

Hidrolika Terapan

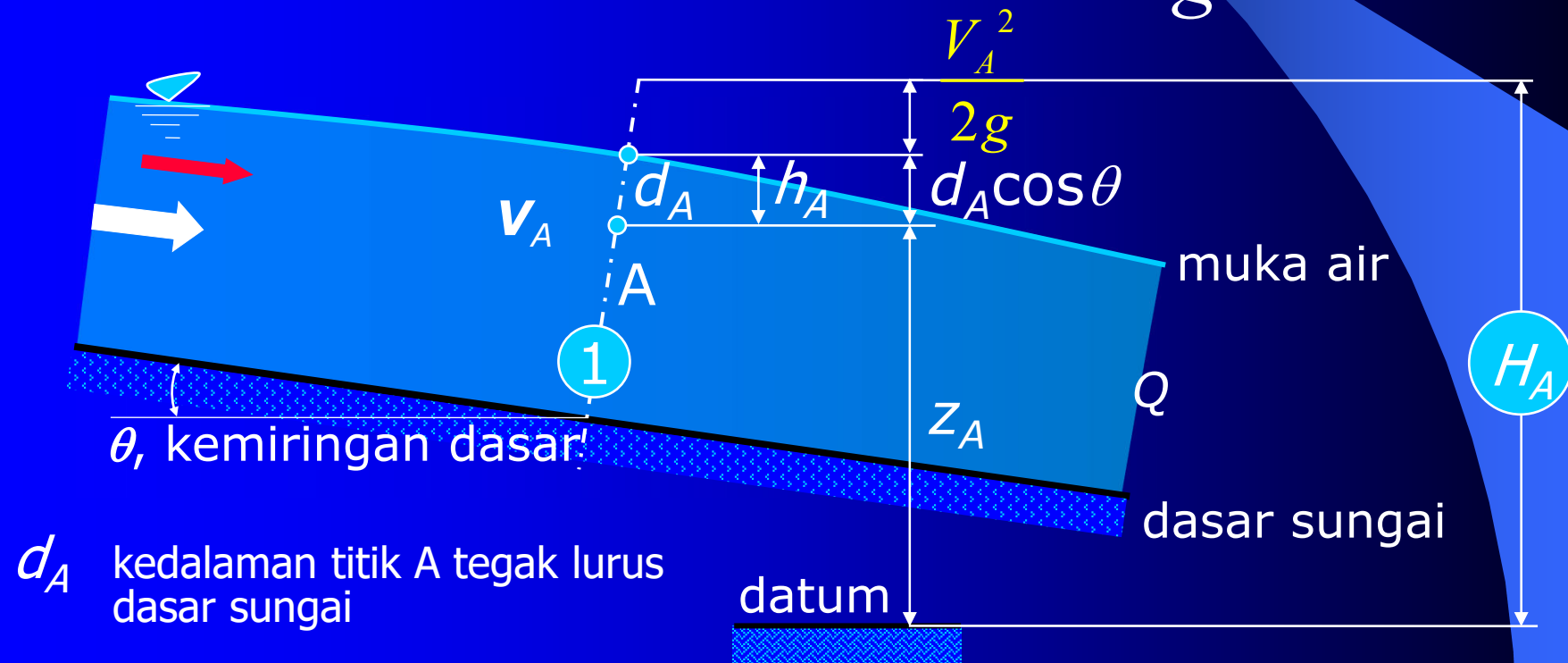
Energi di saluran terbuka

oleh
Ir. Djoko Luknanto, M.Sc., Ph.D.
Pengajar Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan
Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada

Konsep energi pada titik

- Energi pada Titik A:

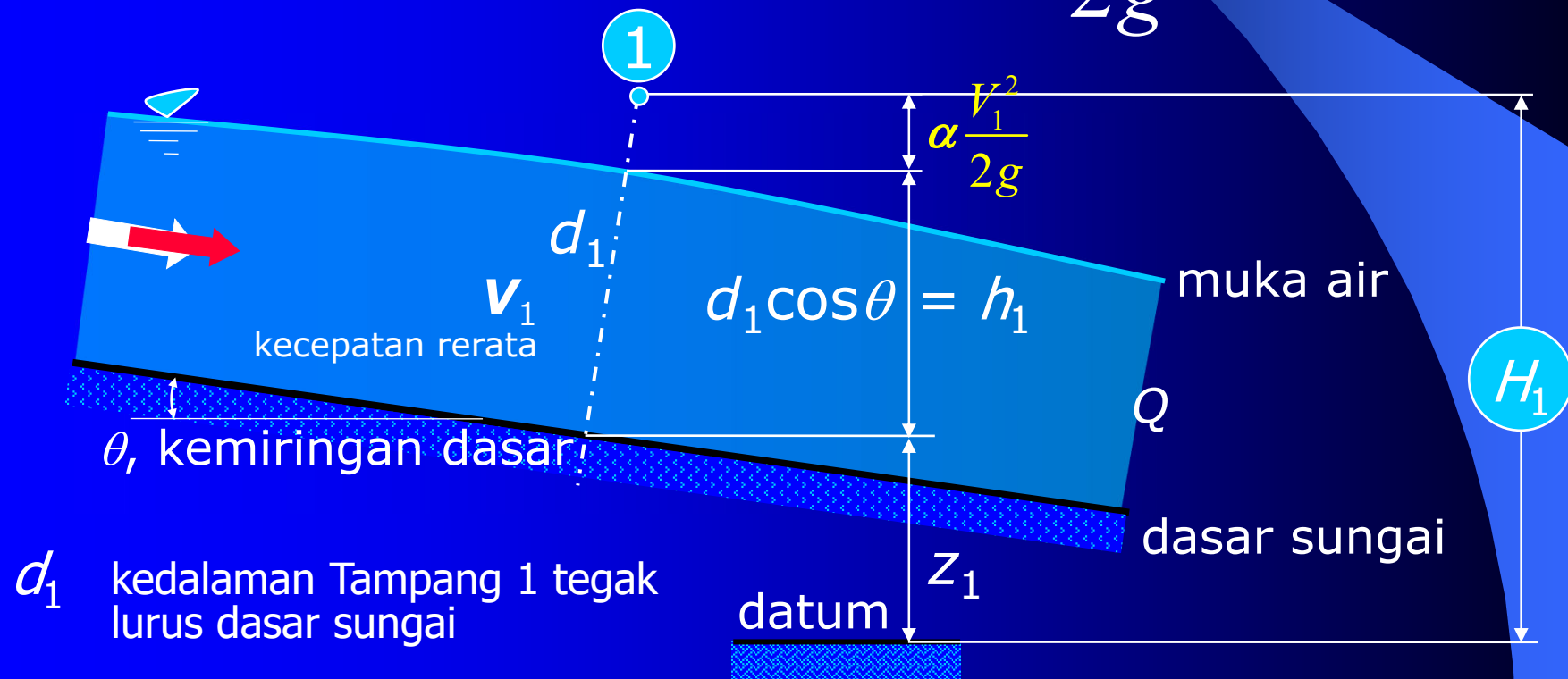
$$H_A = Z_A + d_A \cos \theta + \frac{V_A^2}{2g}$$



Konsep energi pada tampang

- Energi pada Tampang 1:

$$H_1 = Z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha \frac{V_1^2}{2g}$$



Konsep energi pada saluran

- Energi pada Tampang i

$$H_i = Z_i + d_i \cos \theta + \alpha \frac{V_i^2}{2g}$$

dengan

H : tinggi tenaga total (m)

Z : elevasi dasar saluran (m)

θ : kemiringan dasar saluran (rad, $^{\circ}$)

d : kedalaman saluran, diukur tegak lurus dasar saluran (m)

V : kecepatan rerata saluran (m/d)

α : koefisien koreksi tenaga kinetik

g : percepatan gravitasi (m/d²)

$V^2/2g$: tinggi kecepatan (m)

Konsep energi pada saluran

- Jika kemiringan saluran kecil, maka $\theta \approx 0$, maka $d \approx h$ sehingga energi pada Tampang i

$$H_i = Z_i + h_i + \alpha \frac{V_i^2}{2g}$$

dengan

H : tinggi tenaga total (m)

Z : elevasi dasar (m)

θ : kemiringan dasar saluran (rad, $^\circ$)

h : kedalaman saluran diukur vertikal (m)

V : kecepatan rerata saluran (m/d)

α : koefisien koreksi tenaga kinetik

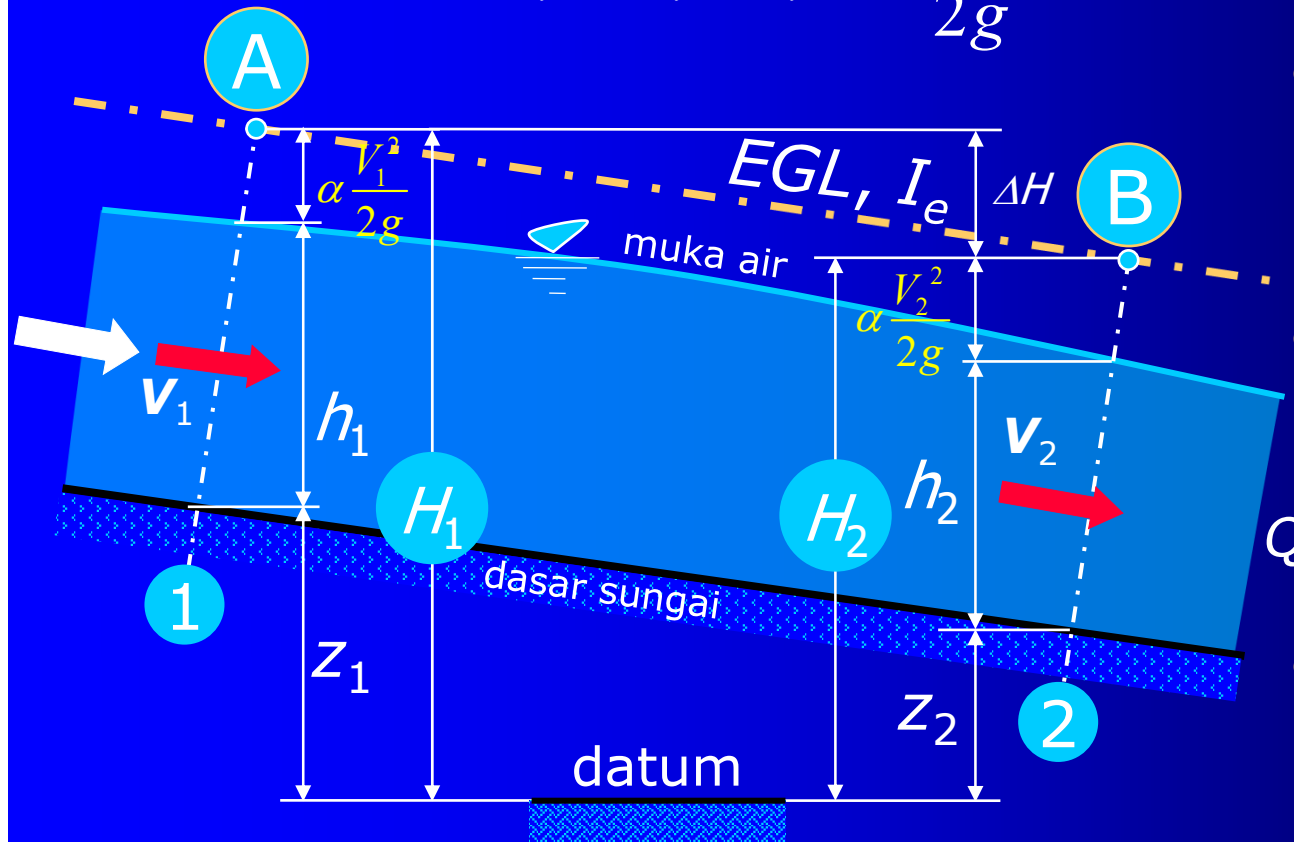
g : percepatan gravitasi (m/d²)

$V^2/2g$: tinggi kecepatan (m)

Garis energi

- Energi pada setiap tampang

$$H_i = Z_i + h_i + \alpha \frac{V_i^2}{2g}$$



- Air mengalir dari lokasi yang mempunyai energi tinggi ke energi rendah.
- Garis yang menghubungkan titik A dan B disebut garis energi.
- Kemiringan garis energi (*EGL: energi grade line, I_e*) digunakan untuk menghitung V rerata.
- ΔH adalah kehilangan energi dari Tampang 1-2

Energi Spesifik

- Energi Spesifik adalah tenaga/energi pada sembarang tampang diukur dari dasar saluran (bukan dari datum).
- Energi Spesifik adalah tenaga tiap satuan berat air pada sembarang tampang diukur dari dasar saluran.
- Energi Spesifik pada Tampang i

$$E_s = h + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

dengan

E_s : tenaga spesifik (m)

h : kedalaman saluran diukur vertikal (m)

V : kecepatan rerata saluran (m/d)

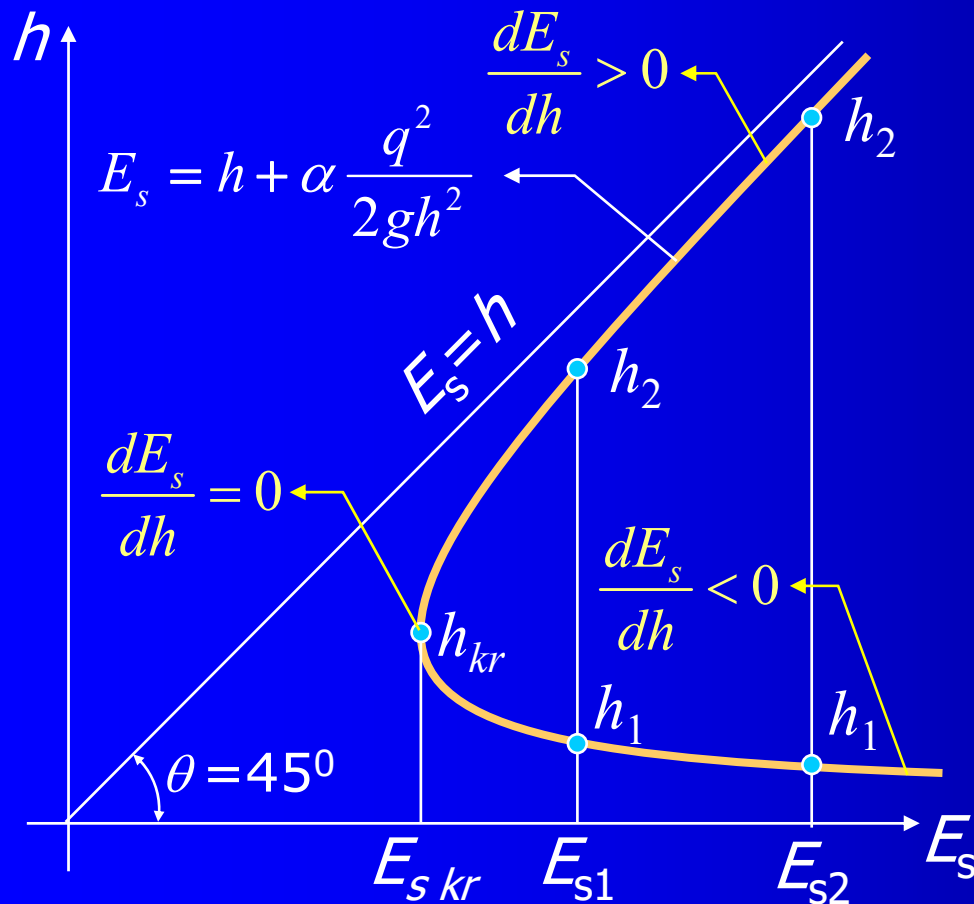
α : koefisien koreksi tenaga kinetik

g : percepatan gravitasi (m/d²)

$V^2/2g$: tinggi kecepatan (m)

Energi Spesifik

$$E_s = h + \alpha \frac{V^2}{2g} = h + \alpha \frac{Q^2}{2gB^2 h^2} = h + \alpha \frac{q^2}{2gh^2} = h + \frac{K}{h^2}$$



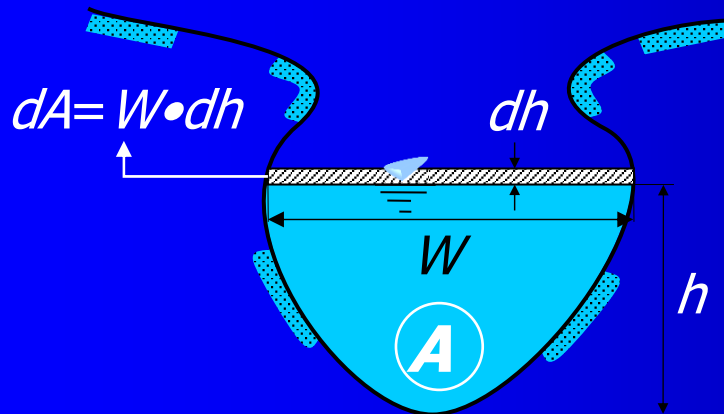
- Kurva E_s jika digambar berupa kurva dengan
 $h=0 \rightarrow$ asimtot datar E_s
 $E_s=h \rightarrow$ asimtot miring
- Untuk setiap nilai E_s terdapat dua pasang h_1 dan $h_2 \rightarrow$ disebut *conjugate* atau *alternate depth*
- E_s minimum disebut E_s kritik

Energi Spesifik Minimum

- E_s minimum tercapai jika

$$\frac{dE_s}{dh} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dh} \left(h + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \right) = 0$$

$$1 + \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dh} (A^{-2}) = 0 \Rightarrow 1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dh} = 0$$



$D = A/B$, disebut radius hidraulis rerata

A = luas tampang basah

W = lebar muka air

Fr = bilangan Froude

θ = sudut kemiringan dasar saluran

- Persamaan menjadi

$$1 - \frac{\alpha Q^2 W}{gA^3} = 0 \Rightarrow \frac{\alpha Q^2 W}{gA^3} = 1$$

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{W} \quad \text{1}$$

$$1 - \frac{\alpha Q^2 W}{gA^3} = 0 \Rightarrow \frac{\alpha Q^2}{gA^2} = \frac{A}{W}$$

$$\frac{\alpha V^2}{g} = D \Rightarrow \frac{V^2}{g \frac{D}{\alpha}} = 1$$

$$\frac{V}{\sqrt{g \frac{D \cos \theta}{\alpha}}} = 1 \Rightarrow Fr = 1 \quad \text{2}$$

Energi Spesifik Minimum

- Dari Pers. 1 dan 2

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{W} \quad \text{①}$$

$$\frac{V}{\sqrt{g \frac{D}{\alpha}}} = 1 \Rightarrow Fr = 1 \quad \text{②}$$

- Diperoleh persamaan E_s minimum:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{W} \Rightarrow \frac{\alpha Q^2}{g A^2} = \frac{A}{W} \Rightarrow \alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2}$$

$$E_{s_{kr}} = h_{kr} + \alpha \frac{V_{kr}^2}{2g} \Rightarrow E_{s_{kr}} = h_{kr} + \frac{D_{kr}}{2} \quad \text{③}$$

E_s min. tampang 4 persegi panjang

- Dari $A = W \cdot h$

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{W} \Rightarrow \frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{W^3 h_{kr}^3}{W} \Rightarrow h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g W^2}} \quad \text{4}$$

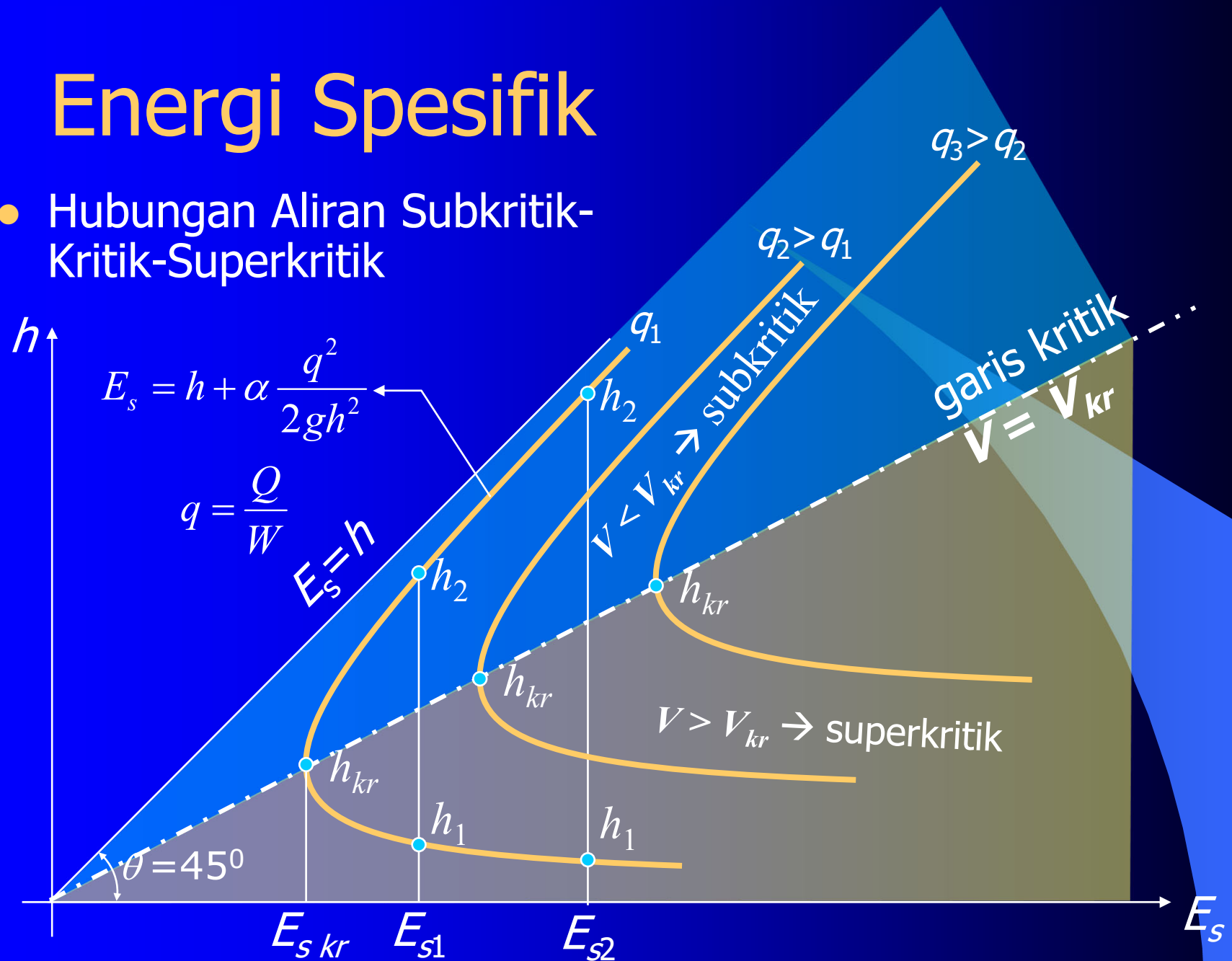
- Diperoleh persamaan E_s minimum:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{W} \Rightarrow \frac{\alpha Q^2}{g A^2} = \frac{A}{W} \Rightarrow \alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{h_{kr}}{2}$$

$$E_{s_{kr}} = h_{kr} + \alpha \frac{V_{kr}^2}{2g} \Rightarrow E_{s_{kr}} = h_{kr} + \frac{h_{kr}}{2} = 1,5 h_{kr} \quad \text{5}$$

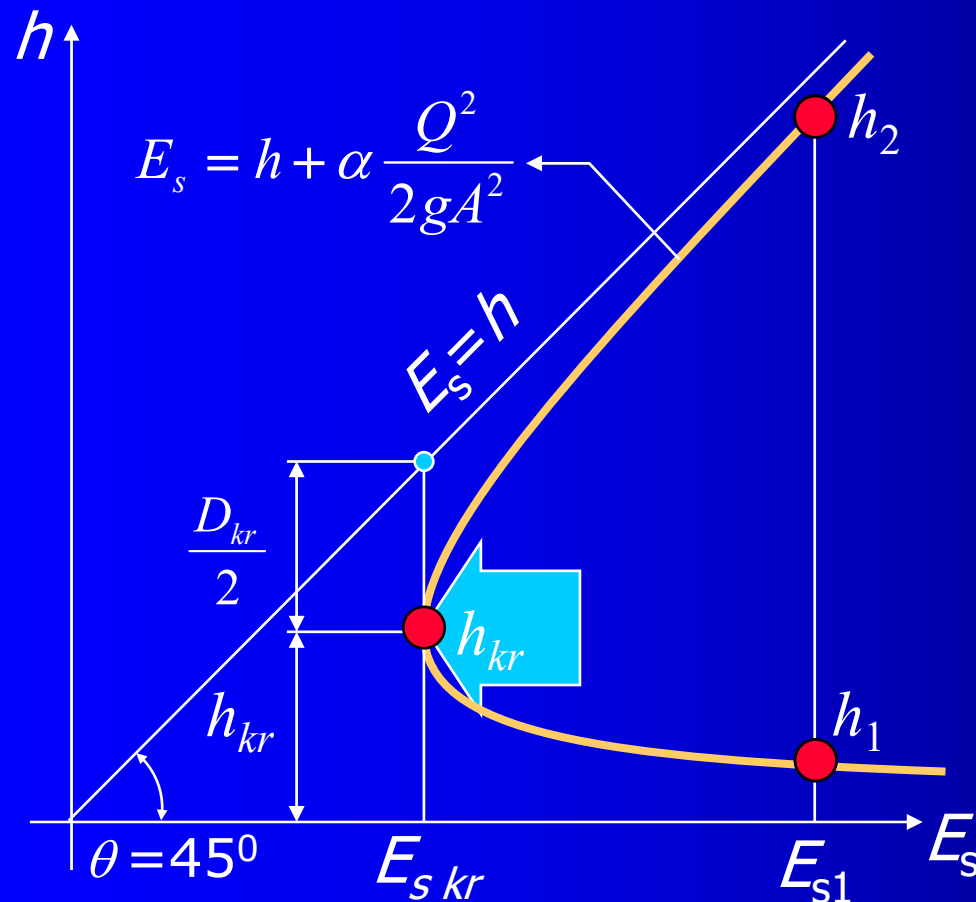
Energi Spesifik

- Hubungan Aliran Subkritik-Kritik-Superkritik



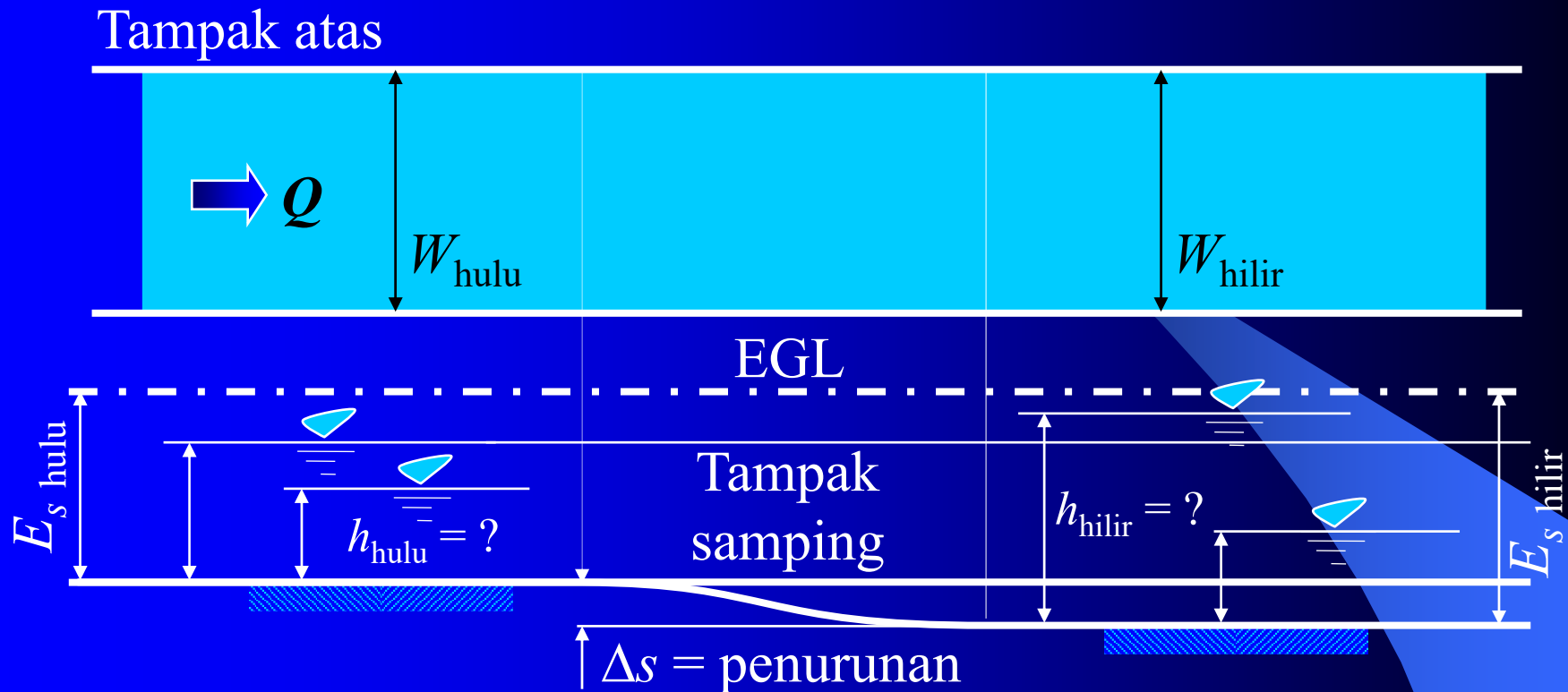
Energi Spesifik Minimum

$$E_{s_{kr}} = h_{kr} + \frac{D_{kr}}{2} \quad \textcircled{3}$$



- Perubahan aliran dari subkritis (h_2) menuju superkritis (h_1) atau sebaliknya akan melalui h_{kr}
- Pada saat melalui h_{kr} maka energi spesifik menjadi minimum.

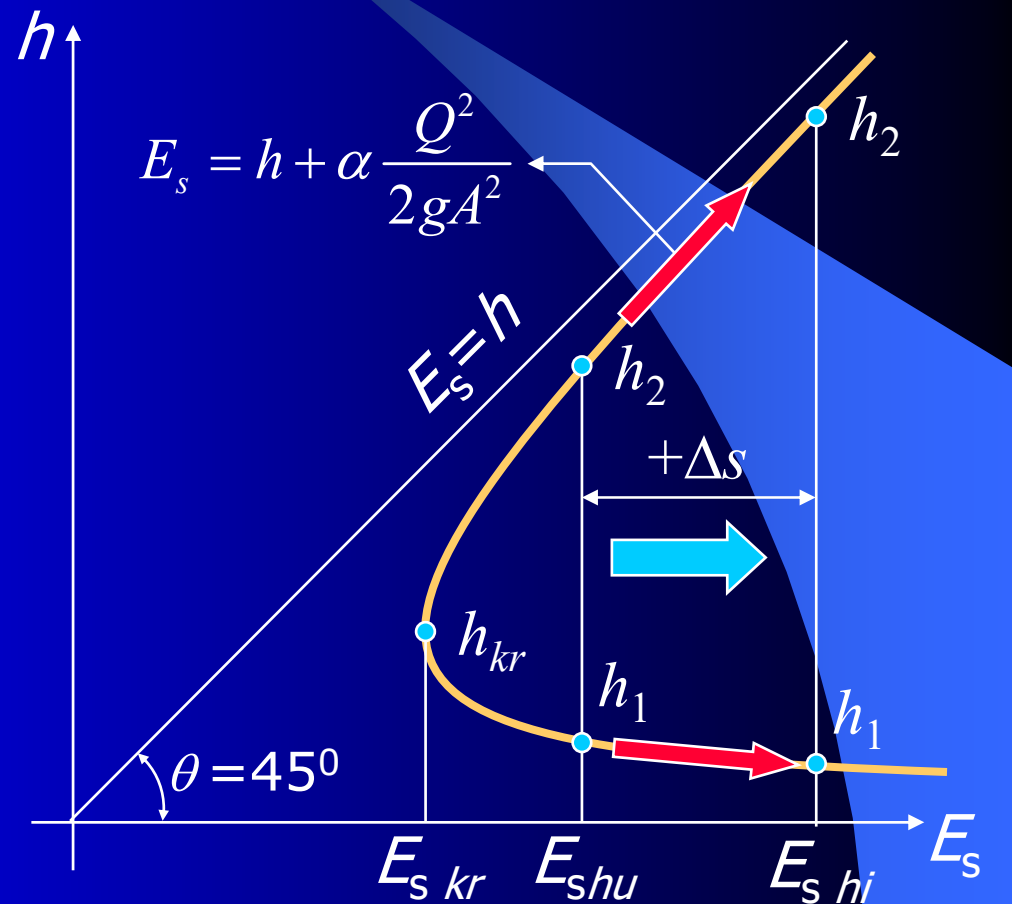
Kasus 1: Penurunan dasar saluran



- $E_{s\ hilir} = E_{s\ hulu} + \Delta s = h_{hulu} + \alpha \frac{Q^2}{2gA_{hulu}^2} + \Delta s$
- Berapa muka air di hilir jika muka air di hulu penurunan dasar saluran diketahui?

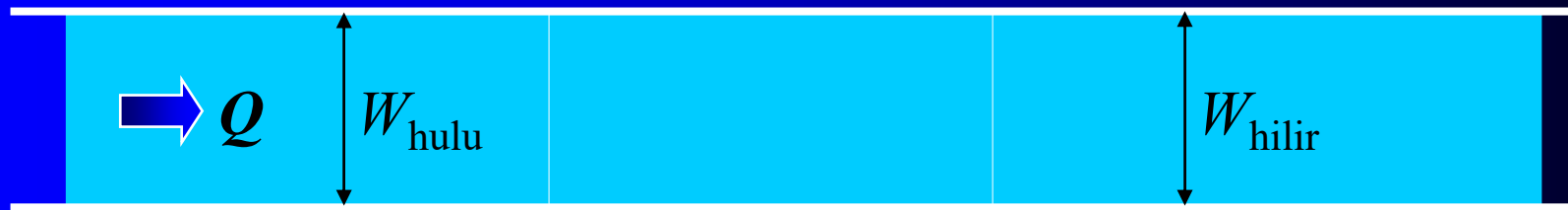
Penambahan E_s (penurunan dasar)

- Jika E_s bertambah (ke kanan) dari E_s hulu ke E_s hilir maka:
 - ❖ Pada aliran **superkritik** muka air harus **turun**, sedangkan
 - ❖ Pada aliran **subkritik** muka air harus **naik**



Aliran pada penurunan dasar saluran

Tampak atas



Tampak samping



Tampak samping



Contoh soal

- Suatu saluran dengan tampang lintang empat persegi panjang, lebar dasarnya $W = 1,50$ m, kedalaman airnya $H = 2,00$ m dan debit aliran $Q = 6,00$ m³/detik serta nilai percepatan gravitasi, $g = 9,81$ m/detik².
- Di lokasi tertentu saluran dirancang untuk diturunkan dasarnya sebesar $\Delta s = 0,50$ m, secara kontinu tanpa terdapat kehilangan tenaga. Hitung elevasi muka air di sebelah hilir penurunan saluran.

Langkah Hitungan

- Hitung $E_{s \text{ hulu}} = h_{\text{hulu}} + \alpha \frac{Q^2}{2gA_{\text{hulu}}^2}$
- Hitung $E_{s \text{ hilir}} = E_{s \text{ hulu}} + \Delta S$
- Hitung h_{hilir} dari persamaan

$$E_{s \text{ hilir}} = h_{\text{hilir}} + \alpha \frac{Q^2}{2gA_{\text{hilir}}^2} = h_{\text{hilir}} + \alpha \frac{Q^2}{2g(W h_{\text{hilir}})^2}$$

Penentuan jenis aliran

Diketahui

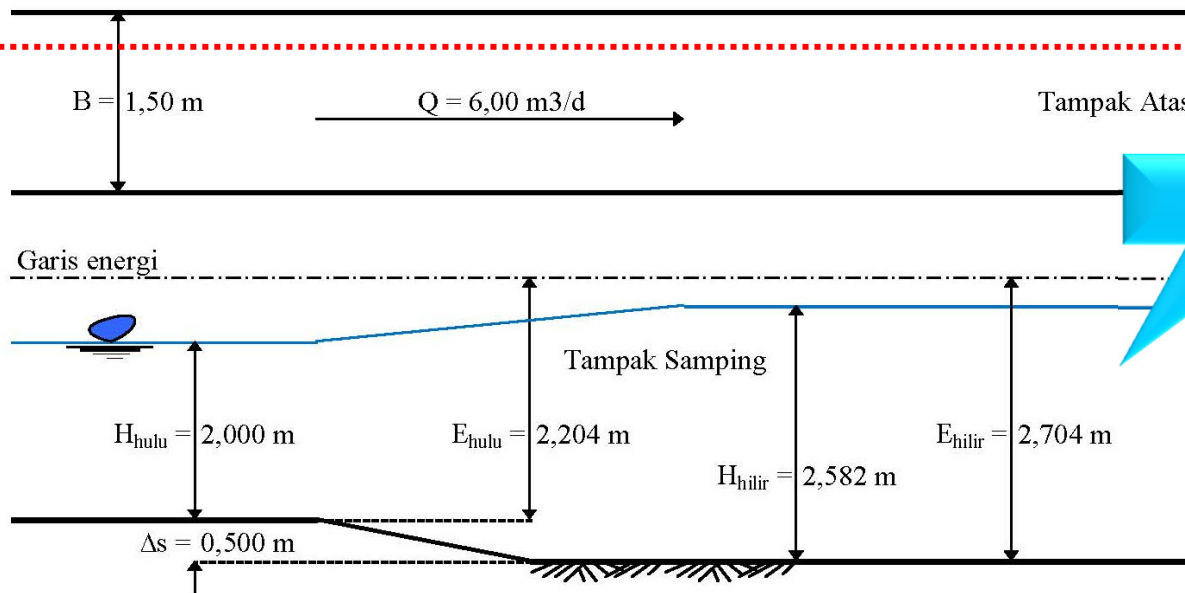
Hitungan E_s hilir

Jawaban Soal Energi Spesifik: Penurunan Saluran

DIKETAHUI	DIHITUNG
$B_{hulu} = 1,50 \text{ m}$ $H_{hulu} = 2,00 \text{ m}$ $\Delta s = 0,50 \text{ m}$ $Q = 6,00 \text{ m}^3/\text{det}$ $g = 9,81 \text{ m/det}^2$	1 $A_{hulu} = 3,000 \text{ m}^2 (= B_{hulu} \cdot H_{hulu})$ $V_{hulu} = 2,000 \text{ m/det} (= Q / A_{hulu})$ $E_{hulu} = 2,2039 \text{ m} (= H_{hulu} + V_{hulu}^2/2g)$ $E_{hilir} = H_{hilir} + V_{hilir}^2/2g = E_{hulu} + \Delta s$ $2,7039 = H_{hilir} + Q^2/(2g \cdot B^2 \cdot H_{hilir}^2) \dots \text{Pers.(1)}$
H kritis di hulu jika $Fr = 1$	Nilai H_{hilir} dihitung dengan Pers.(1) sbb:
$Fr = V_{kritis}/\text{Sqrt}(g \cdot A_{kritis}/B_{hulu}) = 1$ $H_{kritis} = 1,1771 \text{ m} < H_{hulu}$, subkritis, atau $V_{kritis} = 3,3982 \text{ m/det} > V_{hulu}$, subkritis	2 $2,7039 = H_{hilir} + 0,81549/H_{hilir}^2$ $H_{hilir} = 2,5815 \text{ m}$, (digunakan; karena aliran subkritis) 3 $H_{hilir} = 0,6266 \text{ m}$, (tidak digunakan)

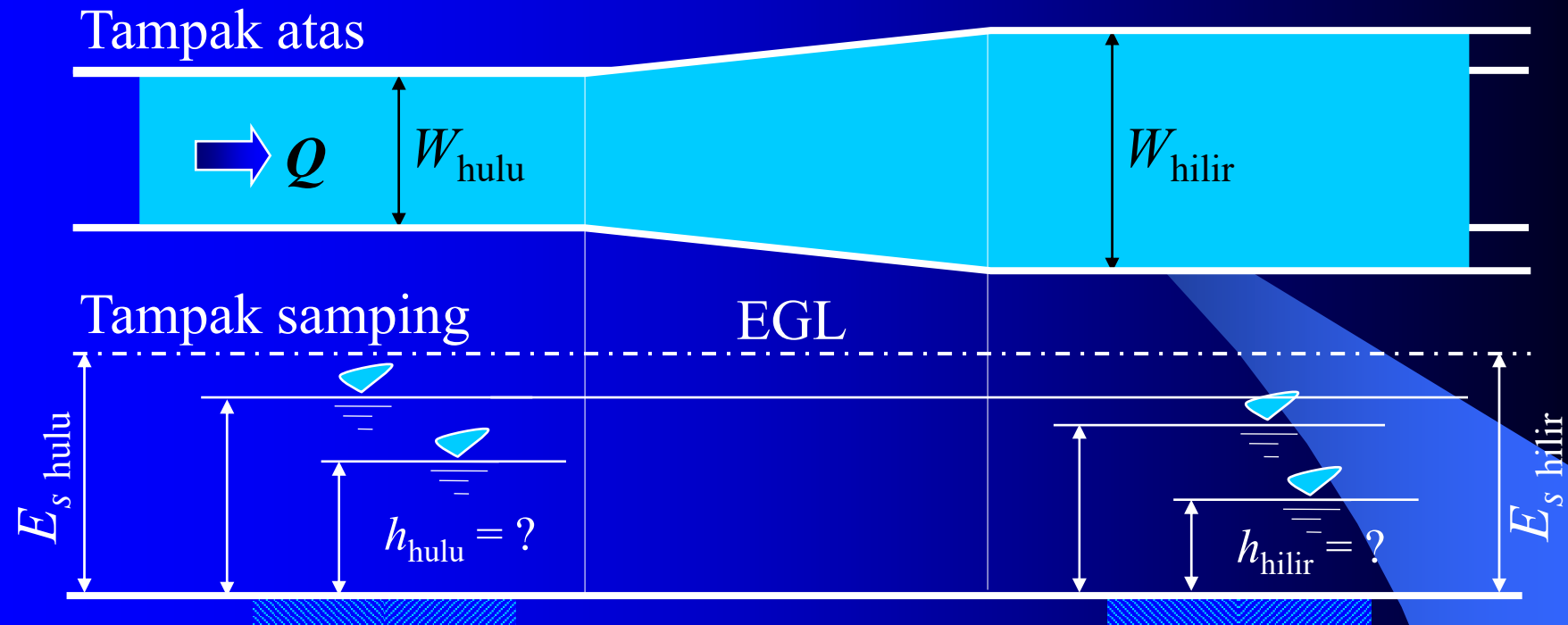
Hitungan iterasi!

Jawaban



Sketsa

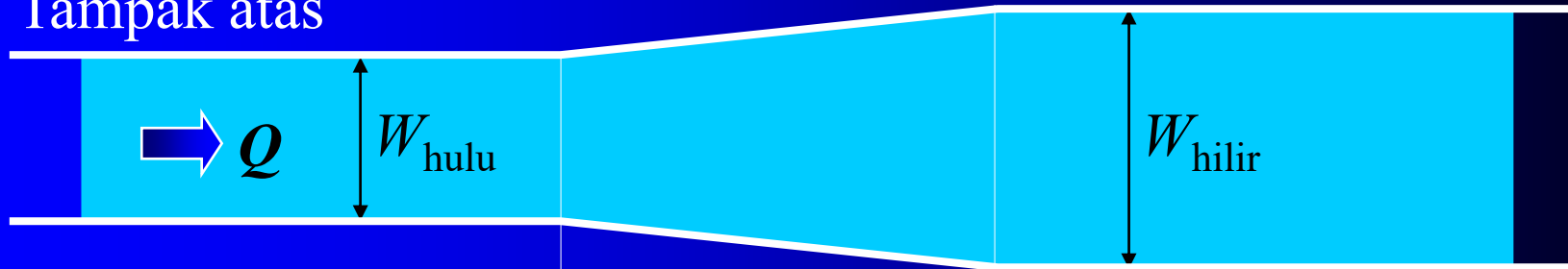
Kasus 2: Pelebaran dasar saluran



- $E_{s \text{ hilir}} = E_{s \text{ hulu}}$
- Berapa muka air di hilir jika muka air di hulu pelebaran dasar saluran diketahui?

Pelebaran saluran

Tampak atas



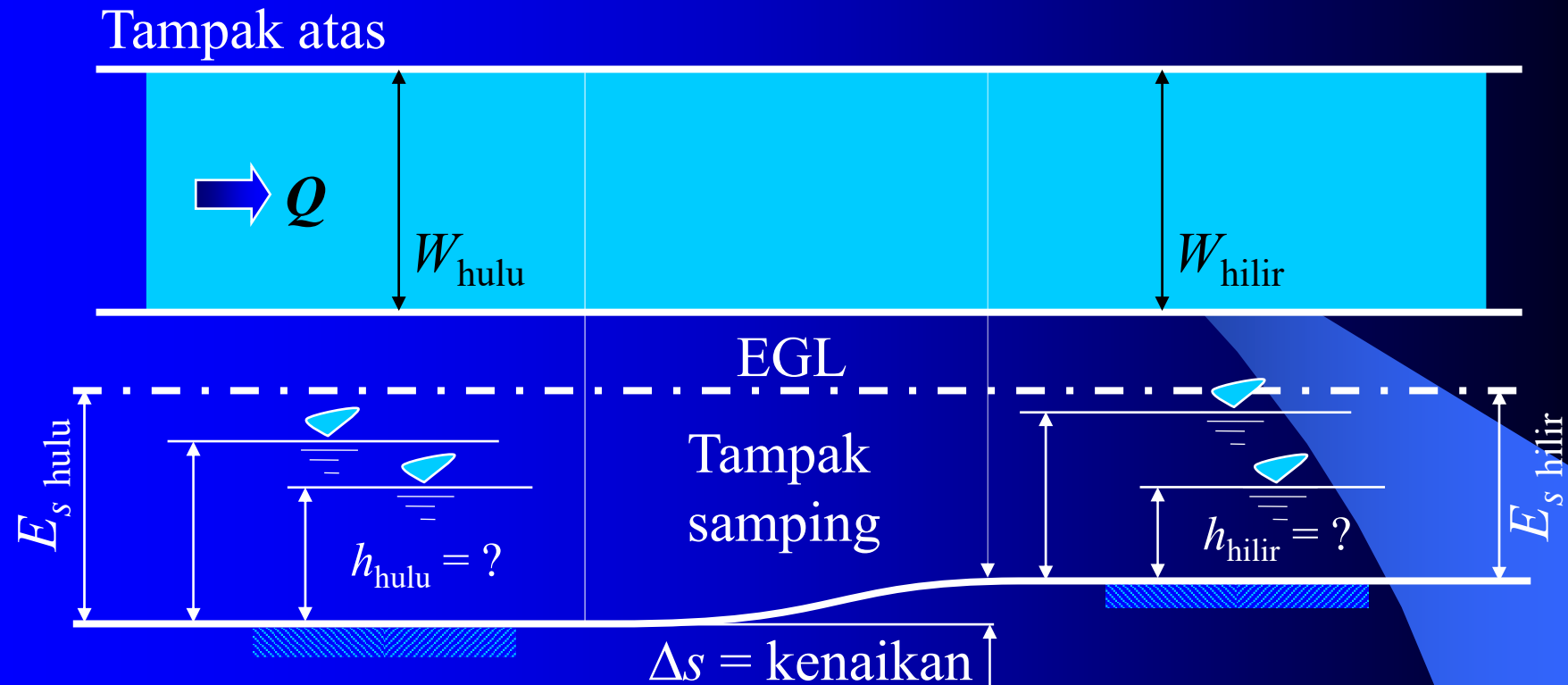
Tampak samping



Tampak samping



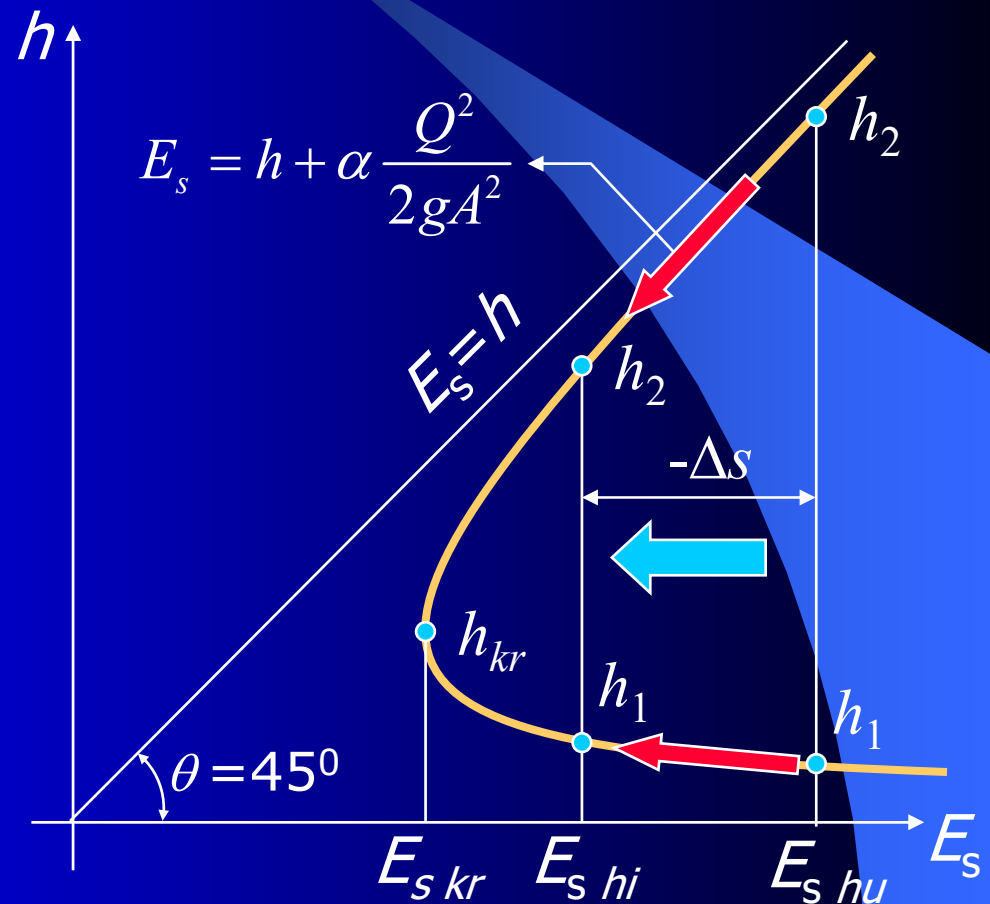
Kasus 3A: Kenaikan dasar saluran



- $E_{s \text{ hilir}} = E_{s \text{ hulu}} - \Delta s$
- Berapa muka air di hilir jika muka air di hulu kenaikan dasar saluran diketahui?

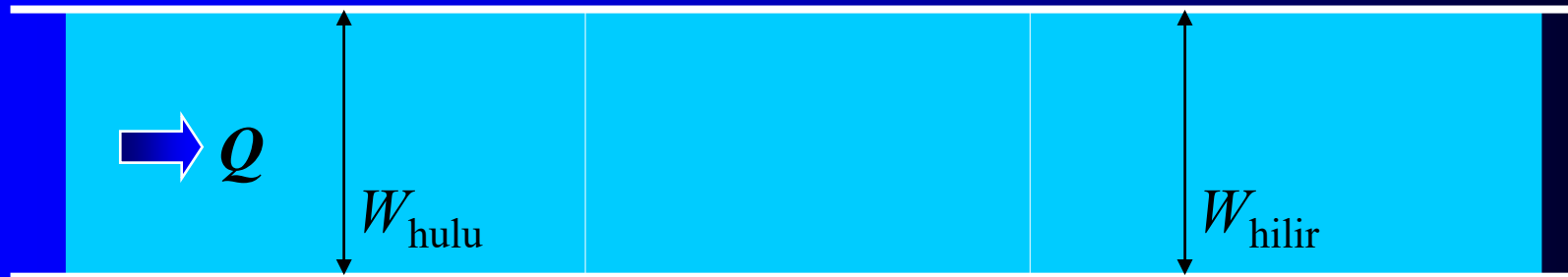
Pengurangan E_s (kenaikan dasar)

- Jika E_s berkurang dari $E_{s hu}$ ke $E_{s hi}$ maka:
 - ❖ Pada aliran **superkritik** muka air harus **naik**, sedangkan
 - ❖ Pada aliran **subkritik** muka air harus **turun**



Kenaikan dasar saluran

Tampak atas



Tampak samping

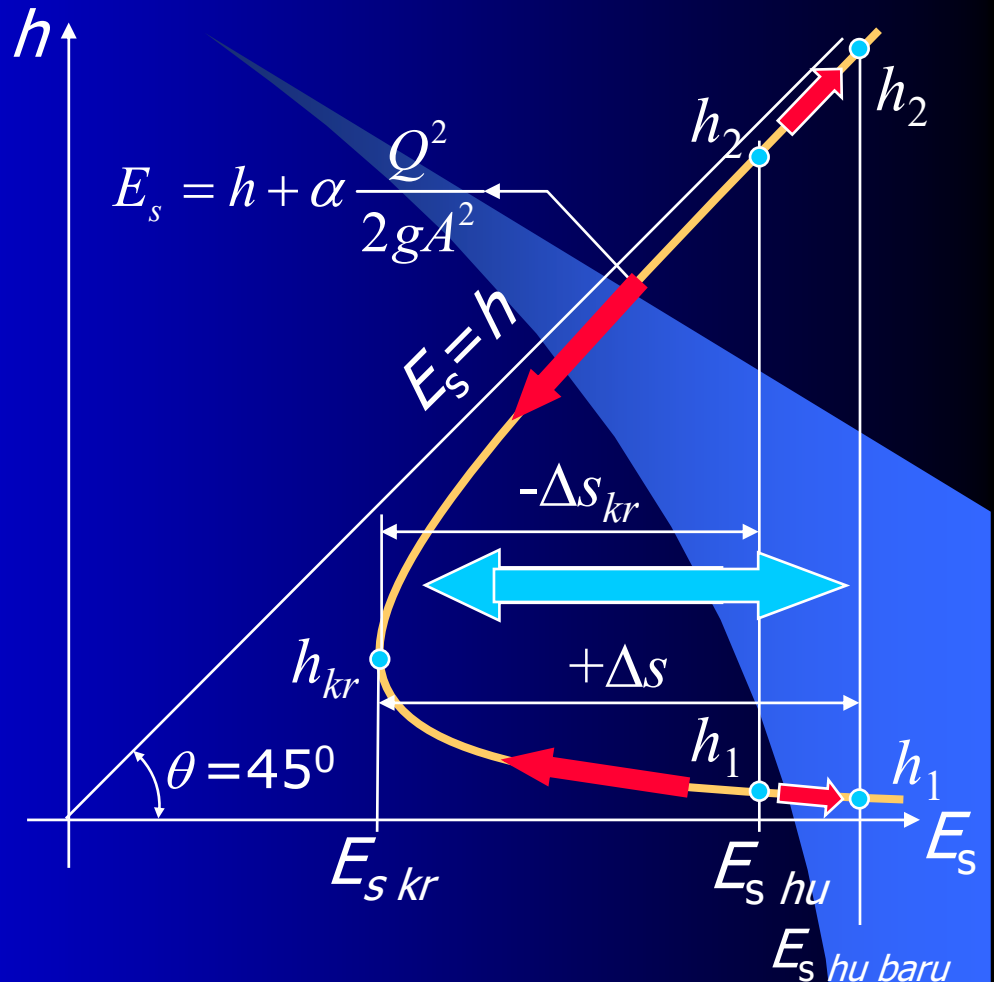


Tampak samping



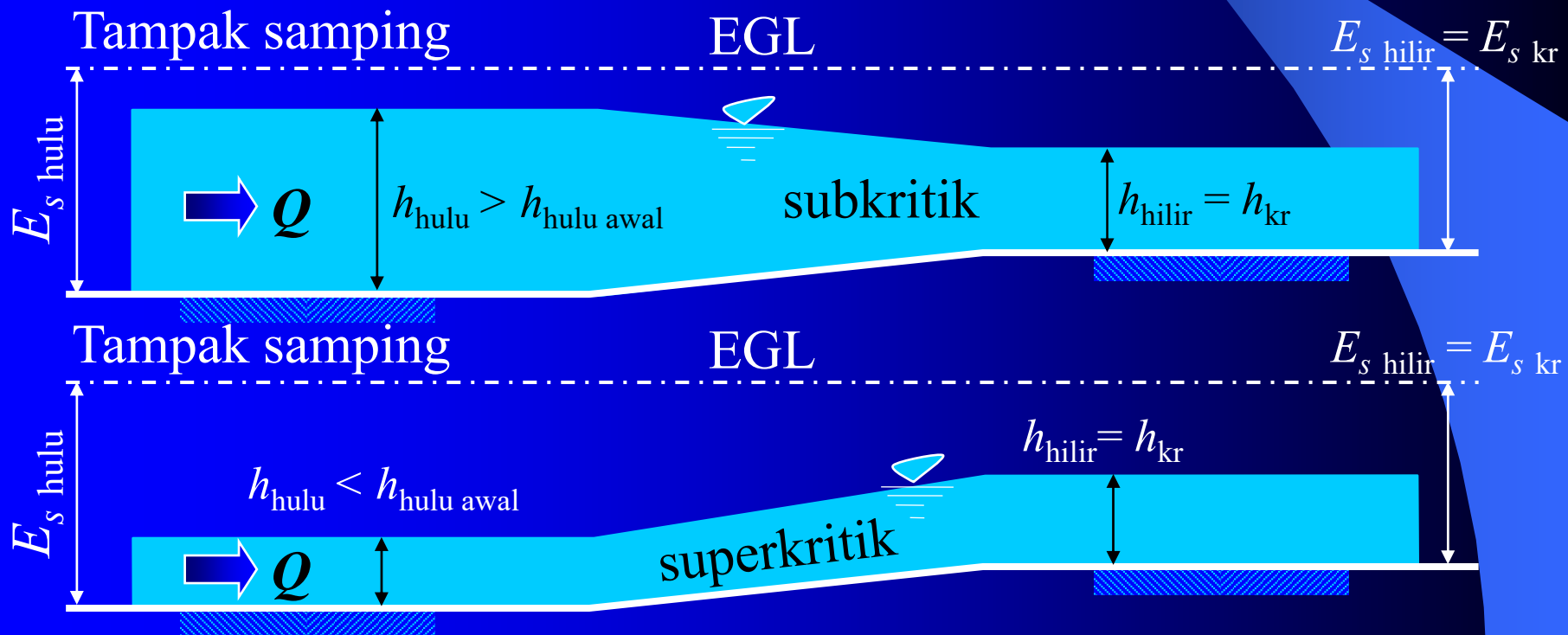
Kasus 3B: Pengurangan E_s (kenaikan dasar kritik)

- Jika E_s berkurang dari $E_{s hu}$ ke $E_{s kr}$ maka:
 - ❖ Pada aliran **superkritik** muka air harus **naik**, sedangkan
 - ❖ Pada aliran **subkritik** muka air harus **turun** sampai mencapai h_{kr}
- Jika dasar saluran dinaikkan lagi maka muka air hulu berubah untuk menambah E_s yaitu $E_s = E_{s kr} + \Delta S$.



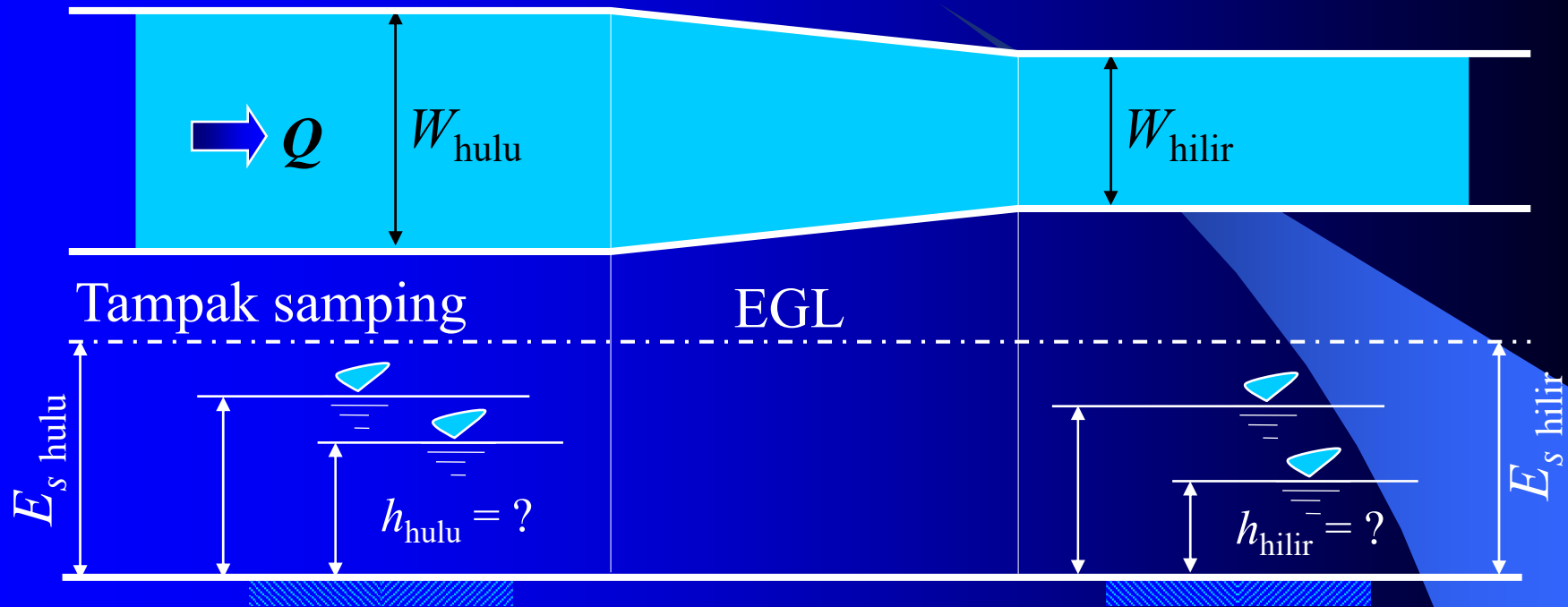
Kenaikan dasar saluran kritik

- Jika kenaikan dasar (Δs) sama atau lebih besar dari kenaikan kritik, maka di hilir tonjolan akan terjadi pengaliran kritik, sehingga kedalaman saluran hilir adalah h_{kr}
- Jika kenaikannya (Δs) melebihi kenaikan kritik, maka muka air di sebelah hulu tonjolan akan berubah.



Kasus 4A: Penyempitan dasar saluran

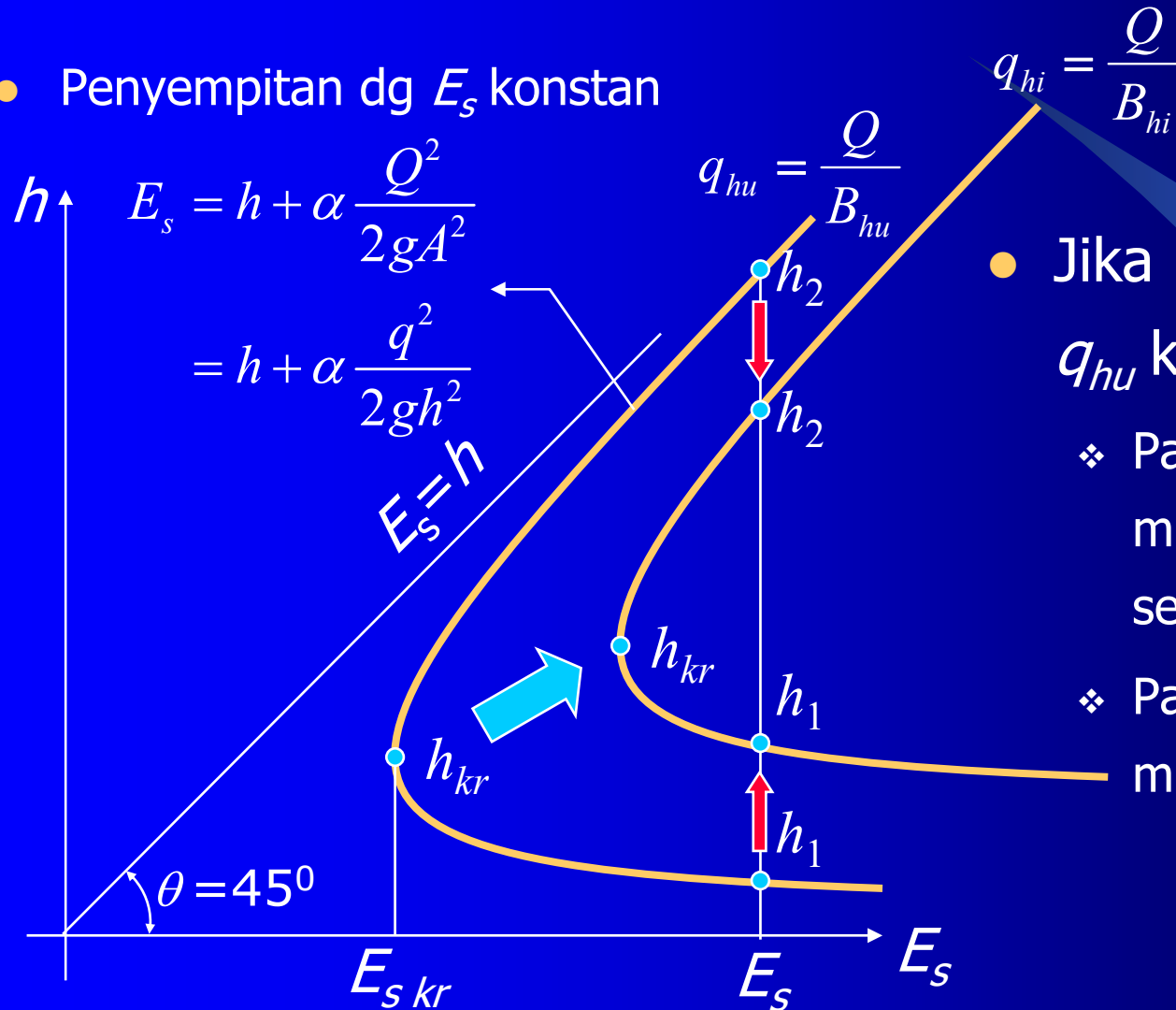
Tampak atas



- $E_{s\ hilir} = E_{s\ hulu}$
- Berapa muka air di hilir jika muka air di hulu penyempitan dasar saluran diketahui?

Penambahan q (penyempitan)

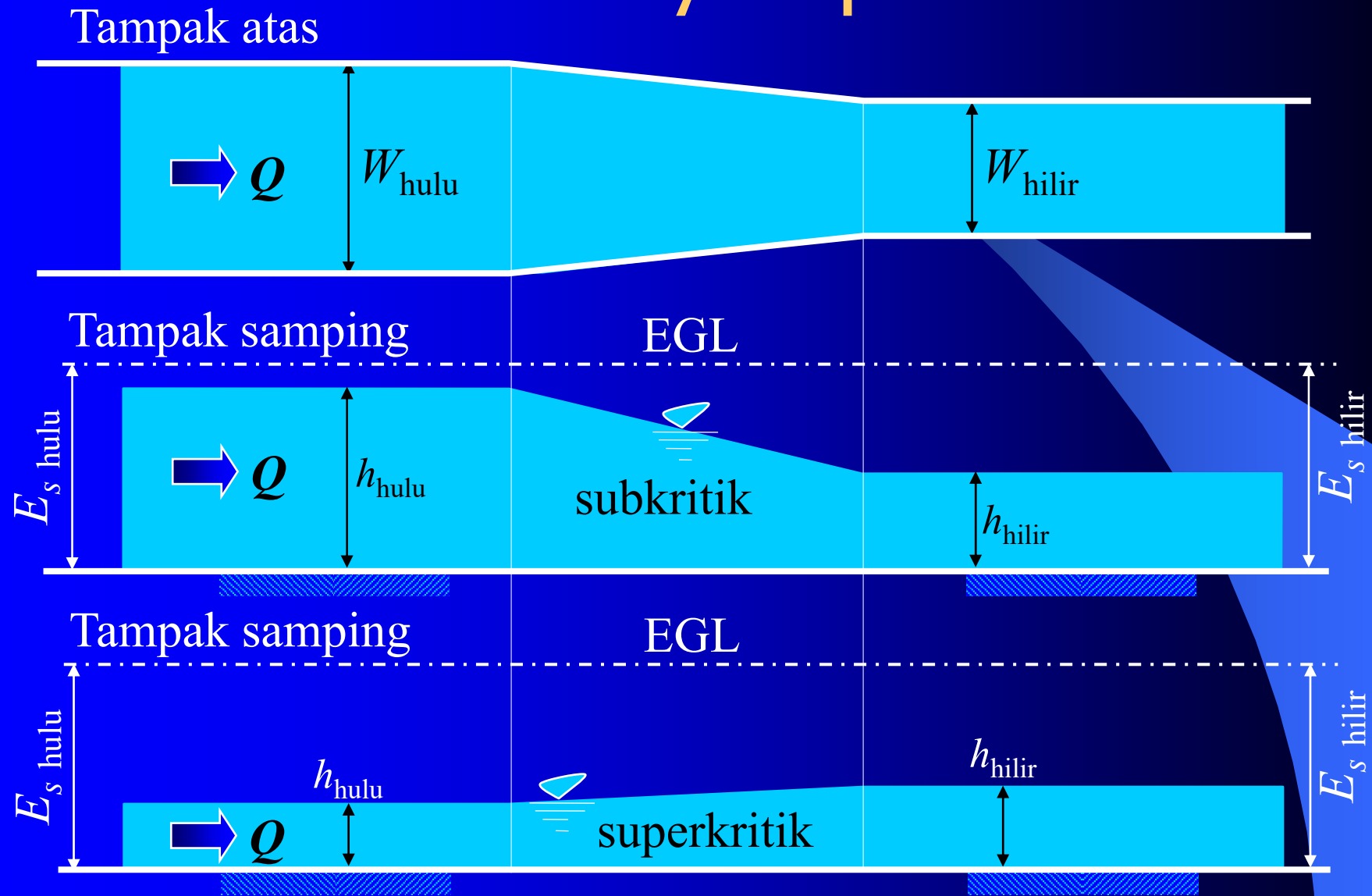
- Penyempitan dg E_s konstan



- Jika q bertambah dari q_{hu} ke q_{hi} maka:

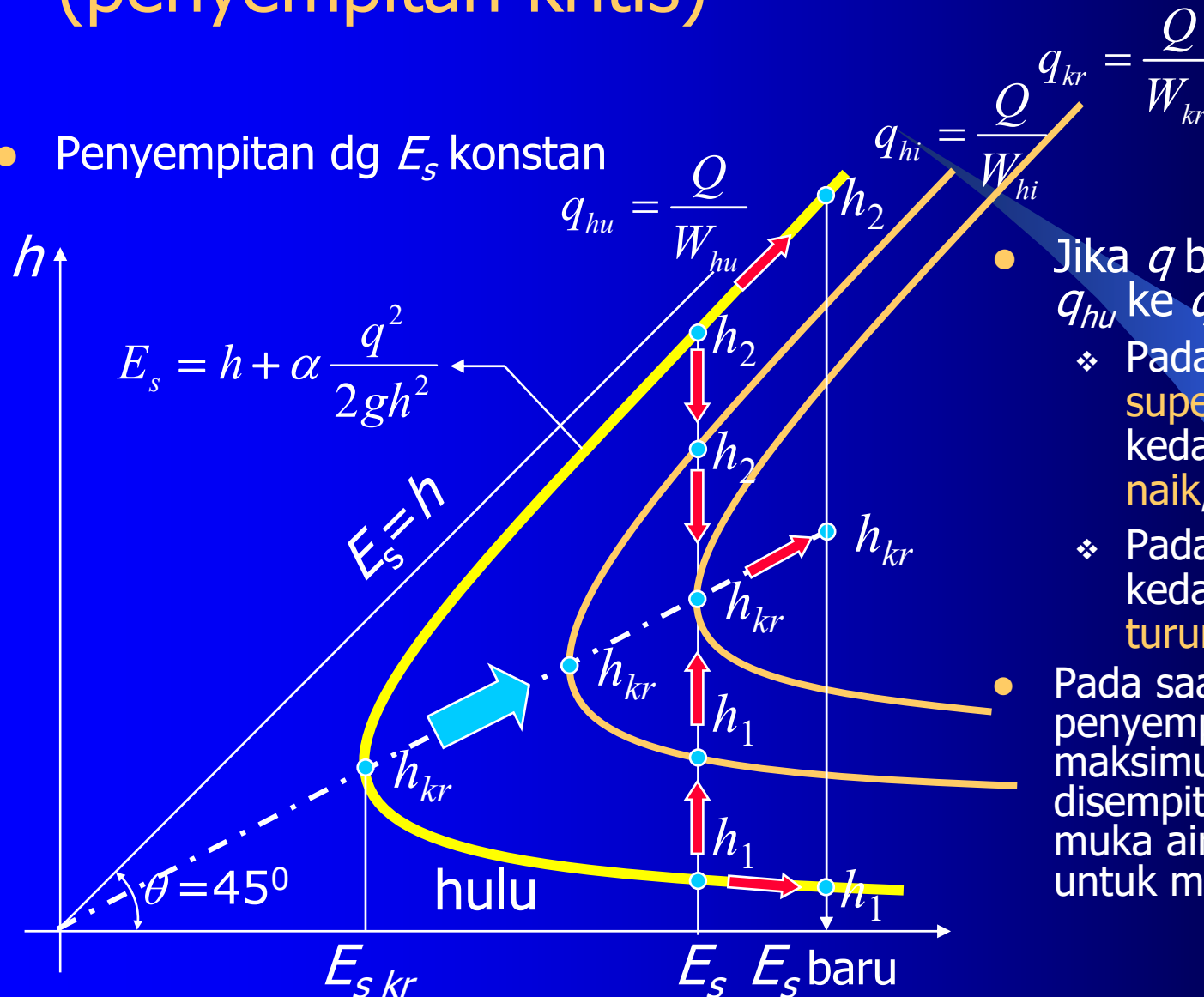
- ❖ Pada aliran **superkritik** muka air harus **naik**, sedangkan
- ❖ Pada aliran **subkritik** muka air harus **turun**

Penyempitan saluran



Kasus 4B: Penambahan q (penyempitan kritis)

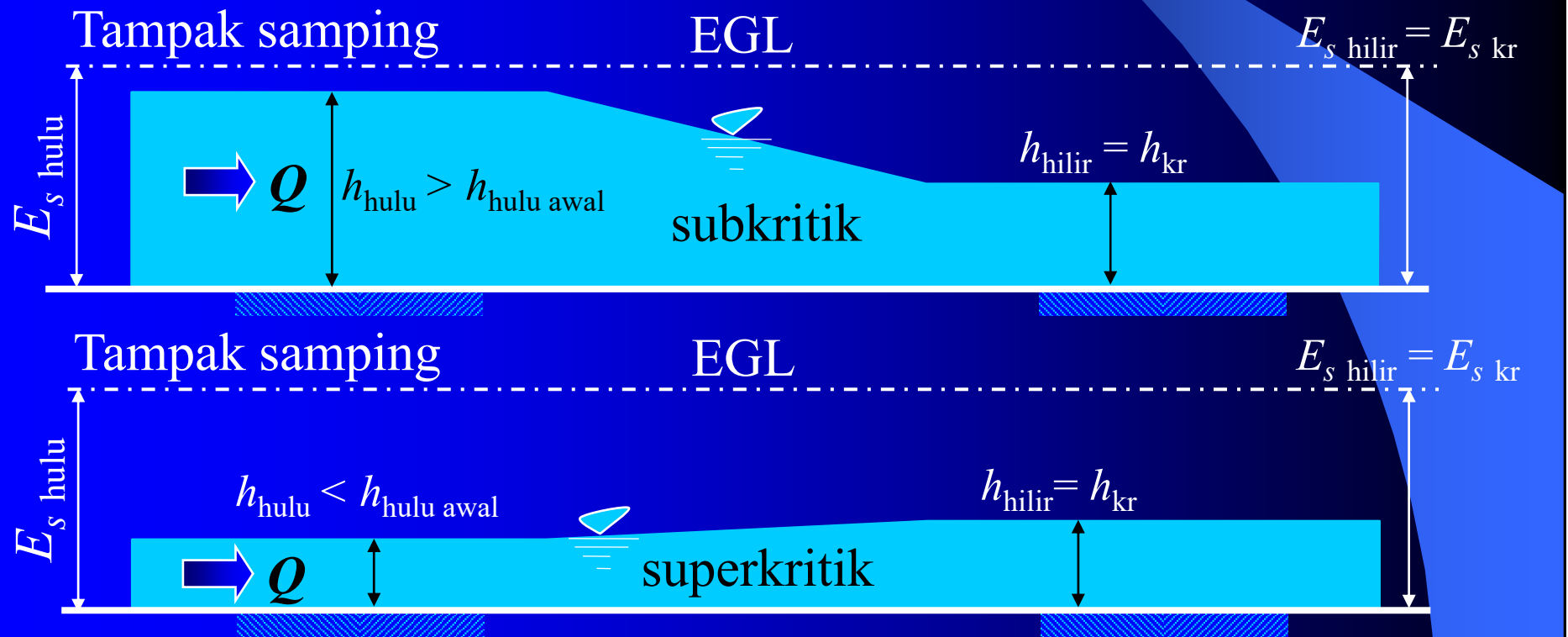
- Penyempitan dg E_s konstan



- Jika q bertambah dari q_{hu} ke q_{hi} maka:
 - ❖ Pada aliran **superkritik** kedalaman air harus **naik**, sedangkan
 - ❖ Pada aliran **subkritik** kedalaman air harus **turun**
- Pada saat kritis, maka penyempitan menjadi maksimum. Jika disempitkan lagi maka muka air hulu berubah untuk menambah E_s .

Penyempitan saluran kritis

- Jika penyempitan sama atau melebihi penyempitan kritis, maka di hilir penyempitan akan terjadi pengaliran kritis, sehingga kedalaman saluran hilir adalah h_{kr}
- Jika penyempitan melebihi penyempitan kritis, maka muka air di sebelah hulu penyempitan akan berubah.



Resume Langkah hitungan

1. Hitung E_s yang tersedia di hulu (Q, h diketahui)
2. Hitung E_s hilir sesuai kondisi lapangan
3. Cek apakah E_s hilir mencukupi untuk mengalirkan air:
 - a) Jika mencukupi (kondisi hilir tergantung hulu)
 - i. Hitung h_{hilir} (*trial & error*) dengan E_s hilir (= E_s hulu)
 - b) Jika tidak mencukupi (kondisi hulu tergantung hilir)
 - i. Terjadi kondisi kritis di hilir (agar E_s minimum)
 - ii. Hitung E_s hilir kritik
 - iii. Hitung E_s hulu yang sesuai dengan E_s hilir kritik
 - iv. Hitung h_{hulu} dengan E_s hulu (*trial & error*)

E_s : Permasalahan Lapangan

Penjelasan kasus penurunan, pelebaran, penaikan, dan penyempitan saluran yang disajikan di depan merupakan penjelasan untuk kasus lokal/setempat.

Pada permasalahan di lapangan, penyelesaiannya lebih rumit karena harus memperhatikan kondisi pengaliran di hulu maupun di hilirnya.

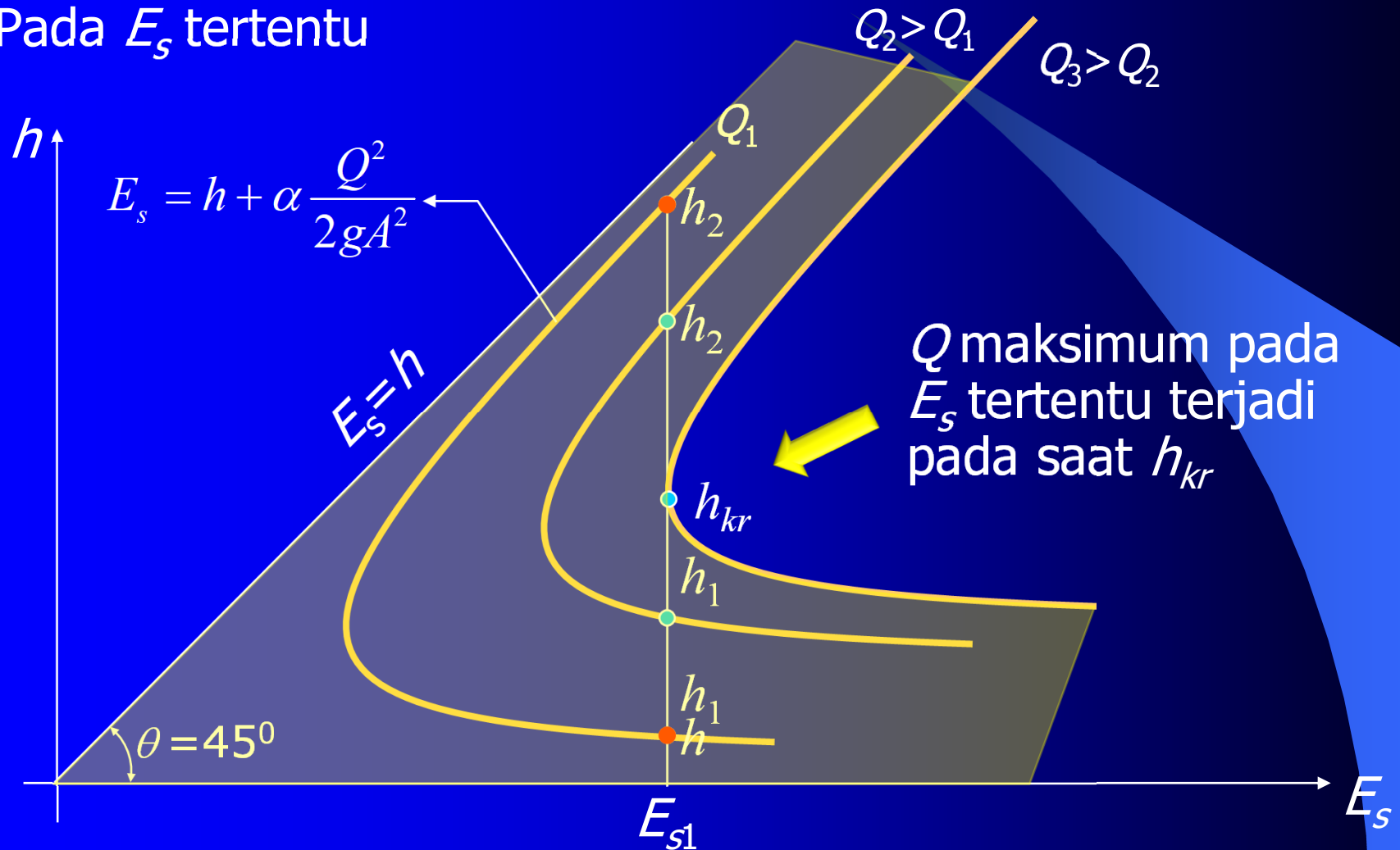
Penjelasan secara lengkap dibahas dalam topik PPTB (Pengaliran Permanen Tidak Beraturan)

Djoko Luknanto

TOPIK MENARIK

Q maksimum pada E_s tertentu

Pada E_s tertentu



Q maksimum pada E_s tertentu

Digunakan rumus energi spesifik:

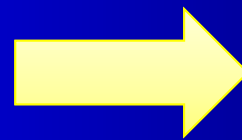
$$E_s = h + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \rightarrow \frac{\alpha}{2g} Q^2 = (E_s - h) A^2$$

$$\frac{\alpha}{2g} 2Q \frac{dQ}{dh} = -A^2 + (E_s - h) 2A \frac{dA}{dh}$$

Q maksimum jika $dQ/dh = 0$

$$0 = -A + 2(E_s - h)W \rightarrow E_s = \frac{A}{2W} + h \rightarrow E_s = h + \frac{D}{2}$$

$$E_{s_{kr}} = h_{kr} + \frac{D_{kr}}{2} \text{ ③}$$



Jadi pada E_s tertentu
 Q maksimum terjadi
pada kondisi kritik

Kondisi normal aliran

- Kondisi normal-ideal sebuah aliran terjadi pada aliran permanen beraturan.
- Pada kondisi ini diberlakukan rumus kecepatan rerata Chezy, Manning atau yang sejenis. Kedalaman aliran pada kondisi ini disebut H_n kedalaman air normal.

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

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

Kedalaman normal H_n

Chezy

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

$$\frac{Q}{A} = C \sqrt{RI_e}$$

$$\frac{Q^2}{C^2 A^2} = RI_e$$

$$\boxed{\frac{Q^2}{C^2 I_e} = \frac{A^3}{P}}$$

Manning

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

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

$$\frac{n^2 Q^2}{A^2} = R^{4/3} I_e$$

$$\boxed{\frac{n^2 Q^2}{I_e} = \frac{A^{10/3}}{P^{4/3}}}$$

Kedalaman Air

Normal H_n

$$\frac{Q^2}{C^2 I_e} = \frac{A^3}{P}$$

$$\frac{\delta Q^2}{I_e} = \frac{A^3}{P}$$

Kritik h_{kr}

$$1 - \frac{\alpha Q^2 W}{g A^3} = 0$$

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{W}$$