

BAB III

LANDASAN TEORI

3. 1. Pendahuluan

Aliran air di dalam saluran terbuka mempunyai sifat khusus, bila dibandingkan dengan aliran air di dalam pipa, yaitu antara lain :

- a. aliran air pada saluran terbuka memiliki permukaan bebas (“free surface”),
- b. tekanan air pada permukaan bebas, sama dengan tekanan atmosfer, dan
- c. terjadinya saling tergantung antara jari-jari tampang basah, kekentalan zat cair, kemiringan dasar saluran, kekasaran dasar, dan bervariasi geometrik saluran.

Penyelesaian masalah aliran dalam saluran terbuka lebih sulit bila dibandingkan dengan aliran dalam pipa, karena terjadinya saling tergantung pada sifat kekentalan zat cair, gravitasi, dan kondisi hidrolis saluran (Ven Te Chow, Hidrolika Saluran Terbuka, 1985.).

3. 2. Klasifikasi Aliran

Dalam mengklasifikasi sifat aliran pada saluran terbuka, dengan menggunakan beberapa parameter yang berdasarkan pada perubahan kedalaman aliran dengan mempertimbangkan fungsi waktu dan ruang.

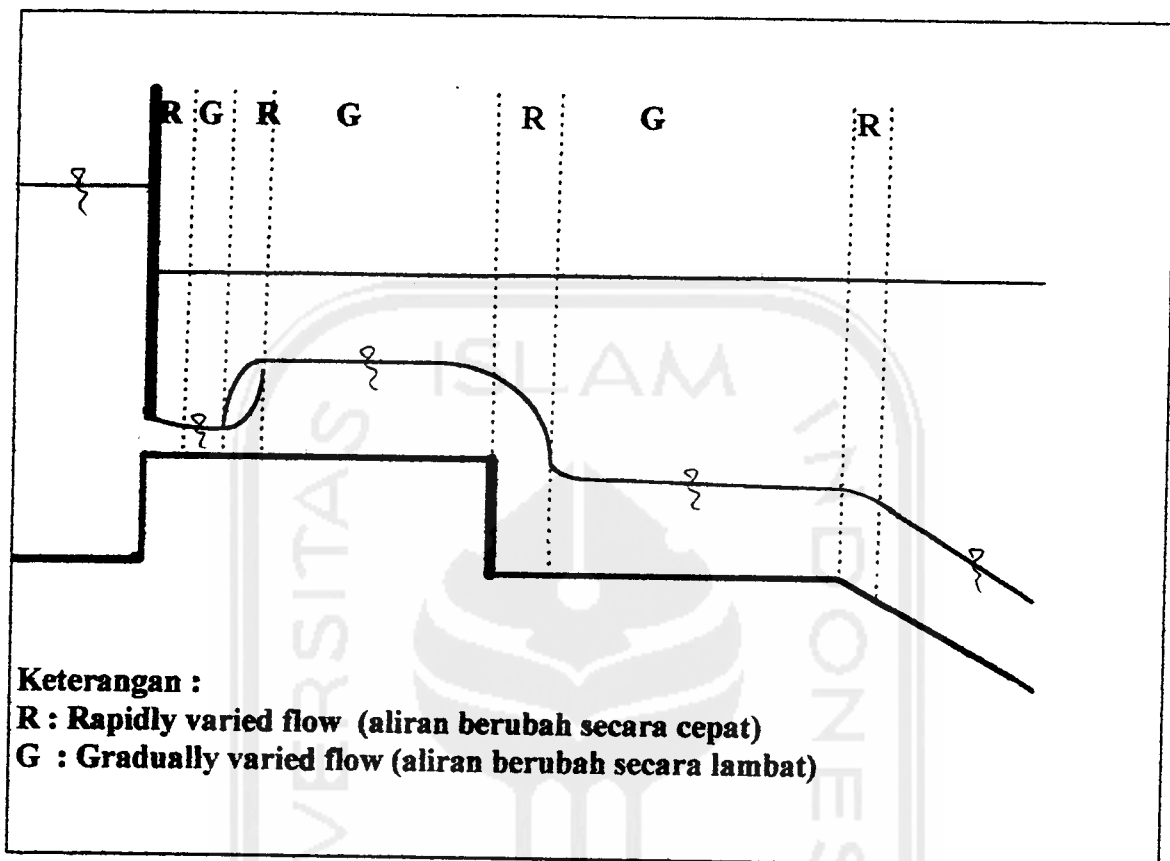
Berdasarkan fungsi waktu, aliran dapat diklasifikasikan sebagai :

- a. aliran permanen (“steady flow”), adalah suatu pengaliran pada suatu titik dalam penampang, besar debit, kecepatan, dan tekanan tidak berubah dengan waktu. ($dQ/dt = 0$, $dv/dt = 0$, $dp/dt = 0$), dan
- b. aliran tidak permanen (“unsteady flow”), adalah suatu pengaliran disuatu titik dalam penampang, besar debit, kecepatan, dan tekanan berubah dengan waktu. ($dQ/dt \neq 0$, $dv/dt \neq 0$, $dp/dt \neq 0$). Misalnya aliran pada gelombang banjir.

Berdasarkan fungsi ruang, aliran dapat dibedakan sebagai :

- a. aliran seragam (“uniform flow”) apabila kedalaman aliran disetiap tampang saluran adalah sama, dan
- b. aliran tidak seragam (“ununiform flow”) apabila kedalaman aliran berubah sepanjang saluran. Aliran ini dapat berupa :
 1. “gradually varied flow” apabila aliran berubah secara lambat pada jarak yang relatif panjang.
 2. “rapidly varied flow” apabila kedalaman aliran berubah secara cepat pada jarak yang relatif pendek.

Untuk lebih jelasnya, dapat di lihat pada gambar (3. 1.). yang menerangkan klasifikasi aliran.



Gambar 3. 1. Klasifikasi Aliran

3. 3. Kondisi Aliran

Kondisi aliran ditentukan oleh kekentalan kinematik dan gaya inersianya. Aliran disebut laminer bila pengaruh kekentalan kinematiknya lebih besar dari gaya inersianya. Aliran disebut turbulen jika pengaruh gaya inersianya lebih besar dari pada kekentalan kinematik zat cair tersebut. Pada aliran laminer partikel akan bergerak mengikuti pola aliran yang halus berupa garis aliran yang sejajar. Pada aliran turbulen, partikel air bergerak mengikuti pola aliran yang tidak menentu.

Untuk menentukan kondisi suatu aliran termasuk aliran laminer atau turbulen, maka digunakan interval kesamaan yang disebut bilangan Reynold ("Reynold number")

$$\text{Re} = \frac{V \cdot R}{\nu} \quad (3.1.)$$

dengan Re : bilangan Reynold

V : kecepatan aliran (m/s)

L : panjang karakteristik (m)

pada saluran muka air babas $L = R$

R : jari-jari hidrolis saluran

ν : kekentalan kinematika (m²/s)

Untuk menentukan kondisi aliran kritis, super kritis, sub kritis digunakan interval kesamaan yang disebut bilangan Froude yang di definisikan sebagai :

$$\text{Fr} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3.2.)$$

dengan Fr : bilangan Froude

V : kecepatan rata-rata aliran (m/s)

g : gaya gravitasi

h : kedalam hidrolis.

Pada $\text{Fr} = 1$, maka aliran dinyatakan sebagai aliran kritis, sedangkan apabila $\text{Fr} < 1$, maka kondisi aliran disebut aliran sub kritis, dan disebut super kritis apabila

$Fr > 1$. Pada aliran sub kritis, kecepatan aliran lebih kecil dari pada kecepatan gelombang elementer, pada aliran ini disebut sebagai aliran mengalir. Sedang pada aliran super kritis, alirannya mempunyai kecepatan lebih besar dibanding dengan kecepatan rambatan gelombang elementer ($v = \sqrt{g \cdot h}$). (Budi Wignyosukanto, Hidrolika Saluran Terbuka, 1991.).

3. 4. Persamaan Dasar Aliran

Ada tiga persamaan dasar aliran yang harus dipatuhi dalam menyelesaikan permasalahan hidrolika, khususnya hidraulika saluran terbuka yakni :

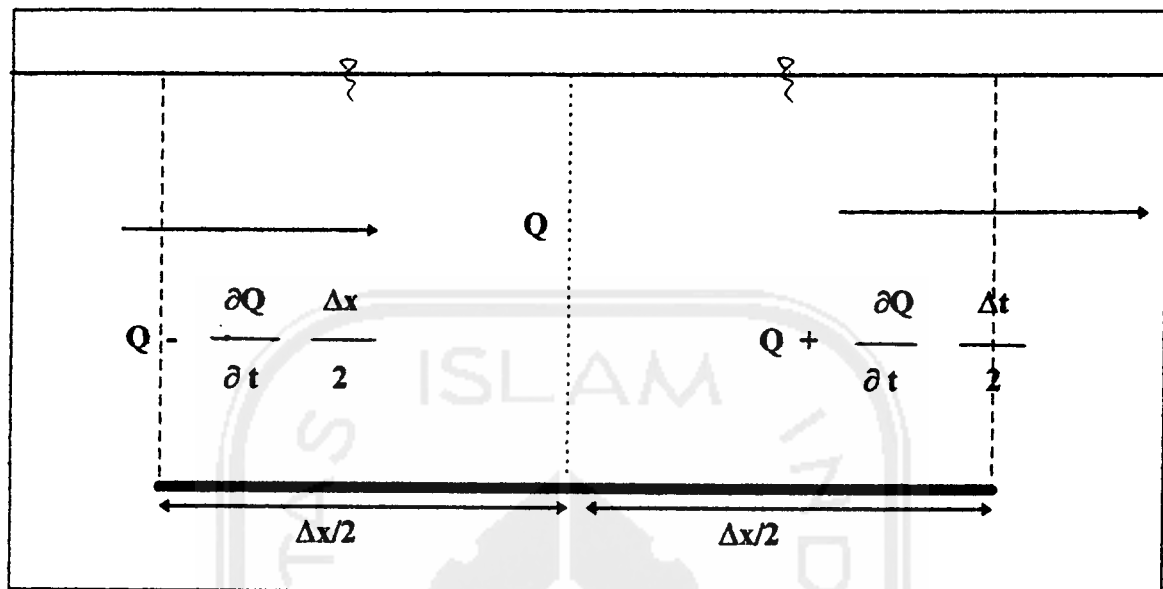
1. hukum Persamaan Kontinuitas
2. hukum Persamaan Energi
3. hukum Persamaan Momentum

2. 4. 1. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas didasarkan pada hukum konservasi masa. Untuk aliran permanen menyatakan bahwa debit di sepanjang saluran adalah tetap. Jika terdapat sistem aliran maka volume yang masuk sistem aliran sebanding dengan perubahan volume aliran.

Ditunjukkan pada gambar (3. 2.), maka dapat diturunkan persamaan kontinuitas sebagai berikut:

$$\left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial X} \cdot \frac{\Delta X}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial X} \cdot \frac{\Delta X}{2} \right) \right] \cdot \Delta t = - \frac{\partial Q}{\partial X} \cdot \Delta X \cdot \Delta t$$



Gambar 3. 2. Sistem aliran

$$-\frac{\partial Q}{\partial X} \Delta X \cdot \Delta t = \frac{\partial A}{\partial t} \Delta X \cdot \Delta t$$

karena luas tampang aliran tetap, tidak berubah dengan waktu maka

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

sehingga

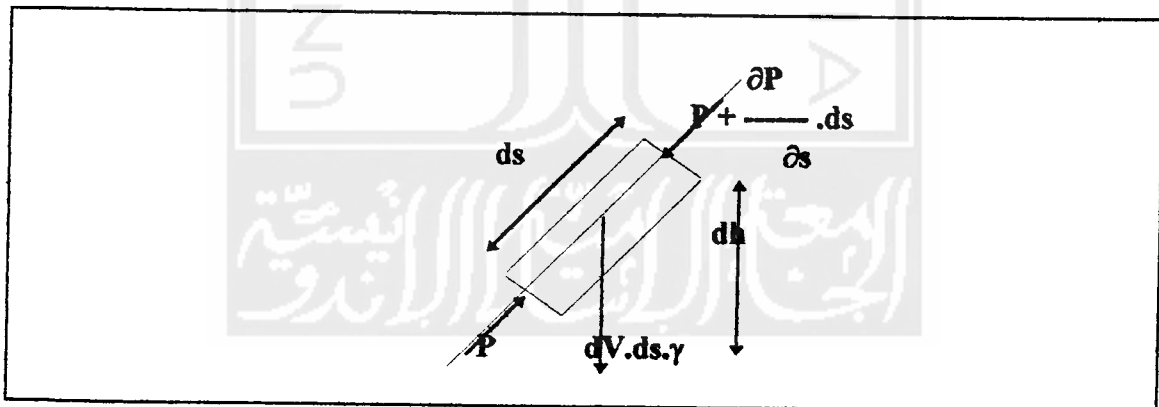
$$Q = A \cdot V = \text{konstan};$$

atau

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (3.3.)$$

3. 4. 2. Persamaan Energi

Persamaan energi didasarkan pada hukum konservasi energi, yang menyatakan bahwa tinggi energi aliran yang masuk sistem dan tinggi energi aliran yang keluar melalui sistem selalu tetap. Gaya-gaya yang bekerja pada sebuah partikel zat cair riil yang bergerak terdiri dari gaya berat (w), gaya gesek (μ) akibat adanya kekentalan (η) zat cair dan gaya-gaya luar. Namun mengingat bahwa zat cair yang mengalir diasumsikan zat cair ideal. Dengan demikian sifat zat cair yang bergerak secara permanen hanya dikenai gaya berat dan tekanan hidrostatis. Di pandang sebuah partikel air sepanjang ds , luas tampang dA , pada sebuah garis aliran, seperti pada gambar (3.3.).



Gambar 3. 3. Garis aliran

Volume partikel tersebut $dV = dA \cdot ds$ sedangkan berat $dV \cdot \gamma = dA \cdot ds \cdot \gamma$

Menurut hukum Newton II , jumlah gaya-gaya yang bekerja pada sebuah benda adalah sama dengan masa benda tersebut dikalikan percepatan benda tersebut, yang ditunjukkan pada gambar (3. 3.)

$$\Sigma F = m. a \quad (3. 4.)$$

$$P. dA - (P + \frac{\partial P}{\partial s} . ds).dA. ds. \gamma. \text{Cos } \alpha$$

$$= \frac{dA. ds. \gamma}{g} . a$$

$$- \frac{\partial P}{\partial s} . ds. dA - dA. ds. \gamma . \text{cos } \alpha = \frac{dA. ds. \gamma}{g} . a$$

Jika masing-masing komponen persamaan diatas dibagi dengan $\gamma. dA. ds.$ maka akan diperoleh :

$$\frac{1}{\gamma} . \frac{\partial P}{\partial s} + \text{cos } \alpha - \frac{a}{g} = 0$$

$$\text{Karena } a = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial s} . \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{V}{\partial s} . V$$

$$\cos \alpha = \frac{\partial h}{\partial s} \text{ maka persamaan menjadi}$$

$$\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial P}{\partial s} + \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial s} \cdot \frac{\partial V}{g} = 0$$

$$\frac{\partial P/\gamma + \partial h + \partial V \cdot V}{\partial s} = 0$$

maka

$$h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_2$$

(3.5.)

dengan V : kecepatan aliran

P : tekanan atmosfer

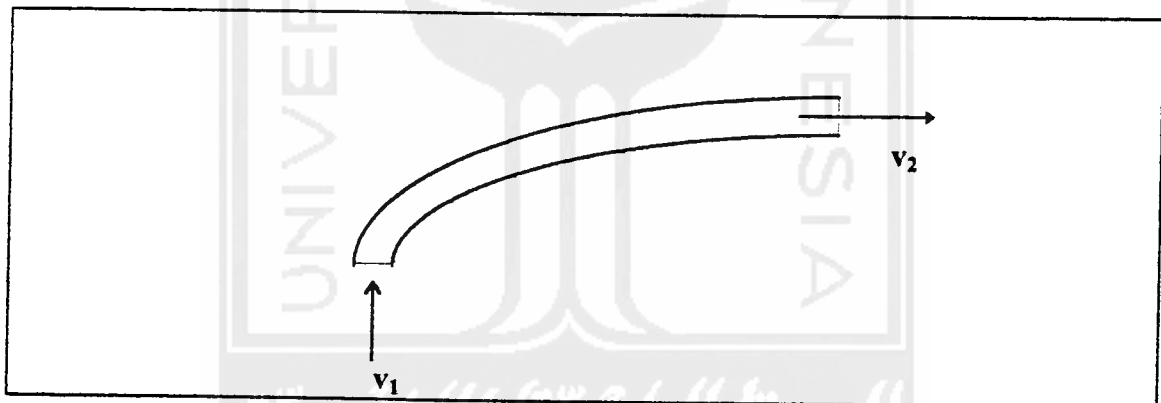
γ : berat jenis zat cair

g : percepatan gravitasi

3. 4. 3. Persamaan Momentum

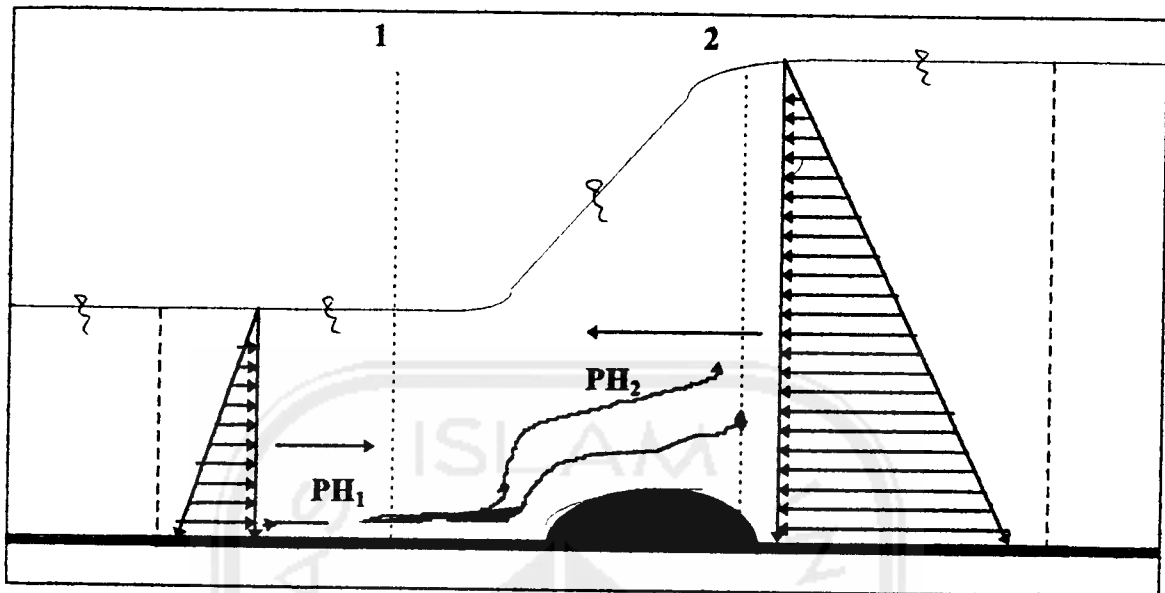
Prinsip Hukum konservasi momentum adalah pada aliran zat cair menyatakan bahwa, untuk setiap arah tertentu, komponen resultan gaya yang bekerja pada zat cair sama dengan komponen momentum. Persatuan waktu yang meninggalkan sistem aliran dikurangi dengan komponen momentum persatuan waktu yang masuk sistem tersebut, dan dinyatakan dalam persamaan :

$$\Sigma P = \rho \cdot Q \cdot V_2 - \rho \cdot Q \cdot V_1 \quad (3. 6.)$$



Gambar 3. 4. Pipa aliran

Kemudian penerapan prinsip momentum pada saluran terbuka dijelaskan dengan memperhatikan sebuah saluran pendek mendatar, seperti ditunjukkan gambar (3. 5.).



Gambar 3. 5. Gaya-gaya pada aliran

Perbedaan tinggi muka air antara tampang satu dan dua disebabkan oleh sebuah penghalang pada dasar saluran yang menimbulkan gaya P pada aliran. Karena aliran permanen, maka prinsip persamaan momentum aliran pada tampang satu dan dua adalah sebagai berikut :

$$PH_1 - PH_2 - P = \rho \cdot Q \cdot (V_2 - V_1)$$

dengan PH_1 dan PH_2 adalah tekanan hidraustatik tampang 1 dan 2, untuk saluran persegi besarnya adalah :

$$PH_1 = 1/2 \cdot \gamma \cdot B \cdot h_1^2 \text{ dan } PH_2 = 1/2 \cdot \gamma \cdot B \cdot h_2^2$$

dengan h_1, h_2 adalah aliran tampang satu dan dua diperoleh :

$$B \cdot h_1^2 - 1/2 \cdot \gamma \cdot B \cdot h_2^2 - P = \gamma / g \cdot [Q \cdot (V_2 - V_1)]$$

jika dibagi dengan γ , maka diperoleh :

$$\frac{P}{\gamma} = \left\{ 1/2 \cdot B \cdot h_1^2 + \frac{Q \cdot V_1}{g} \right\} - \left\{ 1/2 \cdot B \cdot h_2^2 + \frac{Q \cdot V_2}{g} \right\}$$

$$\frac{P}{\gamma} = \left\{ 1/2 \cdot B \cdot h_1^2 + \frac{Q^2}{A_1 \cdot g} \right\} - \left\{ 1/2 \cdot B \cdot h_2^2 + \frac{Q^2}{A_2 \cdot g} \right\}$$

3. 5. Fenomena Lokal

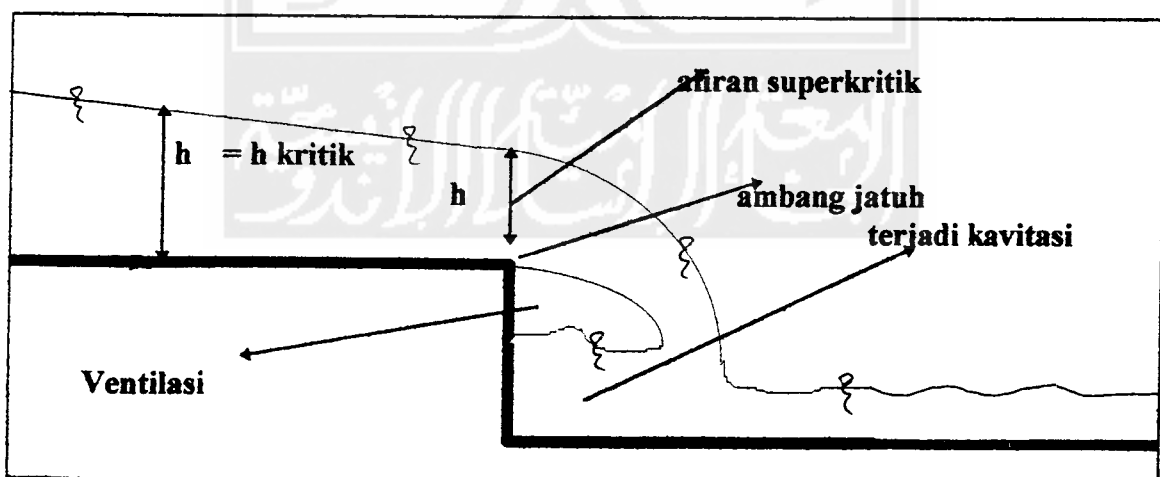
Perubahan kondisi aliran dari sub kritik ke super kritik atau sebaliknya sering terjadi dalam aliran saluran terbuka. Perubahan tersebut dinyatakan dalam perubahan kedalaman aliran dari taraf tinggi ke taraf terendah atau sebaliknya. Bila distribusi kecepatan sepanjang penampang saluran akibat adanya kekasaran batas, akan bervariasi menurut jaraknya. Dari kondisi aliran tersebut akan mengakibatkan fenomena aliran yang disebut fenomena lokal aliran. Terdapat tiga jenis fenomena lokal antara lain :

1. jatuh bebas (“free over fall”)
2. joncat air atau disebut loncatan hidrolik (“hydraulics jump”), dan
3. lapis batas (“boundary layer”)

4. 5. 1. Fenomena Jatuh Bebas

Fenomena jatuh bebas adalah perubahan kedalaman aliran yang tiba-tiba dari taraf tinggi ke taraf rendah. Fenomena jatuh bebas merupakan masalah khusus dari penurunan hidrolik. Hal ini terjadi bila dasar saluran yang rata tiba-tiba terputus. Bila energi spesifik di hulu adalah E_s , energi tersebut akan terus berkurang ke hilir akhirnya mencapai energi minimum (E_{minimum})

Jika kondisi aliran di hulu mencapai tinggi kritik maka ketinggian muka air akan berkurang ke hilir sampai titik ambang jatuh. Namun energi spesifik pada ambang tidak lebih kurang dari energi minimum. Sehingga kecepatan pada titik ambang jatuh adalah kecepatan super kritik.



Gambar 3. 6. Jatuh bebas

Fenomena jatuh bebas akan mengakibatkan gradien tekanan pada ambang jatuh, Seperti pada gambar (3. 6.) yang diakibatkan oleh lengkung aliran sehingga menimbulkan tekanan non hidraustatik.

Sebuah partikel yang bergerak dengan lintasan melengkung akan mengalami percepatan sentripetal sebesar a .

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (3.7.)$$

dengan v : kecepatan partikel

r : jari-jari kelengkungan lintasan partike

Dari persamaan gerak Euler, pada arah normal aliran ;

$$\frac{v^2}{r} = - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dP}{dn} + kn$$

dengan P : tekanan

ρ : masa jenis zat cair



dn : differensial arah normal

kn : kurva normal

$$kn = -g \cdot \frac{dh}{dn}$$

maka

$$\frac{V^2}{r} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dP}{dn} - g \cdot \frac{dh}{dn}$$

$$\frac{V^2}{g \cdot r} = \frac{1}{g} \cdot \frac{dP}{dn} - \frac{dh}{dn}$$

sehingga

$$\frac{d}{dn} \cdot \left(\frac{P}{\gamma} + h \right) = - \frac{V^2}{r \cdot g}$$

diintegrasikan dari titik satu dan titik dua

$$\left[\frac{P_1}{\gamma} + h_1 \right] - \left[\frac{P_2}{\gamma} + h_2 \right] = \frac{1}{g} \cdot \int_1^2 \frac{V}{r} \, dn \quad (3.8.)$$

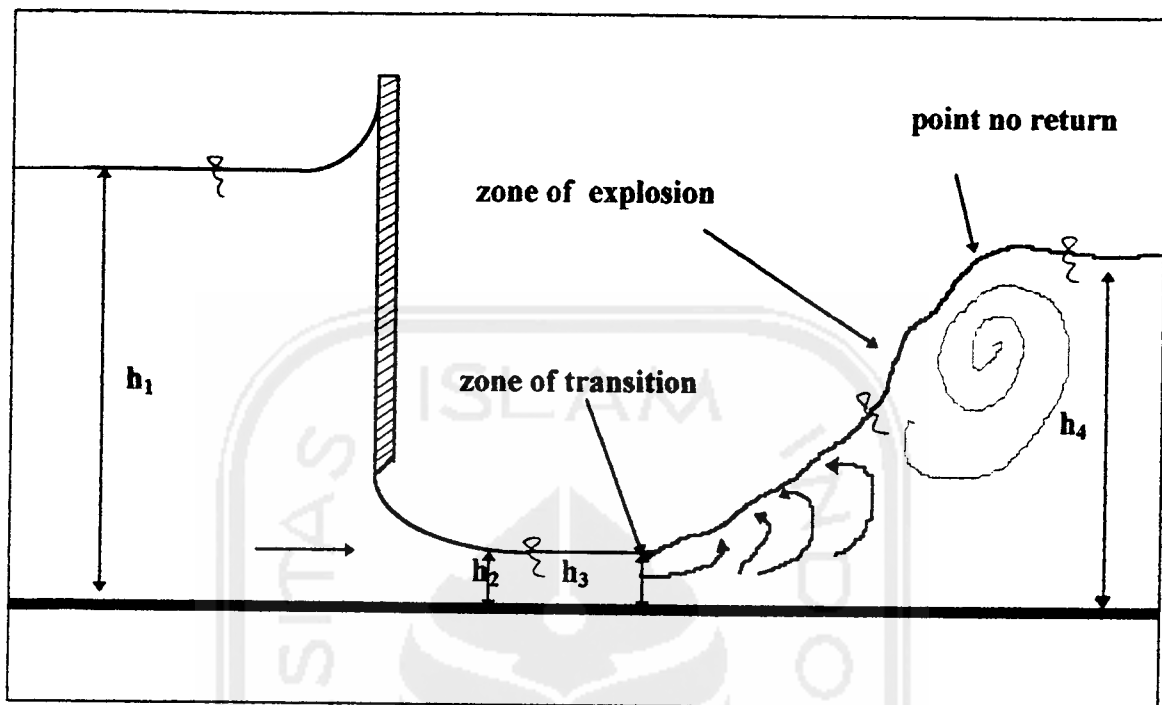
Jadi integral percepatan centripetal merupakan hasil selisih tekanan yang menunjukkan bahwa aliran dengan bentuk lengkung dengan jari-jari r , distribusi tekanannya bukan hidraustatik karena disebabkan oleh tekanan dipengaruhi pada variabel aliran. Atau dapat disimpulkan bahwa adanya aliran yang melengkung, akan menyebabkan kehilangan tinggi tekanan pada aliran "pizometrik", seperti di tunjukkan pada gambar (2.1.)

Fenomena jatuh bebas akan terjadi bila pada bendung ambang tajam dan ambang lebar dengan aliran yang dilewati ambang berupa pancaran akan menimbulkan tekanan negatif di bawah tirai luapan yang disebut kavitasi. Untuk menghindari efek kavitasi, di bawah tirai luapan maka harus disediakan ruang pengudaraan (Working Group of Hydraulics Structure, Discharge Measurement 1988.).

3. 5. 2. Loncat Air

Loncat air terjadi apabila aliran super kritik harus berubah kedalam aliran sub kritik. Terdapat suatu kenaikan yang tiba-tiba sehingga menghasilkan kehilangan energi dan perputaran permukaan yang besar mulai dari awal loncatan sampai mendekati pada loncatan.

Pusaran ini menarik energi dari aliran utama (aliran super kritik), kemudian naik karena pecahnya gelembung udara yang disebabkan oleh gaya apung (Ranga Raju, Open Chanel Flow, 1982.) Seperti ditunjukkan pada gambar (3. 8.).



Gambar 3. 7. Profil loncatan air

Untuk saluran datar yang berbentuk empat persegi, sebelum loncatan dan setelah loncatan maka berdasarkan hukum konservasi momentum dan konservasi masa.

Gambar (3. 7), terlihat bahwa loncat air terjadi bila aliran dari h_3 menjadi h_4 melalui titik transisi ("zone of transition"). Jadi loncat air terjadi jika terdapat perubahan sifat aliran dari super kritis ke sub kritis melalui h_{kr} (h_3).

Hubungan h_3 dan h_4 dengan mudah dapat diperoleh dengan syarat $F_1 = F_2$ (hukum konservasi masa dan hukum konservasi momentum).

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + \Delta Z_3 \cdot A_3 = \frac{Q_4^2}{g \cdot A_4} + \Delta Z_4 \cdot A_4$$

untuk saluran persegi panjang :

$$\frac{V_3^2 \cdot B \cdot h_3}{g} + \frac{h_3^2 \cdot B}{2} = \frac{V_4^2 \cdot B \cdot h_4}{g} + \frac{h_4^2 \cdot B}{2} \quad (3.9.)$$

Karena

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

$$Fr = \frac{V^2}{g \cdot h} \quad (3.10.)$$

Berdasarkan hukum konservasi masa

$$Q_3 = Q_4$$

$$V_3 \cdot h_3 \cdot B = V_4 \cdot h_4 \cdot B$$

$$V_4 = V_3 \frac{h_3}{h_4} \quad (3.11.)$$

Dari (3.8.) dan (3.9.) dimasukkan ke persamaan (3.10.) maka diperoleh ;

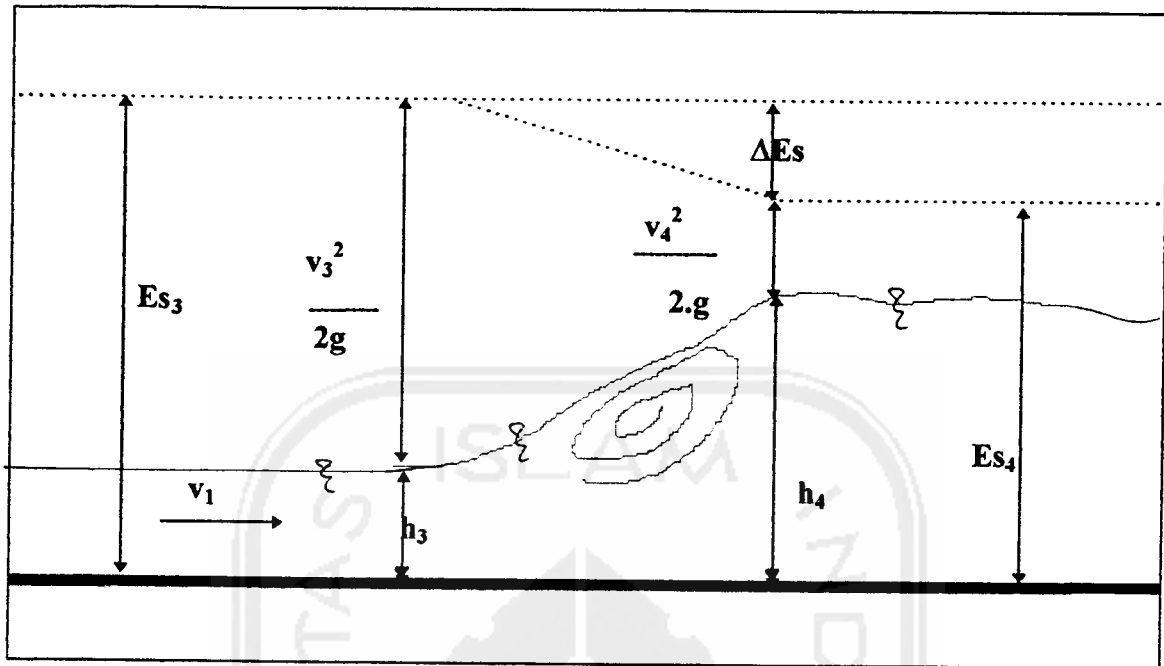
$$Fr_3 \cdot h_3^2 + \frac{h_3^2}{2} = Fr_3^2 \frac{h_3^2}{h_4} + \frac{h_4^2}{2}$$

$$Fr_3^2 - h_3^2 \cdot \left| 1 - \frac{h_3}{h_4} \right| = \frac{h_4^2 - h_3^2}{2}$$

maka

$$\frac{h_4}{h_3} = \frac{\sqrt{(1 + 8 \cdot Fr^3)} - 1}{2} \quad (3.11.)$$

Karena pada loncat air pengalirannya turbulen, berarti kerugian tenaga yang terjadi tidaklah sedikit, maka perlu diketahui besarnya kehilangan tenaga aliran.



Gambar 3. 8. Kehilangan tenaga pada loncat air

dari gambar (3. 8) dan hukum konservasi momentum dapat diturunkan persamaan kehilangan tenaga sebagai berikut:

Prinsip momentum : $(h_1 + h_2) \cdot h_1 \cdot h_2 = \frac{v_3^2 \cdot h_1}{g} = \frac{v_4^2}{g}$

$$Es_3 = h_3 + \frac{v_2^2}{2g} = h_3 + \frac{(h_3 + h_4) \cdot h_4}{4 \cdot h_3}$$

$$Es_3 = h_4 + \frac{v_4^2}{2.g} = h_4 + \frac{(h_3 + h_4).h_4}{4h_4}$$

$$\Delta Es = Es_1 - Es_2 = \frac{(h_4 - h_3)^3}{4.h_3.h_4}$$

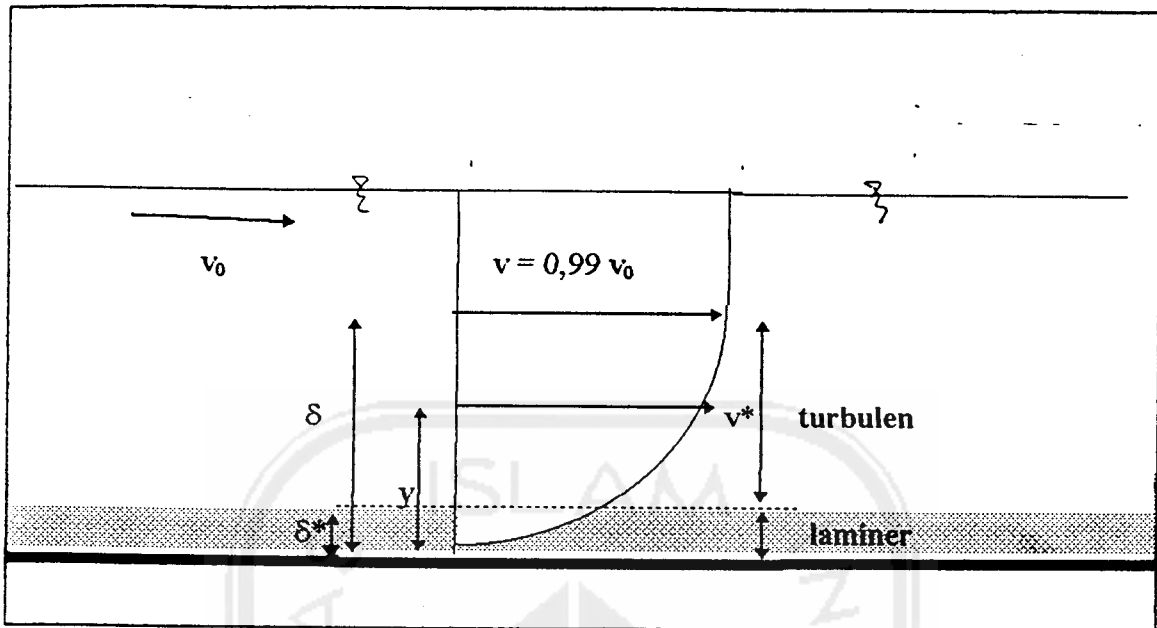
$$\Delta Es = \frac{(h_4 - h_3)^3}{4.h_3.h_4}$$

(3. 12.)

2. 5. 3. Fenomena Lapis Batas

Pada tahun 1904 seorang insinyur Jerman, Ludwig Prandtl menunjukkan bahwa aliran fluida yang kekentalannya rendah seperti aliran air pada zat cair ideal dan udara dapat diklasifikasikan menjadi lapisan batas di dekat permukaan zat padat dan lapisan luar yang encer yang memenuhi persamaan Euler dan Bernoulli. Konsep lapisan batas ini mampu memadukan antara hidrolika eksperimen dan hidrodinamika.

Bila aliran seragam, stabil dan prismatic dengan kekasaran tetap pola distribusi kecepatannya dapat menrutu pola yang tetap, untuk jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3. 9. Pembagian kecepatan pada permukaan saluran yang halus.

Karena lapisan batas tidak terlalu jelas, ketebalannya dapat dinyatakan dengan berbagai cara. Definisi yang umum adalah bahwa ketebalan δ merupakan besaran jarak normal dari permukaan batas di mana kecepatan v_1 sama dengan 99% dari kecepatan batas v_0 , dengan kurva pembagian kecepatan di lapisan batas berbentuk asimtotis seperti pada gambar (3. 9.).

Efek lapisan batas terhadap aliran sama dengan perpindahan semu ke atas dari dasar saluran ke tempat sebenarnya yang setara dengan apa yang disebut tebal perpindahan (“displacement thickness”) δ^* . Seperti ditunjukkan pada gambar (3. 9.) yang dinyatakan dengan :

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{v^*}{v} \right) dy$$

dengan v^* n kecepatan pada jarak y dari permukaan salur...

lapisan batas, seperti pada gambar (3. 9.) Besarnya tebal perpindahan biasanya bervariasi dari 1/8 sampai 1/10 tebal lapisan batas yang bergantung terhadap pada besarnya bilangan Reynold. (Ven Tee Chow, Hidrolika Saluran Terbuka, 1985.).

