

Hidrolika Saluran Terbuka

Pendahuluan

Djoko Luknanto

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan

FT UGM

Pendahuluan

- Pengaliran saluran terbuka:
 - pengaliran tak bertekanan
 - pengaliran yang muka airnya berhubungan dengan udara luar

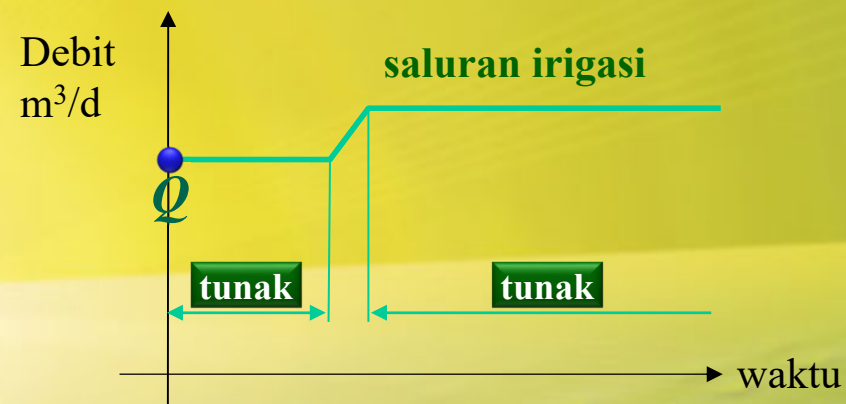


Jenis pengaliran pada Saluran Terbuka 1

A. Ditinjau dari Aspek Waktu

1. Pengaliran Langgeng/Permanen/Tunak/*Steady Flows*:
 Q, V, h, y tidak berubah sepanjang waktu tinjauan:

$$(Q, V, h, y) \neq f(t) \Rightarrow \frac{\partial(Q, V, h, y)}{\partial t} = 0$$

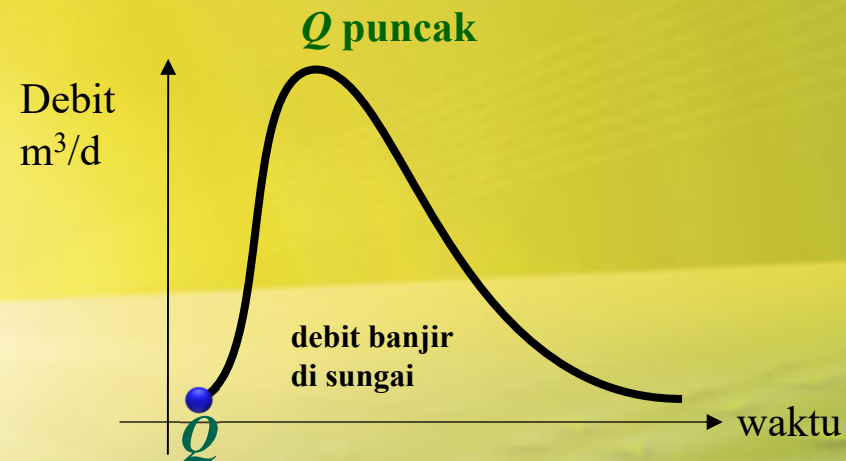


Jenis pengaliran pada Saluran Terbuka 2

B. Ditinjau dari Aspek Waktu

2. Pengaliran Tidak Langgeng/Tidak Permanen/Tak Tunak/*Unsteady Flows*: Q, V, h, y berubah sepanjang waktu tinjauan:

$$(Q, V, h, y) = f(t) \Rightarrow \frac{\partial(Q, V, h, y)}{\partial t} \neq 0$$



Jenis pengaliran pada Saluran Terbuka 3

B. Ditinjau dari Aspek Ruang

1. Pengaliran Beraturan/Seragam/*Uniform Flows*:
 Q, V, h, y tidak berubah sepanjang kawasan tinjauan:

$$(Q, V, h, y) \neq f(s) \Rightarrow \frac{\partial(Q, V, h, y)}{\partial s} = 0$$

misal: kedalaman air tidak berubah, $h \neq h(s)$



Jenis pengaliran pada Saluran Terbuka 4

B. Ditinjau dari Aspek Ruang

2. Pengaliran Tidak Beraturan/Tidak Seragam/*Non-uniform Flows*: Q, V, h, y berubah sepanjang kawasan tinjauan:

$$(Q, V, h, y) = f(s) \Rightarrow \frac{\partial(Q, V, h, y)}{\partial s} \neq 0$$

misal: kedalaman air berubah, $h = h(s)$

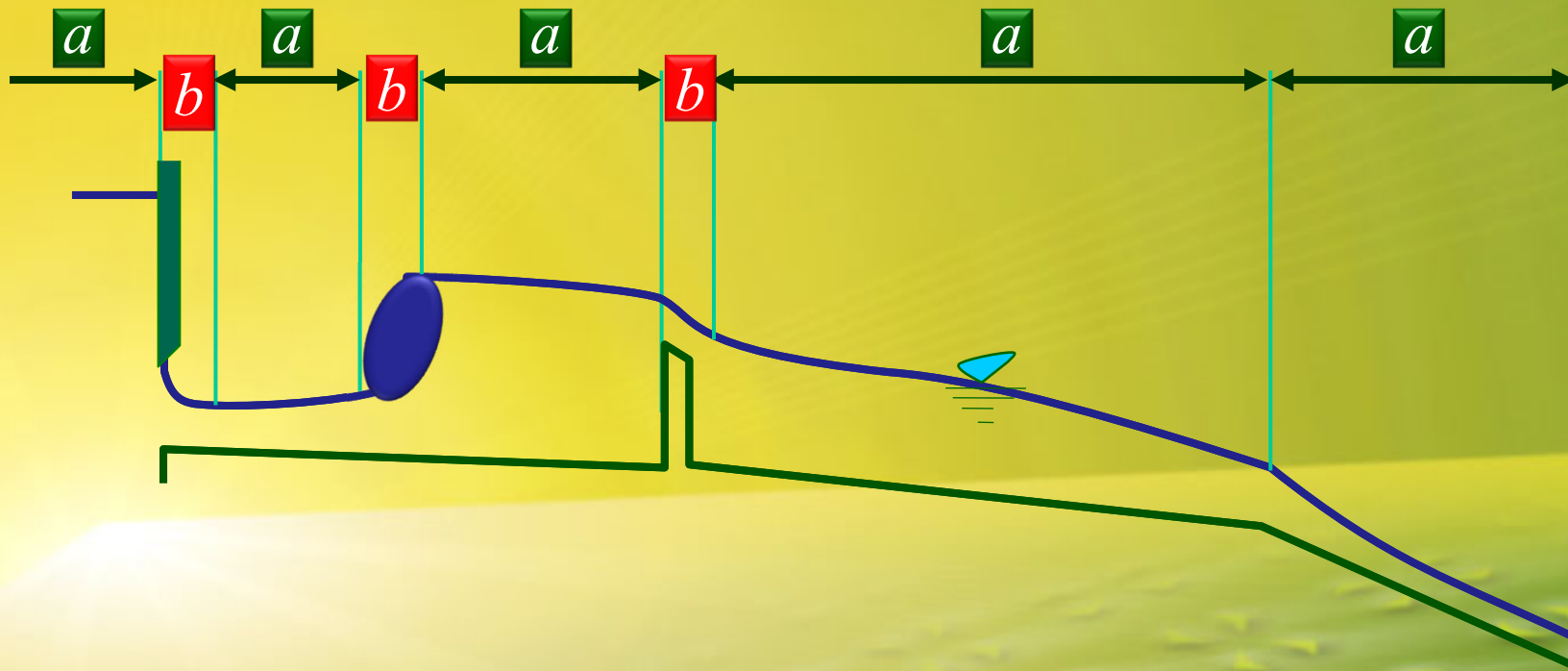


Pengaliran tidak seragam

2. *Non-uniform flows* diklasifikasikan menjadi

a) *Gradually varied flows (GVF)*

b) *Rapidly varied flows (RVF)*



Loncat Air dan Terjunan di Saluran Irigasi



11 September 2008

luknanto@ugm.ac.id

8

Terjunan dan Kolam Olak di Saluran Irigasi

Bangunan terjunan



Saluran irigasi landai



Jenis pengaliran pada Saluran Terbuka 5

C. Ditinjau dari aspek kecepatan rerata (V)

1. Pengaliran *mengalir* (*subcritical flow*):

$$V < V_{kr}$$

2. Pengaliran *kritik* (*critical flow*):

$$V = V_{kr}$$

3. Pengaliran *meluncur* (*supercritical flow*):

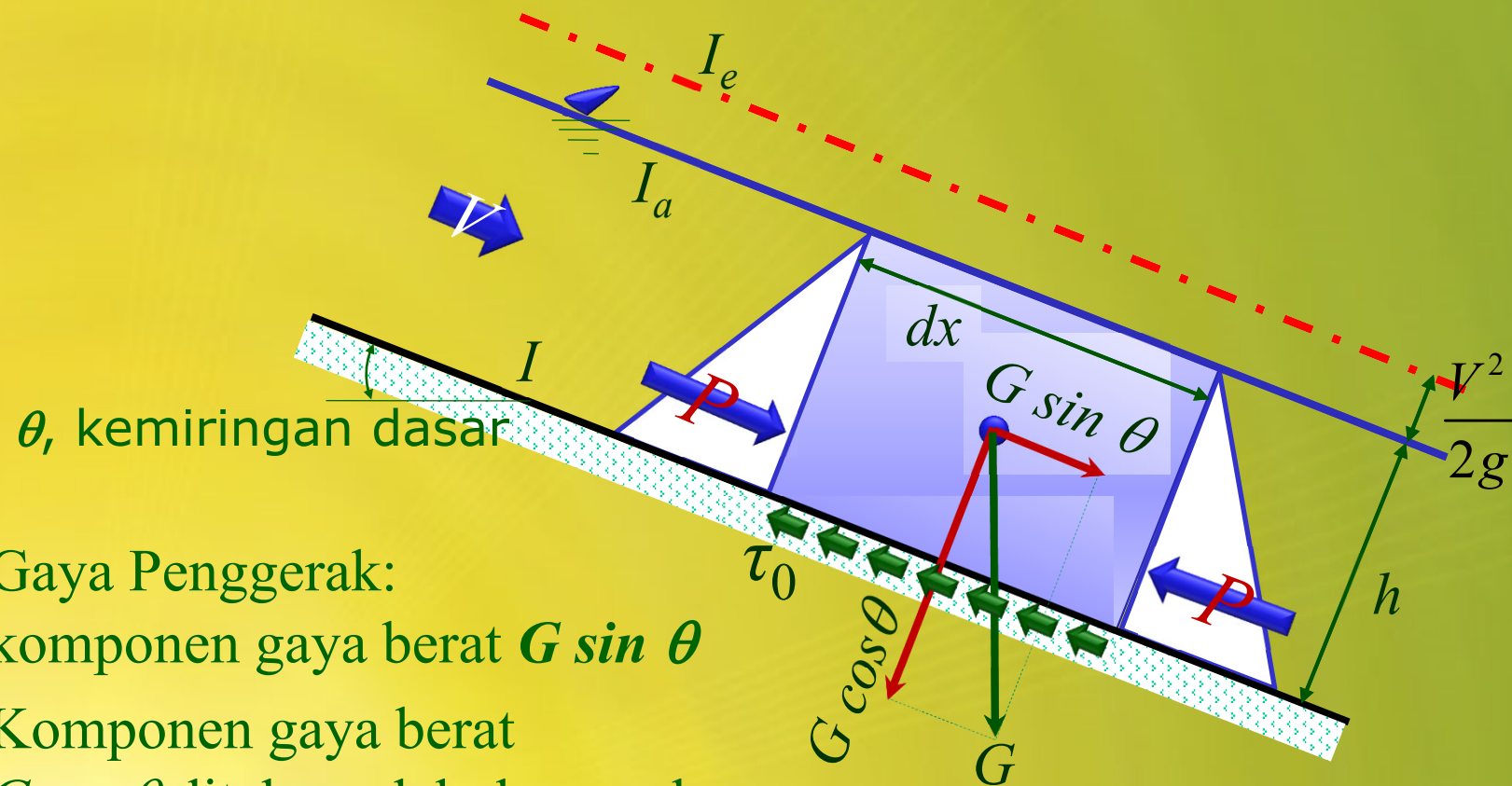
$$V > V_{kr}$$

Catatan: V_{kr} adalah kecepatan aliran pada saat energi aliran minimum (akan dijelaskan kemudian)

Pengaliran Permanen Beraturan

- Sifat pengaliran:
 - Luas tampang lintang tidak berubah sepanjang ruang dan waktu.
 - Kecepatan aliran konstan, sehingga percepatannya $a = 0$.
- Menurut Hukum Newton
$$F = m \cdot a = 0, \text{ sehingga}$$
 - gaya pendorong = gaya penahan aliran.
- Akan diteliti gaya-gaya yang bekerja pada aliran.

Gaya-gaya yang bekerja 1



θ , kemiringan dasar

- Gaya Penggerak: komponen gaya berat $G \sin \theta$
- Komponen gaya berat $G \cos \theta$ ditahan oleh dasar saluran.
- Tekanan hidrostatisa saling meniadakan.
- Gaya Penahan: τ_0 , gaya gesek aliran dengan dinding.

Gaya-gaya yang bekerja 2

- Gaya Penggerak:
komponen gaya berat $G \sin \theta$
- Gaya Penahan: τ_0 , gaya gesek aliran dengan dinding sekelilingnya.
- Karena $F = 0$, maka

Gaya penggerak = gaya penahan

$$G \sin \theta = \tau_0 \bullet P \bullet dx$$

$$(\text{Vol. air} \bullet \gamma) \sin \theta = \tau_0 \bullet P \bullet dx$$

Gaya-gaya yang bekerja 3

$$(\text{Vol. air} \cdot \gamma) \sin \theta = \tau_0 \cdot P \cdot dx$$

$$A \cdot dx \cdot \rho g \cdot \sin \theta = \tau_0 \cdot P \cdot dx$$

$$\frac{A}{P} \cdot \cancel{dx} \cdot \rho g \cdot \tan \theta = \tau_0 \cdot \cancel{dx}$$

$$\tau_0 = \rho g \underbrace{\frac{A}{P}}_R \underbrace{\tan \theta}_{I_e}$$

$$\tau_0 = \rho g R I_e$$

Tegangan Gesek

- Rumus tegangan geser dikelompokkan sebagai berikut:

$$RI_e = \frac{\tau_0}{\rho g}$$

- Ruas kanan tergantung dari geometri sungai → akan dipengaruhi oleh kecepatan rerata aliran; sehingga:

$$RI_e = f(V)$$

Notasi yang digunakan

I_e : kemiringan garis energi

$R = A/P$, radius hidraulik

A : Luas penampang basah

P : keliling penampang basah

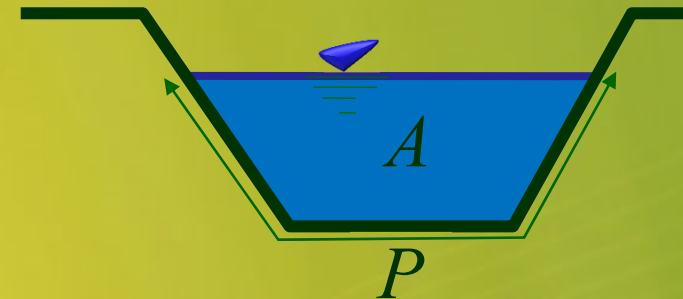
τ_0 : tegangan gesek (tiap satuan luas keliling basah)

ρ : rapat massa air

g : percepatan gravitasi

Catatan:

Jika θ kecil, maka $\sin \theta = \tan \theta = I_e$



Rumus Kecepatan Rerata Chezy

- Penelitian empiris korelasi RI_e vs V kemudian banyak dilakukan oleh para peneliti, antara lain:
- Menurut de Chezy (1775)

$$RI_e = f(V) = \frac{V^2}{C^2} \longrightarrow V = C \sqrt{RI_e}$$

- bentuk terakhir ini terkenal dengan nama rumus kecepatan rerata aliran Chezy
- dengan C disebut koefisien kekasaran Chezy dengan satuan $L^{1/2}T^{-1}$ dalam metrik $m^{1/2}/\text{detik}$.

Rumus Kecepatan Rerata Manning

- Menurut Gauckler-Manning (1890)

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

- bentuk terakhir ini terkenal dengan nama rumus kecepatan rerata aliran Manning untuk sistem SI.
- dengan n disebut koefisien kekasaran Manning tanpa satuan.

Rumus Kecepatan Rerata Strickler

- Menurut Strickler

$$V = k_s R^{2/3} I_e^{1/2}$$

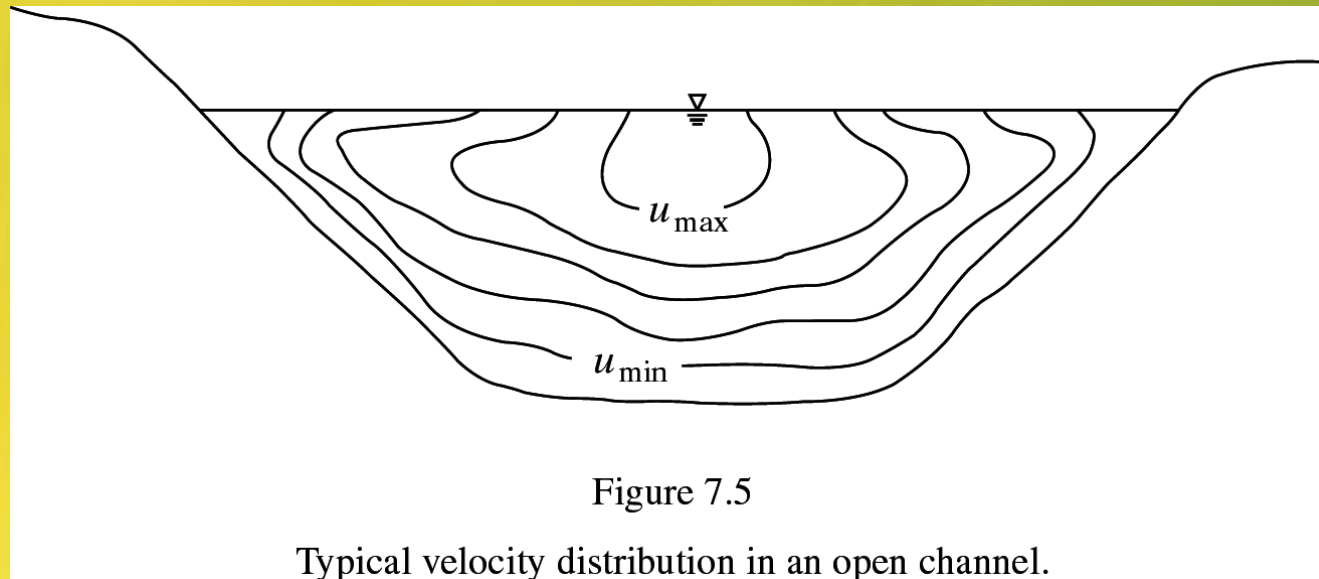
- bentuk terakhir ini terkenal dengan nama rumus kecepatan rerata aliran Strickler untuk sistem SI.
- dengan k_s disebut koefisien kekasaran Strickler tanpa satuan.

Korelasi antar rumus kecepatan

- Untuk sebuah sungai yang sama, ketiga rumus kecepatan aliran tersebut harus memberikan hasil yang sama.
- Oleh karena itu diperoleh korelasi antara ke 3 rumus tersebut sebagai berikut:

$$k_s = \frac{1}{n} \quad C = k_s R^{1/6} = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

Distribusi Kecepatan



- Pada kondisi sungai di lapangan, sebenarnya jarang sekali ditemukan suatu aliran yang mempunyai kecepatan seragam.
- Pada umumnya kecepatan aliran tidak sama di setiap titik pada sebuah tampang lintang.

Profil Kecepatan Aliran

- Rumus kecepatan aliran rerata yang dibahas di depan, biasanya cukup memadai untuk keperluan ketekniksipilan.
- Akan dibahas profil kecepatan aliran sepanjang vertikal (kedalaman air) untuk:
 - aliran permanen beraturan
 - kasus laminar dan turbulen.

Profil V Aliran Permanen Seragam

- Tegangan gesek pada aliran permanen dan seragam:

$$\tau_0 = \rho g R I_e \quad \textcircled{1}$$

- Untuk aliran laminar ($Re = VR/\nu < 500$)

Tegangan geser menurut Newton: $\tau_z = \mu \frac{du_z}{dz} \quad \textcircled{2}$

- Untuk aliran turbulen ($Re = VR/\nu > 600$)

Tegangan geser menurut Prandtl: $\tau_z = \rho \ell^2 \left(\frac{du_z}{dz} \right)^2 \quad \textcircled{3}$

Profil Kecepatan Aliran Laminer 1

- Tegangan gesek pada aliran permanen dan seragam untuk $B = \infty$, $R = h$:

$$\tau_z = \rho g(h - z)I_e \quad \textcircled{1}$$

- dengan h kedalaman muka air total dan z adalah kedalaman air pada titik tinjauan.
- Pers. (1) = (2), sehingga:

$$\mu \frac{du_z}{dz} = \rho g(h - z)I_e$$

Profil Kecepatan Aliran Laminer 2

$$\mu \frac{du_z}{dz} = \rho g (h - z) I_e \Rightarrow du_z = \frac{\rho}{\mu} g I_e (h - z) dz$$

$$u_z = \int du_z = \int \frac{g I_e}{\nu} (h - z) dz$$

$$u_z = \frac{g I_e}{\nu} \left(hz - \frac{1}{2} z^2 + C \right)$$

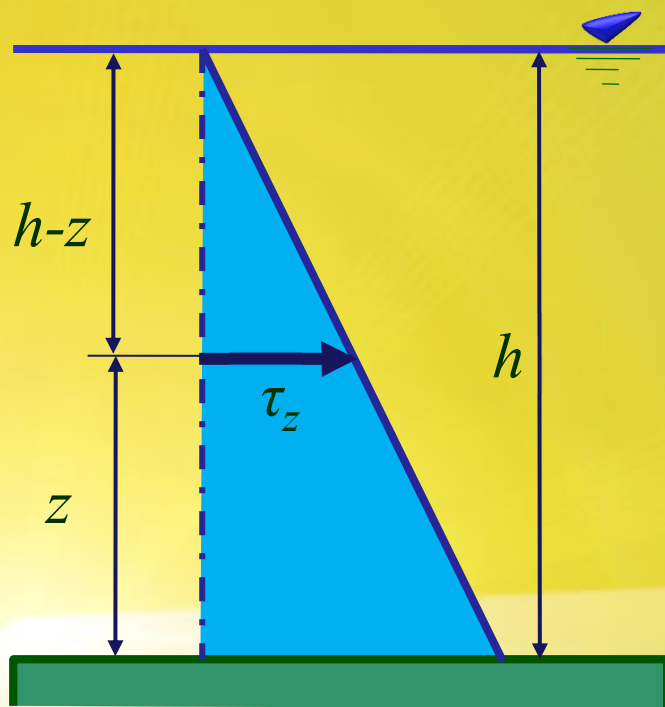
Syarat batas, $z = 0$, $u_z = 0$, jadi $C = 0$, sehingga

$$u_z = \frac{g I_e}{\nu} \left(hz - \frac{1}{2} z^2 \right) \Rightarrow \text{berbentuk parabola}$$

Profil Kecepatan Aliran Laminer 3

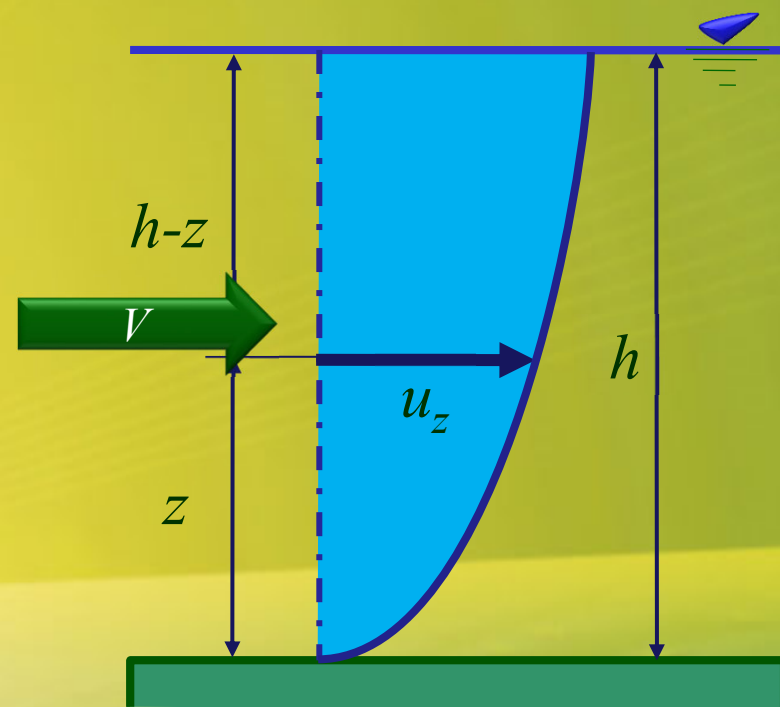
- Profil tegangan gesek

$$\tau_z = \rho g l_e (h - z) = \mu \frac{du_z}{dz}$$



- Profil kecepatan

$$u_z = \frac{g l_e}{\nu} \left(h z - \frac{1}{2} z^2 \right)$$



Kecepatan Rerata Aliran Laminer

Debit aliran tiap lebar saluran $q = Q/B$

$$q = \int u_z dz \quad \rightarrow \quad q = \int_0^h \frac{gI_e}{\nu} \left(hz - \frac{1}{2} z^2 \right) dz$$
$$q = \frac{gI_e}{\nu} \left[\frac{1}{2} hz^2 - \frac{1}{6} z^3 \right]_0^h = \frac{gh^3 I_e}{3\nu}$$

Kecepatan rerata dihitung: $V = \frac{q}{h}$

untuk $B = \infty$: $V = \frac{gh^2 I_e}{3\nu}$ untuk $B \neq \infty$: $V = \frac{gR^2 I_e}{3\nu}$

Profil Kecepatan Aliran Turbulen 1

- Tegangan gesek pada aliran permanen dan seragam untuk $B = \infty$, $R = h$, di dekat dasar:

$$\tau_z = \rho g h I_e \quad \textcircled{1}$$

- Tegangan geser menurut Prandtl:

$$\tau_z = \rho \ell^2 \left(\frac{du_z}{dz} \right)^2 \quad \textcircled{3}$$

- dengan ℓ (*mixing length*) = κz , κ adalah konstanta universal von Karman = 0,4; z adalah kedalaman titik yang ditinjau dari dasar saluran.

Profil Kecepatan Aliran Turbulen 2

- Pers. (1) = (3), sehingga di dekat dasar berlaku:

$$\rho \ell^2 \left(\frac{du_z}{dz} \right)^2 = \rho g h I_e \quad \Rightarrow \quad du_z = \frac{\sqrt{g h I_e}}{\kappa} \frac{dz}{z}$$

$$u_z = \int_{z_0}^z \frac{\sqrt{g h I_e}}{\kappa} \frac{dz}{z} \quad \Rightarrow \quad u_z = \frac{V_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$

- disebut dengan hukum pembagian kecepatan universal Prandtl-von Karman, dengan kecepatan gesek didefinisikan sebagai:

$$V_* = \sqrt{g h I_e}$$

Hukum Kecepatan Universal

- Walaupun dijabarkan dekat dasar, namun hukum distribusi kecepatan universal Prandtl-von Karman berlaku untuk seluruh kedalaman air (h).
- Hukum ini berlaku untuk aliran turbulen, maka pada daerah batas laminer (δ) dekat dasar hukum tersebut tidak berlaku.
- Dari penelitian diperoleh bahwa:
$$\delta = \frac{11,6\nu}{V_*}$$

Lapis Batas Laminer

- Nilai lapis batas laminer: $\delta = \frac{11,6\nu}{V_*}$ dan $\nu = \frac{\mu}{\rho}$
dengan
 - μ : kekentalan dinamik ($ML^{-1}T^{-1}$) atau N detik/ m^2
 - ρ : rapat massa (ML^{-3}) atau kg_m/m^3
 - ν : kekentalan kinematik (L^2T^{-1}) atau $m^2/detik$

Nilai ν

<i>t</i>	°C	0	10	20	30
<i>\nu</i>	$10^{-6} m^2/det$	1,8	1,3	1,0	0,8

Kecepatan pada Batas Laminer 1

- Tegangan gesek pada aliran permanen dan seragam untuk $B = \infty$, $R = h$, pada lapis batas laminer:

$$\tau_z = \tau_0 = \rho g h I_e = \rho V_*^2 \quad \textcircled{1}$$

- Tegangan geser laminer menurut Newton:

$$\tau_z = \mu \frac{du_z}{dz} \quad \textcircled{2}$$

- Pers. (1) = (2), sehingga:

$$\mu \frac{du_z}{dz} = \rho V_*^2 \quad \Rightarrow \quad du_z = \frac{V_*^2}{\nu} dz \quad \Rightarrow \quad u_z = \frac{V_*^2}{\nu} z$$

Kecepatan pada Batas Laminer 2

- Pada daerah batas laminer δ profil kecepatan linier:

$$u_z = \frac{V_*^2}{\nu} z$$

- Pada batas laminer, $z = \delta$, nilai kecepatan:

$$u_\delta = \frac{V_*^2}{\nu} \delta = \frac{V_*^2}{\nu} \delta = \frac{V_*^2}{\nu} \frac{11,6\nu}{V_*} = 11,6V_*$$

- Sesungguhnya perubahan kecepatan dari hukum logaritmis menjadi linier tidak terjadi secara mendadak namun melalui transisi dari z_a dan z_b .

$$z_a = 30 \frac{\nu}{V_*} \text{ dan } z_b = 5 \frac{\nu}{V_*}$$

Profil kecepatan Turbulen

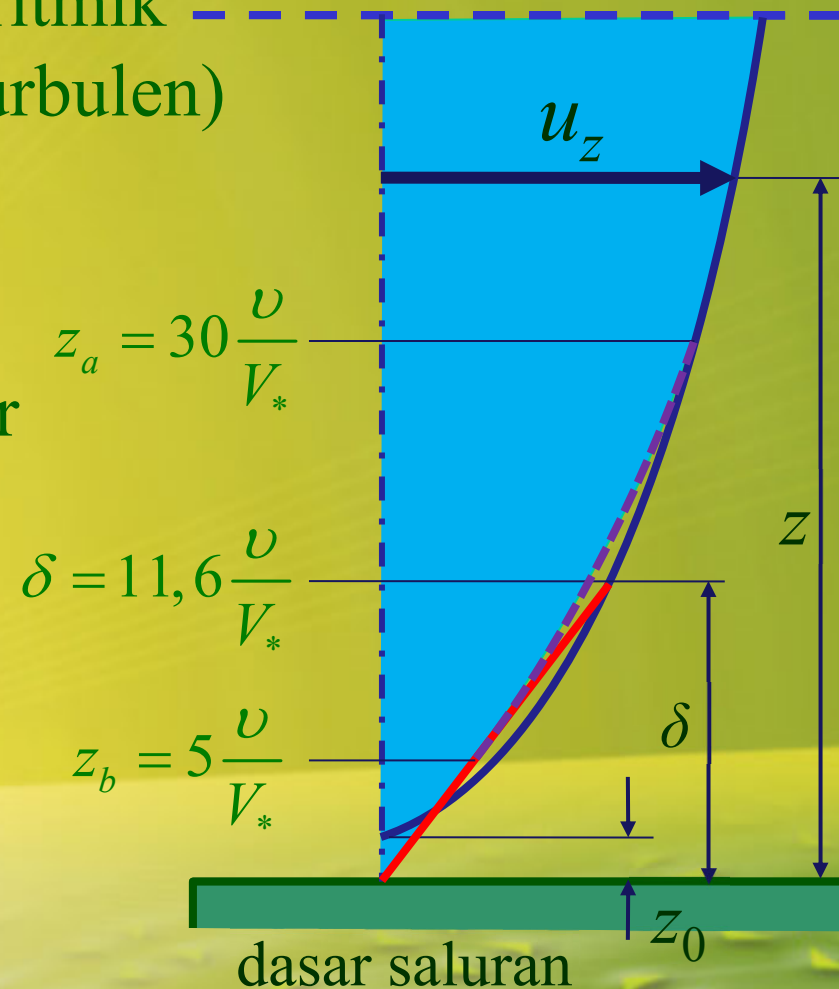
- Hukum kecepatan logaritmik Prandtl-von Karman (turbulen)

$$u_z = \frac{V_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$

- Pada lapis batas laminer distribusi kecepatan linier

$$u_z = \frac{V_*^2}{\nu} z$$

- Kurva transisi



Sifat Pengaliran Secara Hidraulika

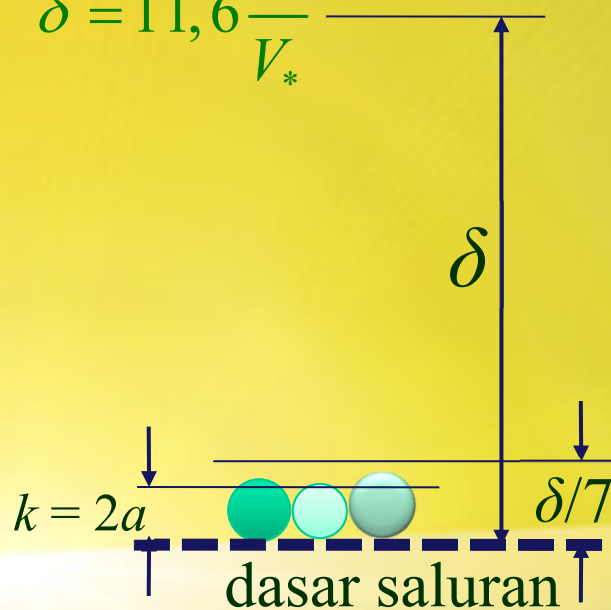
- Sifat pengaliran aliran permanen beraturan secara hidraulika dibedakan menjadi 2 yaitu
 - Hidraulika licin
 - Hidraulika kasar
- Hukum kecepatan universal Prandtl-von Karman mempunyai nilai z_0 yang berbeda untuk kekasaran hidraulika yang berbeda.

Visualisasi Hidraulika Licin & Kasar

- Hidraulika Licin

$$(a \ll \frac{\delta}{7})$$

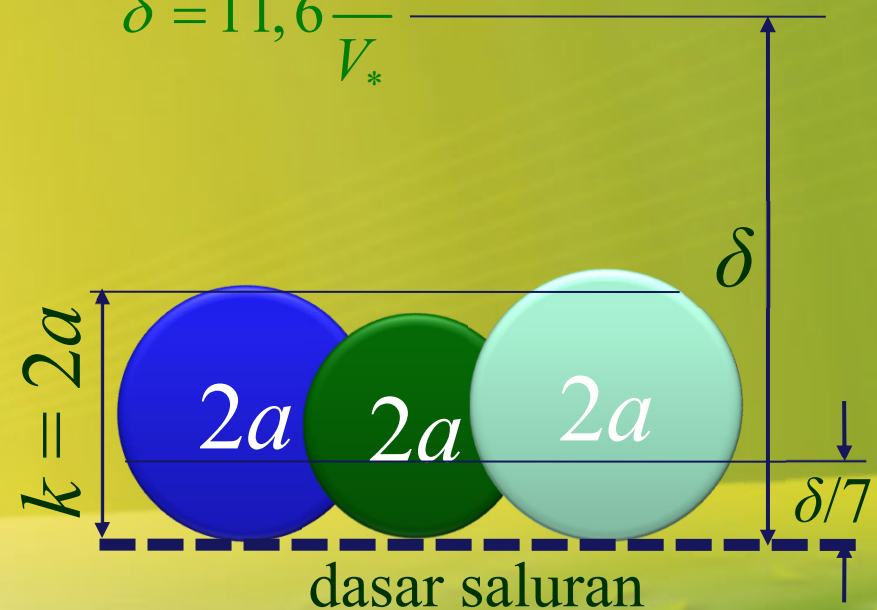
$$\delta = 11,6 \frac{\nu}{V_*}$$



- Hidraulika Kasar

$$(a \gg \frac{\delta}{7})$$

$$\delta = 11,6 \frac{\nu}{V_*}$$



Pengaliran Hidraulika Licin 1

- Untuk saluran bersifat hidraulika licin ($a \ll \frac{\delta}{7}$)

maka nilai: $z_0 = \frac{\delta}{100 \sim 104}$

biasa digunakan di Indonesia

dengan a adalah jejari dan $k (=2a)$ adalah diameter kekasaran butiran dasar saluran sedangkan nilai:

$$\delta = \frac{11,6\nu}{V_*}$$

Pengaliran Hidraulika Licin 2

- Untuk kondisi ini, maka profil kecepatan:

$$u_z = \frac{V_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \Rightarrow u_z = \frac{V_*}{0,4} \ln \frac{104z}{\delta} = \frac{V_*}{0,4} 2,3 \log \frac{104z}{\delta}$$

$$u_z = 5,75V_* \log \frac{104z}{\delta}$$

- Kecepatan rerata aliran dihitung dari rumus di atas dengan nilai $z = 0,4h$, sehingga diperoleh rumus kecepatan rerata:

$$V = 5,75V_* \log \frac{42h}{\delta}$$

Pengaliran Hidraulika Kasar 1

- Untuk saluran bersifat hidraulika kasar ($a \gg \frac{\delta}{7}$)

maka nilai: $z_0 = \frac{k}{30 \sim 33}$

USA → ← Eropa

dengan a adalah jejari dan $k (=2a)$ adalah diameter kekasaran butiran dasar saluran sedangkan nilai:

$$\delta = \frac{11,6\nu}{V_*}$$

Pengaliran Hidraulika Kasar 2

- Untuk kondisi ini, maka profil kecepatan:

$$u_z = \frac{V_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad \Rightarrow \quad u_z = \frac{V_*}{0,4} \ln \frac{33z}{k} = \frac{V_*}{0,4} 2,3 \log \frac{33z}{k}$$

$$u_z = 5,75V_* \log \frac{33z}{k}$$

- Kecepatan rerata aliran dihitung dari rumus di atas dengan nilai $z = 0,4h$, sehingga diperoleh rumus kecepatan rerata:

$$V = 5,75V_* \log \frac{12h}{k}$$

Rumus Coolebrook & White

- Oleh Coolebrook & White kedua rumus di atas digabung sebagai berikut:

- Hidraulika licin: $V = 5,75V_* \log \frac{42h}{\delta} = 5,75V_* \log \frac{12h}{2\delta/7}$

- Hidraulika kasar: $V = 5,75V_* \log \frac{12h}{k}$

digabung: $V = 5,75V_* \log \frac{12R}{k + 2\frac{\delta}{7}}$

$$(a \ll \frac{\delta}{7})$$

atau

$$V = 5,75V_* \log \frac{6R}{a + \frac{\delta}{7}}$$

$$(a \gg \frac{\delta}{7})$$

Nilai koefisien kekasaran Chezy

- Rumus Coolebrook & White:

$$V = 5,75\sqrt{g} \sqrt{RI_e} \log \frac{6R}{a + \delta / 7}$$

dibandingkan dengan rumus Chezy

$$V = C \sqrt{RI_e}$$

maka diperoleh nilai koefisien Chezy:

$$C = 5,75\sqrt{g} \log \frac{6R}{a + \delta / 7} = 18 \log \frac{6R}{a + \delta / 7}$$

atau

$$C = 5,75\sqrt{g} \log \frac{12R}{k + 2\frac{\delta}{7}} = 18 \log \frac{12R}{k + 2\frac{\delta}{7}}$$