-3}$	1,8	0,490
0,003	0,1	$9,658 \cdot 10^{-4}$	5,1	2,119
0,005	0,1	$9,819 \cdot 10^{-4}$	3,9	2,142

E. Perhitungan Tinggi Air Akibat Pembendungan dengan Metode Integrasi Numerik

Mengingat aliran adalah subkritis maka perhitungan profil muka air dilakukan dari hilir ke hulu, dengan nomor titik hitung yang telah ditetapkan. Kedalaman air di titik 1 telah diketahui yaitu : $y_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$, kemudian dihitung kedalaman di titik 2, 3, 4 dan seterusnya yang berjarak $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$. Hasil perhitungan profil muka air pada pembendungan 5 cm pada kemiringan saluran 0,001, 0,003, dan 0,005 dan hasil perhitungan profil muka air pada pembendungan 10 cm untuk kemiringan saluran 0,001, 0,003, dan 0,005 disajikan berturut-turut pada Tabel 4.8 dan 4.9.

Tabel 4.8. Profil muka air pada pembendungan 5 cm

Titik (i)	$x_{i+1} - x_i$ (m)	Jarak Kumulatif	y_i (m)		
			0,001	0,003	0,005
1	0,2	0	0,0845	0,08450	0,0835
2	0,2	20	0,0843	0,08480	0,0825
3	0,2	40	0,0841	0,08420	0,0815
4	0,2	60	0,0839	0,08140	0,0800
5	0,2	80	0,0837	0,08080	0,0790
6	0,2	100	0,0835	0,08020	0,0780
7	0,2	120	0,0833	0,07960	0,0770
8	0,2	140	0,0831	0,07900	0,0760

Tabel 4.9. Profil muka air pada pembendungan 10 cm

Titik (i)	$x_{i+1} - x_i$ (m)	Jarak Kumulatif	y_i (m)		
			0,001	0,003	0,005
1	0,2	0	0,1320	0,1315	0,1350
2	0,2	20	0,1318	0,1304	0,1322
3	0,2	40	0,1316	0,1303	0,1330
4	0,2	60	0,1314	0,1297	0,1320
5	0,2	80	0,1312	0,1291	0,1310

6	0,2	100	0,1310	0,1285	0,1300
7	0,2	120	0,1300	0,1279	0,1200
8	0,2	140	0,1298	0,1273	0,1190

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Debit aliran pada saluran terbuka menunjukkan kedalaman air normal sehingga perbedaan elevasi kemiringan pada saluran dapat terlihat dengan jelas.
2. Peragaan melalui pembendungan setinggi 5 cm dan 10 cm, menunjukkan bahwa pada kemiringan saluran yang berbeda, tinggi muka air di setiap interval terjadi secara beraturan, sehingga grafik kurva permukaan aliran air dan air balik (*backwater surface curve*) terjadi dengan baik.
3. Profil muka air yang terjadi dari hasil peragaan akibat adanya pembendungan termasuk dalam tipe kurva M (*mild*) profil M_1 , karena $y > y_n > y_e$.
4. Analisis metode integrasi numerik dapat digunakan terlihat dari beberapa perbedaan tinggi muka air yang cukup kecil dibandingkan dengan hasil peragaan pada saluran terbuka.

B. Saran

Masih adanya perbedaan antara hasil perhitungan secara numerik dengan perhitungan berdasar pengukuran disebabkan karena kurangnya ketelitian dari alat ukur yang digunakan serta adanya kekurangan-kekurangan yang perlu disempurnakan pada alat saluran yang dibuat, maka disarankan :

1. Peredam energi yang ada di bak kolam hulu sebaiknya diperbesar dan disempurnakan lagi, sehingga dapat terlihat aliran air yang lebih tenang,
2. Perlu adanya alat ukur kecepatan dan debit aliran, sehingga pengukuran lebih teliti.
3. Perlu menggunakan metode-metode lain pada kondisi saluran yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Tri Atmodjo, 1993, *Hidraulika II*, Beta Offset, Yogyakarta.
 Bambang Triatmodjo, 1996, *Metode Numerik*, Beta Offset, Yogyakarta.
 Edy Harseno, 1998, *Diktat Irigasi dan Bangunan Air*, UKRIM, Yogyakarta.
 Henderson, F. M., MacMillan., 1966, *Open Channel Flow*.

- Lalu Makruf, Endang, T., 2001, *Dasar-dasar Analisis Aliran di Sungai dan Muara*, UII, Yogyakarta.
- Raju, K. R., 1981, *Flow Through Open Channels*, McGraw-Hill Limited, New Delhi.
- Ven Te Chow, 1959, *Hidrolika Saluran Terbuka, (terjemahan) Open-Channel I Hydraulics*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1997.
- Ketter, R.L., Prawel, S.P, Jr. 1969, *Moderen Methods of Engineering Computation*, McGraw-Hill.