

# BANGUNAN TENAGA AIR

oleh:

P. Mardjikoen

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik  
Universitas Gadjah Mada  
Yogyakarta  
1987

## Proyek Serbaguna ("multiple purpose project")

Proyek-proyek ini dimanfaatkan untuk tujuan/kegunaan ganda a.l. :

1. pembangkit tenaga listrik (murah) - hydro electric power
2. pengendalian/pencegahan banjir - flood control/protection
3. pengairan - irrigation
4. penyediaan air domestik & industri - domestic & industrial water supply
5. perikanan darat & satwa liar - fish and wild life
6. lalu lintas air - navigation (inland)
7. pengendalian kadar garam dan sedimen - salinity and sediment control
8. rekreasi dan pariwisata - recreation and tourism
9. penanggulangan pencemaran air - water pollution abatement

- Contoh : - Proyek Bendungan Aswan (Nile project) di Mesir  
US\$ 246 juta
- Tennessee Valley Authority Project di USA (TVA)
  - Niva Project & Jenissei Project di Uni Soviet
  - Damodar Project
  - Bakhra-Nagal Project & di India
  - Snowy Mountain River Scheme di Australia
  - Bhumiphol Project di Thailand
  - Volta River Project di Ghana
  - Tone River Project di Japan
  - Tsengwen Multipurpose Project di Taiwan
  - Zambesi Dam Project di Afrika Selatan
  - Jaliuhur Project, Karanghetas Project, Asahan Project di Indonesia
  - Itaipu Dam Project di Paraguay/Brazil/  
12600 MW

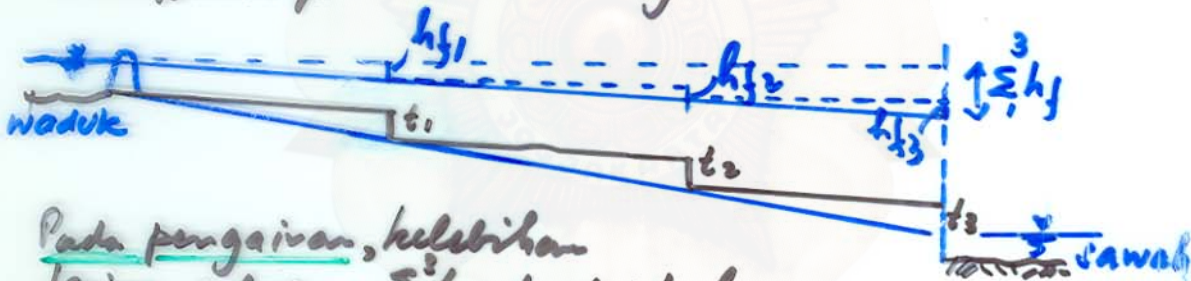
- PLTA Larona pada K. Larona 165 MW
  - PLTA Saguling pada K. Citarum 600 MW
  - " Jabigede " K. Cimamuk 800 MW
  - " Cirata " K. Citarum 500 MW (500 KV)
- Daya terpasang  
(installed capacity)

• Laju kebutuhan tenaga listrik di Indonesia

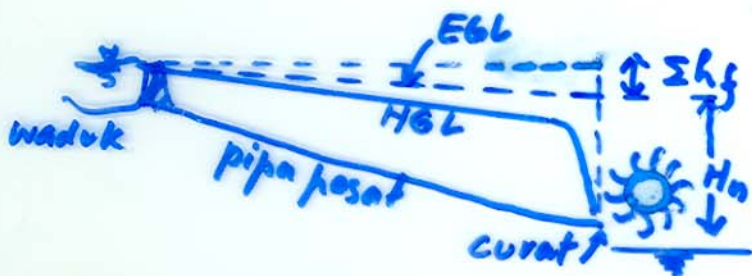
$$P_t = P_0 a^t$$

- $P_t$  : kebutuhan sesudah  $t$  tahun
- $P_0$  : " pada suatu tahun
- $t$  : berapa tahun kemudian
- $a$  : 1.15 ( sesudah P.D.II )
- : 1.10 ( sebelum P.D.II )

• Beda prinsip BTA dan Pengaliran



Pada pengaliran, kelebihan terjun sebesar  $\sum t = t_1 + t_2 + t_3$  harus di hancurkan dalam bentuk terjunan agar kecepatan air di sawah tak terlalu besar  $\rightarrow$  erosi.



Pada BTA,  $\sum h_f$  harus minimum agar  $H_n$  max, karena akan dijual sebagai tenaga listrik

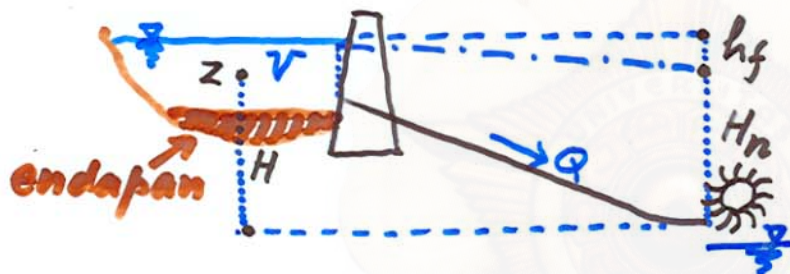
Kecepatan corat :  $v_n = \sqrt{2gH_n}$  yang menggerakkan turbin impuls. Daya turbin  $P = \eta \cdot 13.33 Q H_n$  DK.

DAYA DAN ENERGI.

## \* Dasar-dasar Tenaga Air ("the constituents of waterpower") :

- debit  $Q$
  - terjun  $H$
- > Keduanya variabel dengan waktu dan tempat, dan harus ditentukan berdasar survei seteliti mungkin selama jangka waktu cukup panjang (10 à 20 tahun).

## \* Hubungan antara energi dan volum.



$$E = V \gamma H$$

$$E = \text{energi (tm)}$$

$$V = \text{volum (m}^3\text{)}$$

$$\gamma = \text{BJ (t/m}^3\text{)}$$

$$H = \text{terjun (m)}$$

Dalam praktek karena adanya kehilangan tenaga akibat gesekan dll. secara praktis rumus menjadi

$$E_p = \eta V \gamma H$$

$\eta$  = rendemen atau efisiensi  
(tanpa dimensi)

## \* Hubungan antara daya dan debit.

$$P = Q \gamma H$$

$P$  = daya (tm/det)  
 $Q$  = debit (m<sup>3</sup>/det)  
 $\gamma$  = BJ (t/m<sup>3</sup>)  
 $H$  = terjun (m)

Praktis rumus menjadi:

$$P_p = \eta Q \gamma H$$

$\eta$  = rendemen atau efisiensi

Dalam praktek teknik tenaga satuan-satuan tersebut diatas tidaklah lazim, maka perlu diubah seperti di bawah ini.

\* Rumus-rumus transformasi:

$$(a) \quad \underline{1 \text{ tm/det}} = 1000 \text{ kgm/det} \stackrel{1 \text{ DK} = 75 \text{ kgm/det}}{\downarrow} = \frac{1000}{75} \text{ DK} = \underline{13,33 \text{ DK}}$$

$$(b) \quad \underline{1 \text{ tm/det}} = 1000 \text{ kgm/det} \stackrel{1 \text{ kg(f)} = 9,8 \text{ N}}{\downarrow} = 1000 \times 9,8 \text{ Nm/det} = 9800 \text{ W} = \underline{9,8 \text{ kW}}$$

$$(c) \quad \underline{1 \text{ kWj}} \stackrel{1 \text{ tm} = 9,8 \text{ kwdet}}{\downarrow} = \frac{1}{9,8} \times 3600 \text{ tm} = \underline{367 \text{ tm}}$$

\* Rumus Daya air dan Tenaga air.

Rumus tenaga air:

$$E_p = \frac{\eta V H}{367}$$

(kWj)

$V$  = volum ( $\text{m}^3$ )

$H$  = terjun (m)

Rumus daya air:

$$P_p = 13,33 \eta Q H_n \text{ (DK)}$$

atau

$$P_p = 9,8 \eta Q H_n \text{ (kW)}$$

Catatan:  $\gamma_{\text{air}} = 1 \text{ t/m}^3$ .

$Q$  = debit ( $\text{m}^3/\text{det}$ )  
 $H_n$  = terjun neto (m)

## EFISIENSI (RENDEMEN) = $\eta$

Definisi : Efisiensi suatu sistem (mesin/alat) adalah daya yang ke luar dari sistem dibagi dengan daya yang masuk ke sistem tersebut, dikalikan dengan 100%.



$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

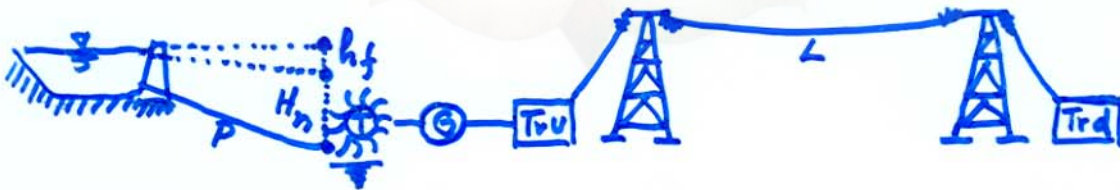
(tanpa dimensi)

Catatan : Jika pembilang dan penyebut dimensinya tidak sama, disebut :

$$\text{Produktivitas} = \frac{\text{output}}{\text{input}} \quad (\text{berdimensi})$$

\* Beberapa macam efisiensi.

Dalam sistem bangunan tenaga air lazim terdapat unsur-unsur sbb. :



$h_f$  = kehilangan tinggi tenaga akibat gesekan = 2-5%  $H_m$

$H_m$  = tejun neto

$P$  = pena pesat

$T$  = turbin

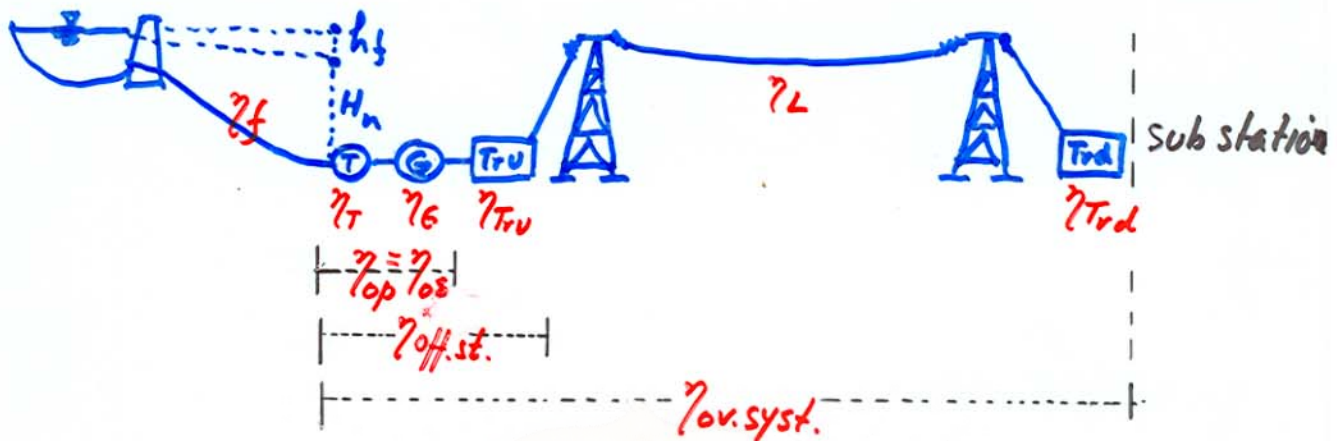
$G$  = generator

$Tru$  = Step up transformer

$Trd$  = Step down transformer

$L$  = high tension lines  
= transmission lines

\* Contoh efisiensi tiap unsur.



- $\eta_f$  = efisiensi gesekan }  $\eta_H$  = efisiensi hidrolisik  $\approx 95\%$   
 $\eta_{\phi}$  = " bocoran }  
 $\eta_T$  = " turbin = 85-95% Tergantung macam/tipe dan beban (Lih. gb. TA-40)  
 $\eta_G$  = " generator = 95%  
 $\eta_{Tru}$  = " trafo up = 98%  
 $\eta_L$  = " transmission lines = 95%  
 $\eta_{Trd}$  = " trafo down = 98%

\* Beberapa istilah efisiensi.

$$\left. \begin{array}{l} \text{(a) overall plant efficiency} \\ \text{(b) " station " "} \end{array} \right\} = \frac{\text{daya lepas generator} \times 100\%}{\text{daya masuk turbin}}$$

$$\eta_{op} = \eta_{os} = \eta_T \cdot \eta_G$$

(c) off station efficiency = efisiensi lepas sentral

$$\eta_{off.st.} = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru}. \quad (\text{Swedia})$$

$$(d) \text{ overall system efficiency} = \frac{\text{daya lepas trafo down}}{\text{daya masuk turbin}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{ov. syst}} = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{\text{Tru}} \cdot \eta_L \cdot \eta_{\text{Trd}}$$

catatan: • Karena tiap alat (khususnya turbin) efisiensinya tidak tetap, tetapi tergantung keadaan beban (Lih. gb. TA. 40), maka pernyataan efisiensi seyogyanya dikaitkan dengan keadaan beban. Misalnya pada:

1. full gate point : keadaan beban dengan pintu-pintu terbuka penuh ( $Q_{\text{max}}$ )  
Pada keadaan ini tidak dicapai  $\eta_{\text{max}}$
2. full load point : keadaan beban dengan  $\eta_{\text{max}}$   
Berarti kehilangan tenaga akibat gesekan minimum.  
(Barrows, 1942).

• Semua efisiensi tersebut di atas bila digunakan dalam rumus daya, harus dikaitkan dengan terjun neto ( $H_n$ ). Ini adalah konsensus!  
Misalnya:

$$\begin{aligned} \text{- Daya lepas turbin} &= 13.33 \eta_T Q H_n \text{ (DK)} \\ &= 9.8 \eta_T Q H_n \text{ (KW)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- Daya lepas sentral} &= 13.33 \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{\text{Tru}} Q H_n \text{ (DK)} \\ &= 9.8 \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{\text{Tru}} Q H_n \text{ (KW)} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & - \text{Daya di substation atau di tempat penjualan} \\
 & = 13.33 \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru} \cdot \eta_L \cdot \eta_{Tid} \cdot Q H_n \text{ (DK)} \\
 & = 9.8 \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru} \cdot \eta_L \cdot \eta_{Tid} \cdot Q H_n \text{ (KW)}
 \end{aligned}$$

TERJUN (HEAD) = H.

Di dalam teknik tenaga air dikenal berbagai istilah terjun sbb.:

1. Terjun bruto (Gross head):  $H_{br}$ .

Terjun bruto adalah selisih tinggi muka air di reservoir atas dengan tinggi muka air sesudah saluran pembuangan, jika turbin tidak berputar (tiada aliran air).  
(Lih. gb. TA-24).

2. Terjun neto (Net head):  $H_n$  atau  
Terjun efektif (Effective head):  $H_{eff}$

bibedakan 2 macam (menurut ASME: American Society of Mechanical Engineers)  
(a) pada turbin reaksi.

Terjun neto adalah selisih antara tenaga total (potensial + kinetik) yang terkandung dalam air tiap satuan berat, sebelum masuk rumah turbin dan sesudah ke luar dari pipa isap (draft tube).

Terjun neto adalah selisih tinggi tekanan dalam pipa pesat sebelum rumah turbin dengan tinggi air belakang, ditambah dengan tinggi kecepatan dalam pipa pesat sebelum rumah turbin, dikurangi dengan tinggi kecepatan di saluran pembuangan.

Hal tersebut di atas apabila turbin bekerja

(Lih. gb. TA-24).

(b) Pada turbin impuls.

Terjun neto adalah tinggi tekanan ditambah dengan tinggi kecepatan sebelum ujung curat ("nozzle"), dikurangi dengan tinggi titik terendah pada "pitch circle" dari sudu-sudu turbin. Yang terakhir ini umumnya sesuai dengan sumbu ujung curat.

(Lih. gb. TA-24 dan TA-36).

3. Terjun rencangan (Design head):  $H_d$

Terjun rencangan adalah terjun neto untuk perancangan turbin oleh pabrik dengan efisiensi yang terbaik. Umumnya terjun rencangan dipilih sedemikian rupa, sehingga pembangkitan tenaga rata-rata setahunnya dengan terjun di atas dan di bawah terjun rencangan, adalah sama.

#### 4. Terjun terukur (Rated head): $H_r$

Ada 2 definisi tbb.:

- Terjun terukur adalah terjun neto pada keadaan daya turbin yang dijamin oleh pabrik (dalam DK).
- Terjun terukur adalah terjun neto pada keadaan turbin dengan pintu-pintu terbuka penuh ("full gate point") memberikan kapasitas terukur ("rated capacity") generator dalam Kw.

#### CONTOH HITUNGAN PADA PLTA SIGURAGURA (ASAHAN).

$$H_{br} = 219 \text{ m} \quad \text{Diperkirakan } H_n = 216 \text{ m}$$

$$Q_{rk} = 80 \text{ m}^3/\text{det} \quad Q_{min} = 60 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\text{Efisiensi lepas sentral} = \eta_r \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tu} = 86\%$$

$$\begin{aligned} \text{Maka daya lepas sentral} &= \eta \cdot 9.8 Q H_n \text{ kw} \\ &= 0.86(9.8)(80)(216) = 145.000 \text{ Kw} \end{aligned}$$

Volum danau Toba ditaksir =  $3 \times 10^9 \text{ m}^3$  (tiap tahun terisi)  
 Jika terjun total antara danau Toba dan Selat Malaka yang dapat dimanfaatkan = 800 m  
 dan efisiensi overall system semua PLTA pada proyek Asahan ditaksir = 61%, maka jumlah tenaga air yang dapat diproduksi

$$E_{1th} = \frac{\eta V H}{367} = \frac{0.61(3 \times 10^9)(800)}{367} = 4.10^9 \text{ Kwj.}$$

Jika harga penjualan tenaga listrik = Rp 65/kwh,  
maka hasilnya tiap tahun adalah:

$4 \cdot 10^9 \times \text{Rp } 65,- = \text{Rp } 260 \text{ milyar.}$  (Hasil jika seluruh  
proyek Asahan telah  
telesai)

Perlu diingat bahwa PLTA bersifat • "self regenerative"  
• airnya "cost less"  
• tidak seberapa di-  
pengaruhi gerakan  
buruh.

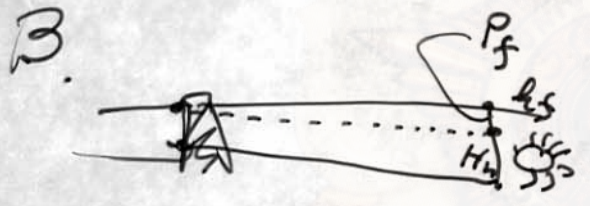
Keuntungan PLTA →



Dek.

Prinsip : Jumlah perongkosa takum (A) dan kehilangan tenaga disip. takum (B) dlu  $R_p$  harus min.

- A =
1. Biaya modal pleubagen 6% K
  2. Perawatan " " 8% K
  3. Biaya eksploitasi takum  
komsumsi pleubel. lama + gaji  
dll.  $\frac{e}{100} K$
- $(B + ste) \% K$

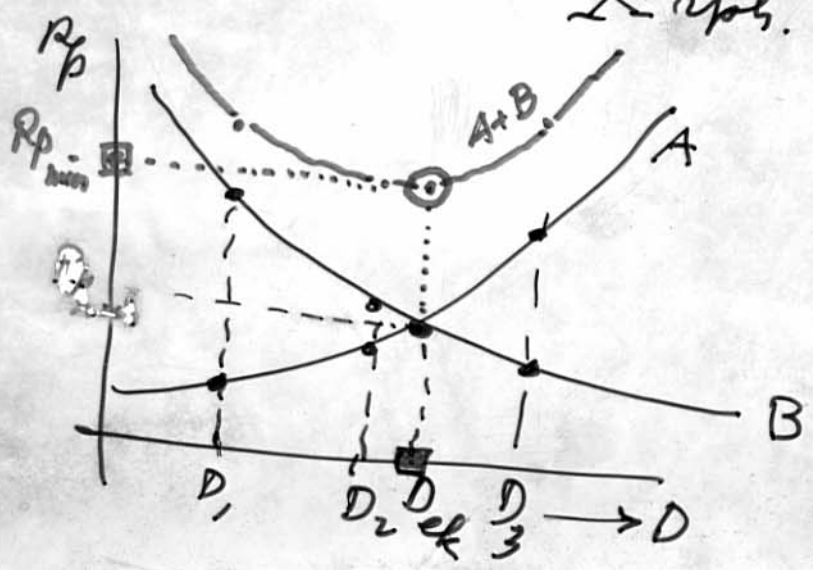


$$P_f = 9.87 \rho H_s \text{ kw}$$

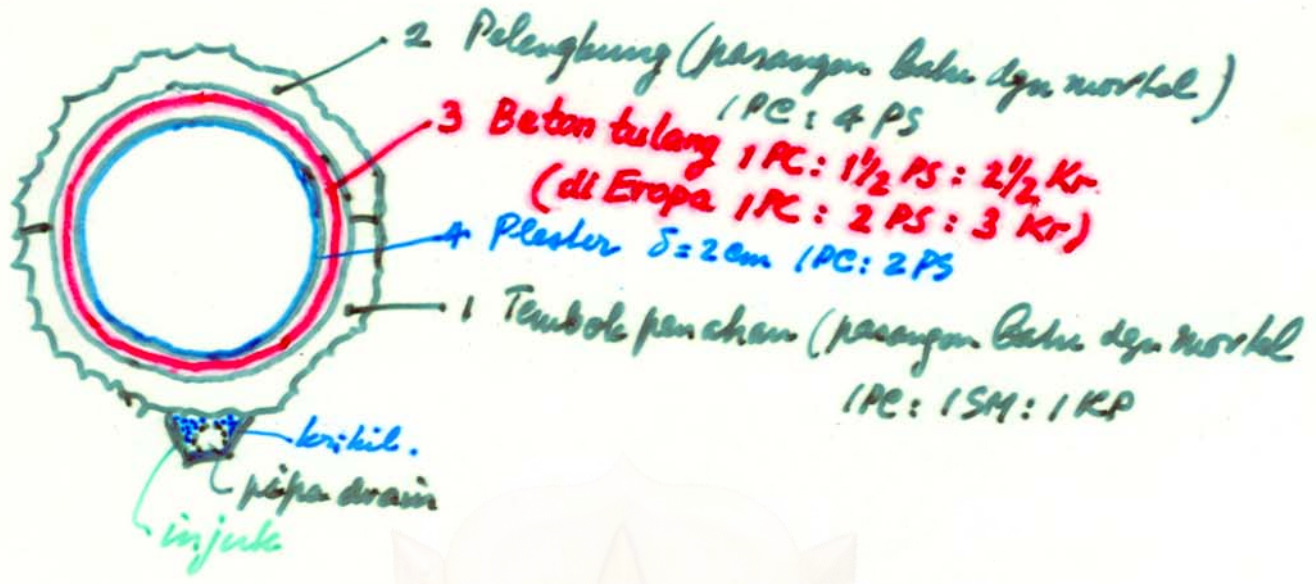
$$P_f = 9.87 \rho h_f \text{ kw} \leftarrow \text{keatas.}$$

$$P_{f \text{ H}_s} = 365 \times 24 \times 9.87 \rho \cdot h_f \text{ kwj.}$$

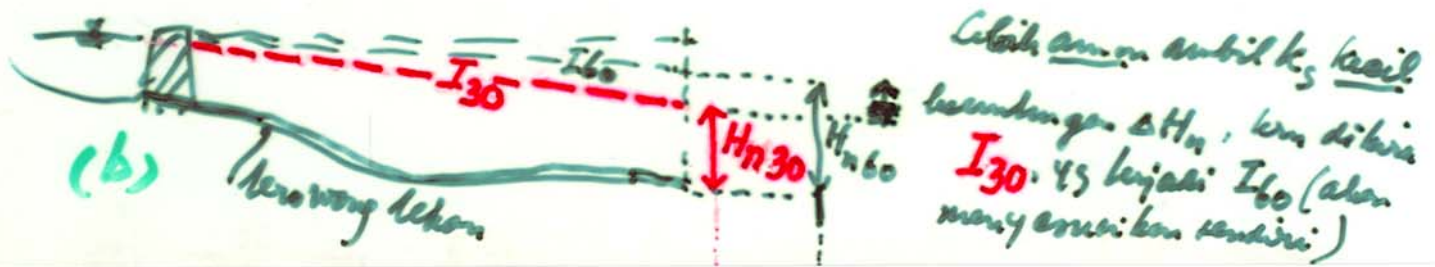
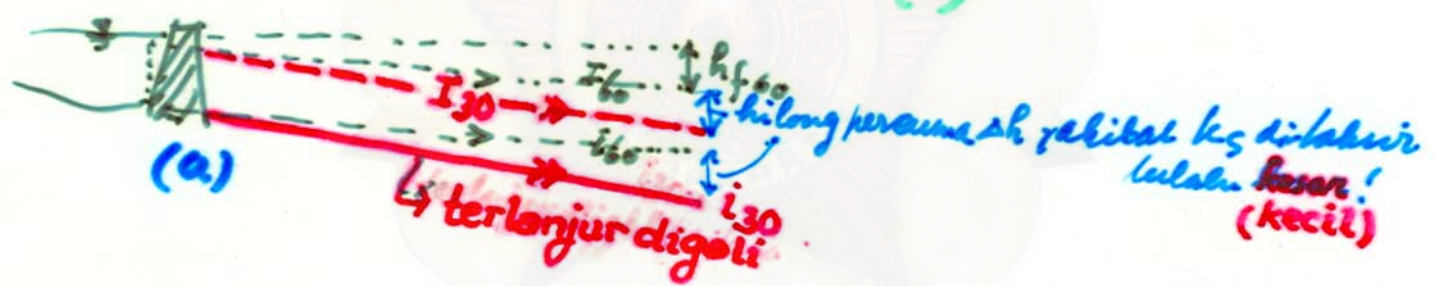
$$\times \times R_p. = \text{I} \text{ rph.}$$



\* Terowong tekan di PLTA TIMO:

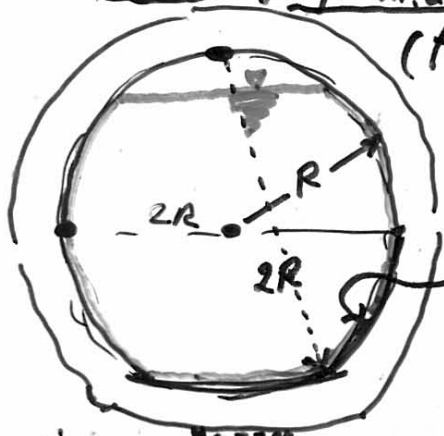


\* Saluran penghantar terbuka vs. Terowong Tekan



- Memperbesar  $Q$  (rendemen bocoran): - lapisan kedap air - suplesi (TA18)

1. Terowong dgn m.a. bebas (free flow tunnel)



tapis huda  
horse shoe shape tunnel  
lapisan kedap air  
IPC: 2 Ps.

2. Terowong tekanan (pressure tunnel)



beton tulang 1:1 1/2:2  
pasangan batu keah mortal 1 Pc: 4 ps

injeksi  
syal  
drain (bulat-batang)  
tugas drain

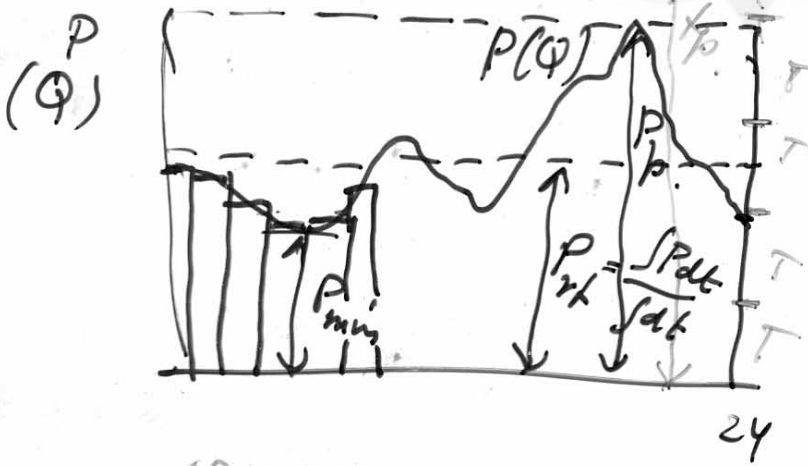
- kering → sehat  
- kurangi tel. air tanah

Diagram beban

$P = f(t)$  (lihat TA-3)  
(lihat TA-4)

unit load curve

Einheitsbelastungsganglinie



$APF = CF < LF$

LF = load factor

$LF = \frac{f_{fakt}}{P_{fakt}} = \frac{P_{rk}}{P_p} \times 100\%$

$P = 9.87 Q H_3$

$P(\cdot) \varphi$

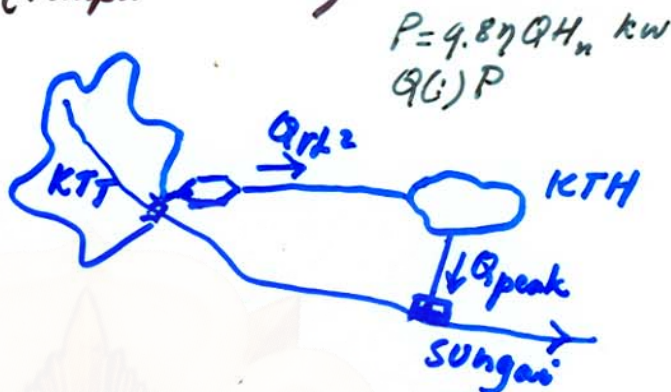
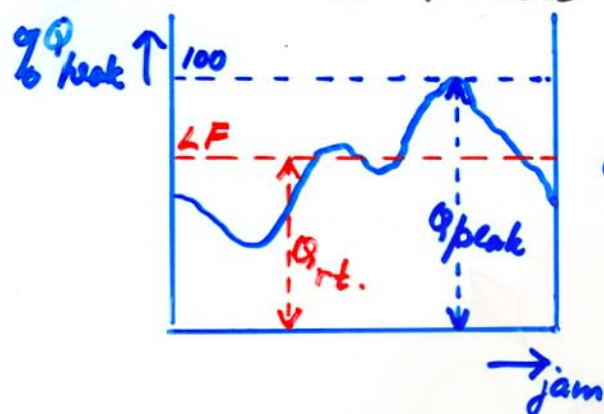
Capacity factor = annual plant factor  
 $CF = APF$

$= \frac{P_{rk}}{P_{fakt}} \times 100\%$



## DIAGRAM BEBAN SATUAN (HARIAN) ("Daily") "Unit Load Curve"

= Diagram beban harian yang ordinatnya dinyatakan dalam %  $P_{\text{peak}}$  (tanpa dimensi).



$$P = 9.8 \eta Q H_n \text{ kw}$$

$$Q(G) P$$

## MENGHITUNG KAPASITAS KOLAM TANDOHARIAN (KTH)

Diketahui : - diagram beban satuan (harian)  
 -  $P_{\text{peak}} = 45.000 \text{ Kw}$   
 -  $H_n = 20 \text{ m}$   
 -  $\eta_{\text{or.all}} = 88 \%$

Pertanyaan : - Volum neto KTH  
 - Banyaknya air yang terbuang sehari  
 $Q_{rt}$  diperbesar menjadi  $130 \text{ m}^3/\text{det}$

Jawab : Dari tabel beban satuan (harian) didapat faktor beban  $LF = \frac{960 \% \cdot \text{jam}}{24 \text{ jam}} = 40 \%$

$$Q_{\text{peak}} = \frac{P_{\text{peak}}}{\eta \cdot 9.8 \cdot H_n} = \frac{45.000}{0.88(9.8)(20)} = 260 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$Q_{rt} = 40\% Q_{\text{peak}} = 0.40(260) = 104 \text{ m}^3/\text{det}$$

Unit Load curve		Supply $Q_{rt} = 104 \text{ m}^3/\text{det}$			Supply $Q_{rt} = 130 \text{ m}^3/\text{det}$			Dibuang
Jam	% P peak	Kebu- tuhan	Kele- bihan	Keku- rangan	Kele- bihan	Keku- rangan	Kapa- sitas	(Spill)
		$(\text{m}^3/\text{det} \cdot \text{jam})$			$(\text{m}^3/\text{det} \cdot \text{jam})$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 *	15	39	65	—	91	—	600 *	91
2	10	26	78	—	104	—	600	104
3	6	15,6	88,4	—	114,4	—	600	114,4
4	6	15,6	88,4	—	114,4	—	600	114,4
5	47,7	124	—	20	6	—	600	6
6	53,8	140	—	36	—	10	590	—
7	60	156	—	52	—	26	564	—
8	65,4	170	—	66	—	40	524	—
22							500	—
23					90		590	—
24					110		600	100
$\Sigma$	960	2496	600	600	950	250		700

\* Pada jam ke-1 KTH penuh

CATATAN: 1. Kolom 1 dan 2 = unit load curve

2.  $LF = \frac{960}{24} = 40\%$

3. Kolom 3 = Kolom 2  $\times$   $Q_{peak}$

4. Kolom 4 =  $Q_{rt}$  - Kolom 3

5. Kolom 5 = Kolom 3 -  $Q_{rt}$

6.  $\Sigma$  kolom 4 =  $\Sigma$  kolom 5 = Kapasitas KTH  $(\text{m}^3/\text{det} \cdot \text{jam})$   
Secara blok diagram, lihat TA-6

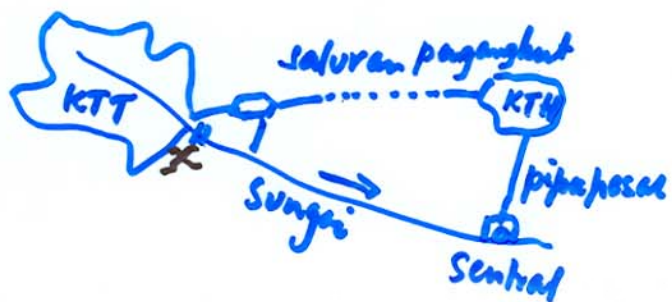
- Jika supply  $Q_{rL} = 130 \text{ m}^3/\text{det}$ ; maka
7. kolom 6 dan 7 diisi seperti pada cara kolom 3 dan 4
  8. Jika KTH dianggap penuh pada jam ke -1, maka pada kolom 8 dapat diisi kapasitas (air yang ada) di KTH tiap jamnya.
  9. Air yang terbuang tiap jam dapat diisi di kolom 9.

mis. dalam contoh ini air yang terbuang tiap hari =  
 $700 \text{ m}^3/\text{det} \cdot \text{jam} = 700 \times 3600 = \underline{2.520.000 \text{ m}^3}$ .

dan kapasitas neto KTH =  
 $600 \text{ m}^3/\text{det} \cdot \text{jam} = 600 \times 3600 = \underline{2.160.000 \text{ m}^3}$ .

# ANALISIS PENGUKURAN DEBIT SUNGAI

Untuk perencanaan BTA perlu pengukuran debit sungai ditambak yang dipilih (X)



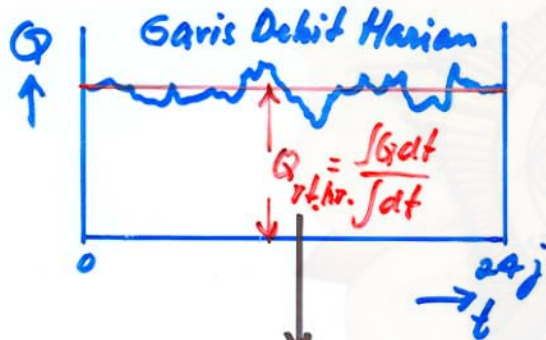
Pengukuran  $Q = f(t)$

manual: 2x (pagi/sore)

AWLR : temuan

selama 10 a 20 tahun

Garis Debit Harian  
(Daily Flow Curve)

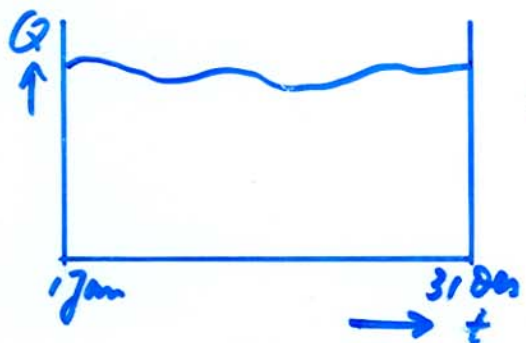


$Q_{rk.hari}$  selama 365 hari menghasilkan

Garis Debit Tahunan  
(Yearly Flow Curve)



\* Garis Debit Tahunan ini tipis untuk Sungai Liar (tak berindukkan suatu danau) di daerah tropik.



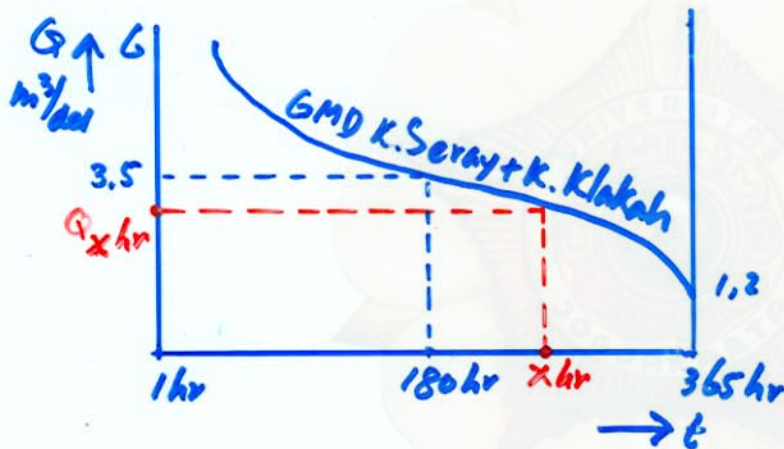
\* Garis Debit Tahunan untuk sungai yang berinduk pada danau opt S. Asahan, S. Larona dll. (danau Toba) (danau Towuti), adalah opt gambar samping.

## Garis Masa Debit (GMD) (Flow Duration Curve)

Garis masa debit dibentuk dengan menyusun besar debit dalam jangka waktu tertentu ( $t$ th) yang disusun dari  $Q_{max}$  sampai  $Q_{min}$  sebagai ordinat dan waktu atau  $Q_0$  waktu sebagai abscis

Konstruksinya dapat secara  $\left\{ \begin{array}{l} \text{grafis (Gb. TA-10)} \\ \text{tabel (Gb. TA-11)} \end{array} \right.$

Mis. K. Serayu + K. Klakah  
untuk PLTA Garung.



Def.  $Q_{x \text{ hari}}$  = suatu debit yang selama  $x$  hari paling sedikit didominasi oleh debit sungai (jumlahnya di lebih)

## Kriteria Praktis untuk Eksploitasi Tenaga Air

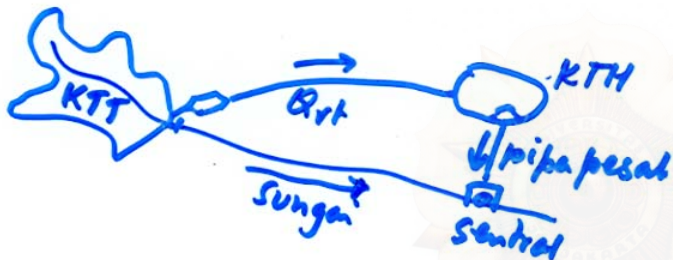
$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} \leq 10$$

Contoh:

Sungai	$Q_{max}/Q_{min}$	
La Maronee	50	Jelek
Larona	8	Baik
Asahan	6	Baik
Stuvaluleailo	6	Baik
Citarum	425	Jelek
Serayu + Klakah	5	Baik

MENETAPKAN DEBIT PEMBANGUNAN

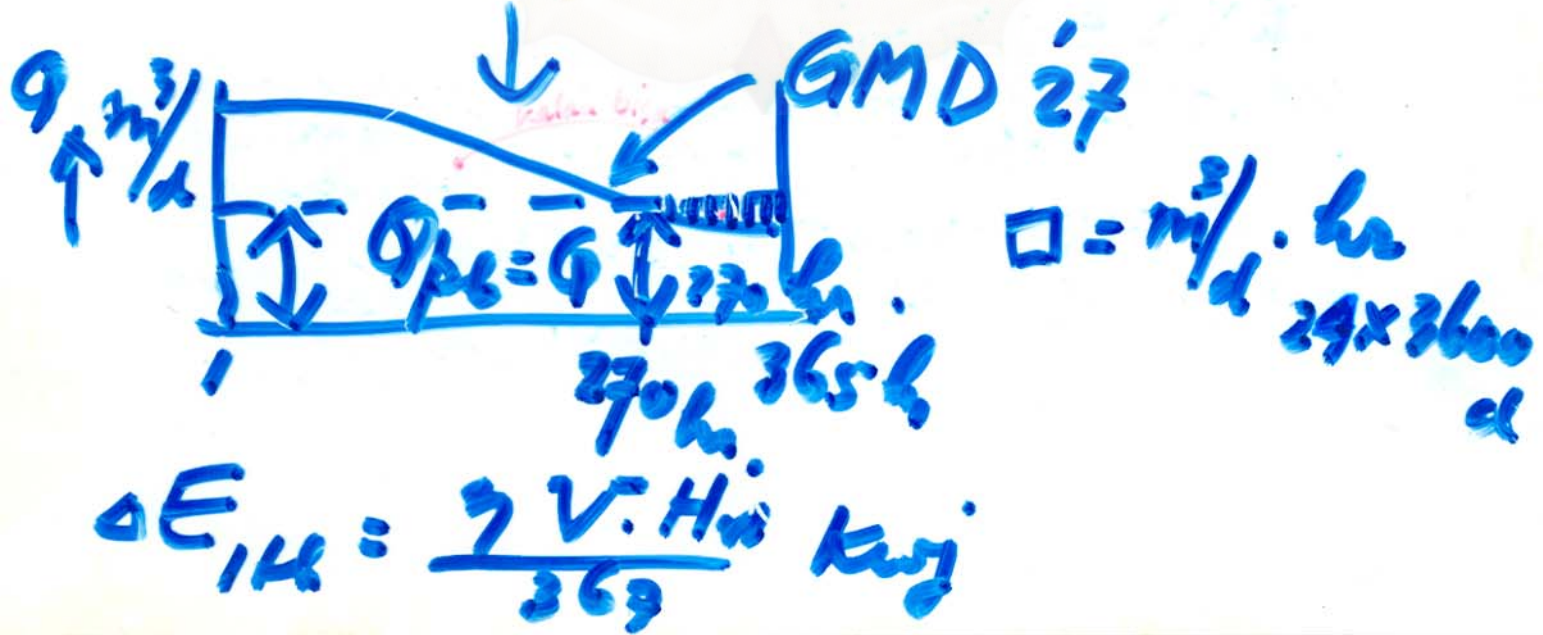
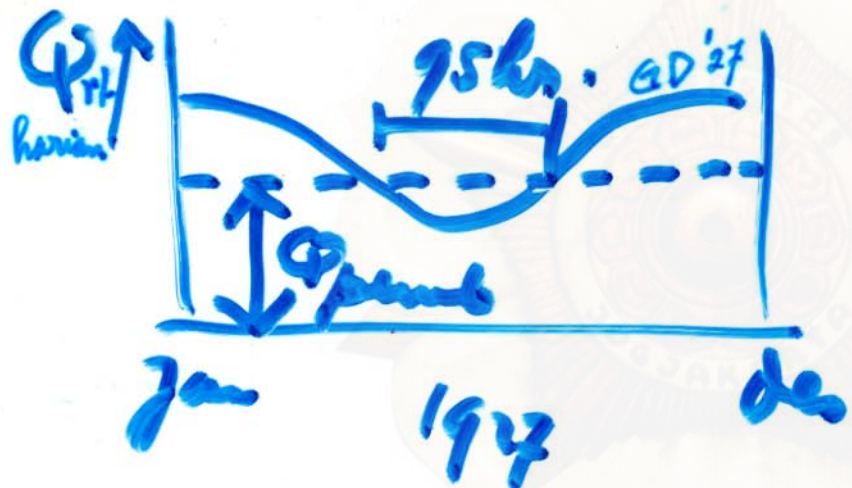
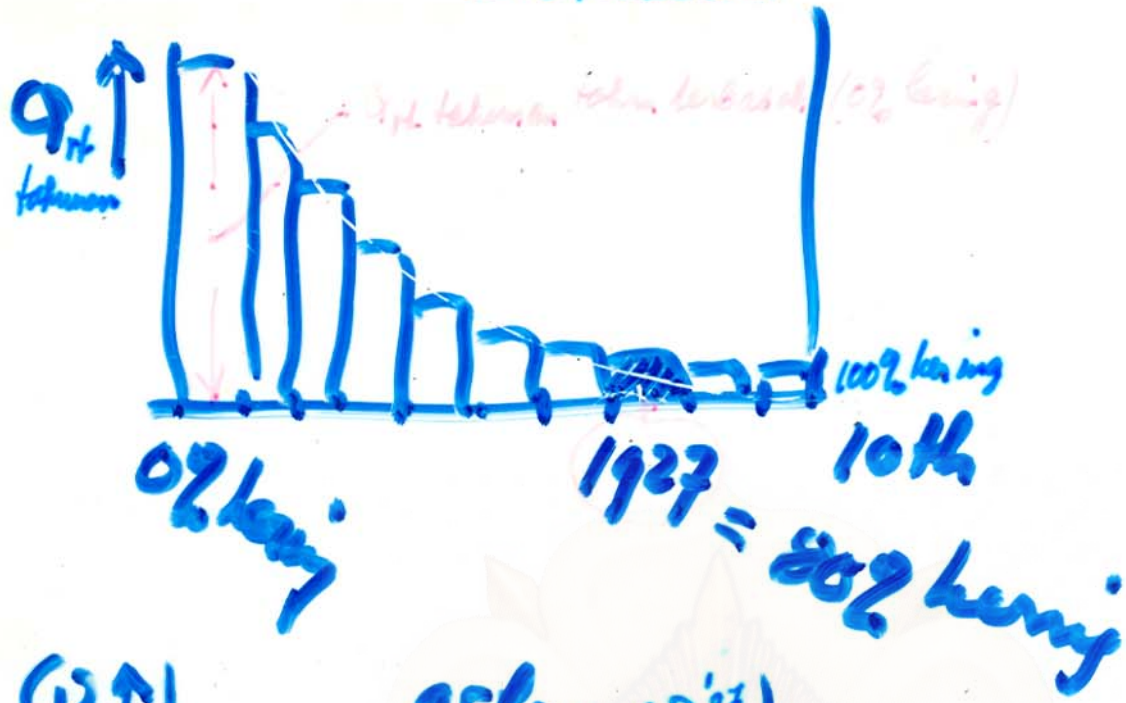
$$Q_{pamb} = Q_{uitkouv}$$

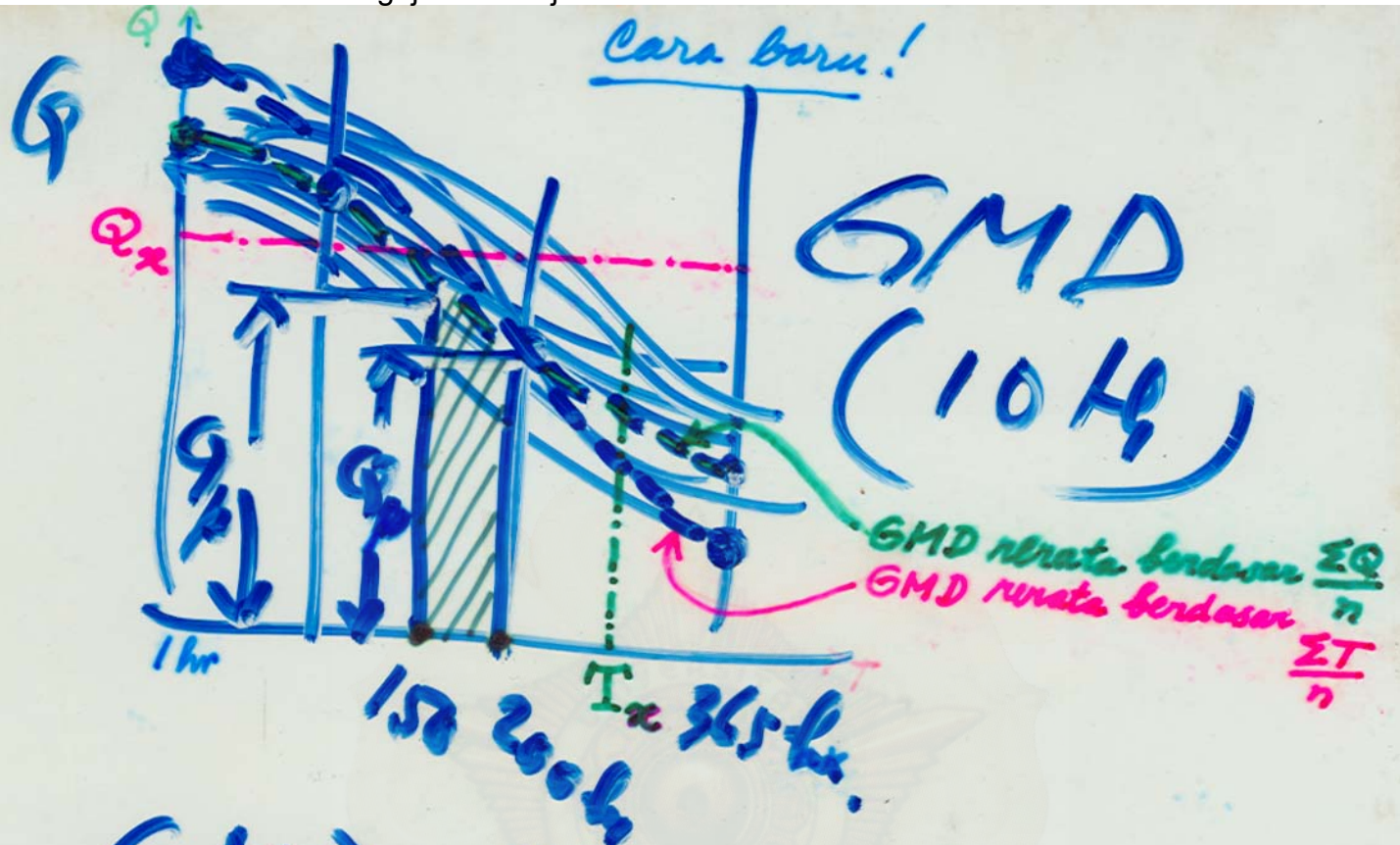


- Cara lama (Sebelum Perang Dunia ke-II).

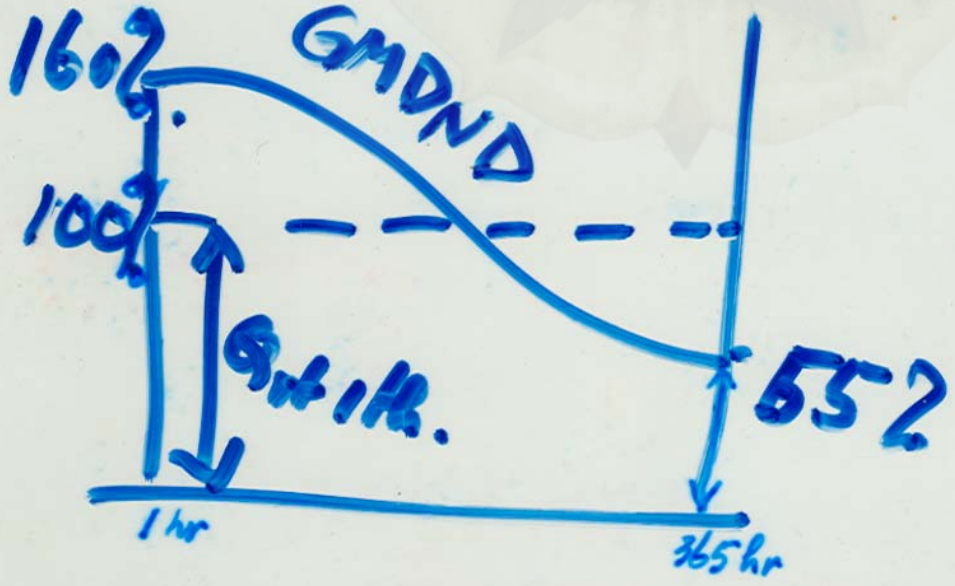
$Q_{pamb} = Q_{270hr}$  dari garis masa debit tahun yang 80% kering dalam periode tertentu (10 th)

GMD Periode 10th





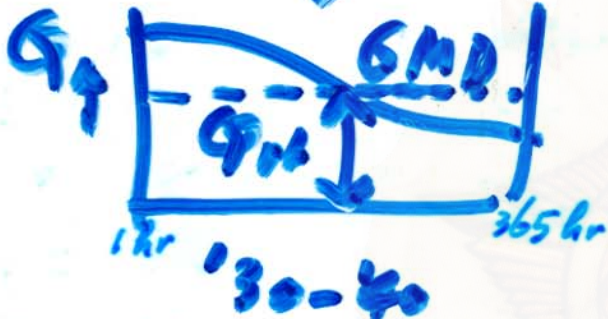
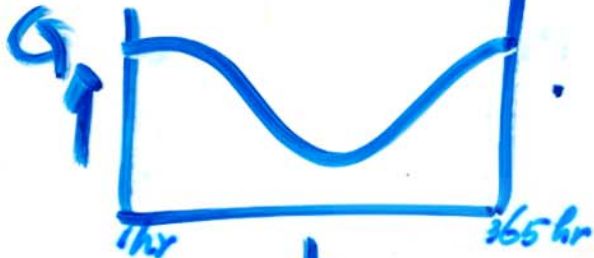
**GMDND** (ordinat dlm %  $Q_{rt}$ )





# K. Serayu

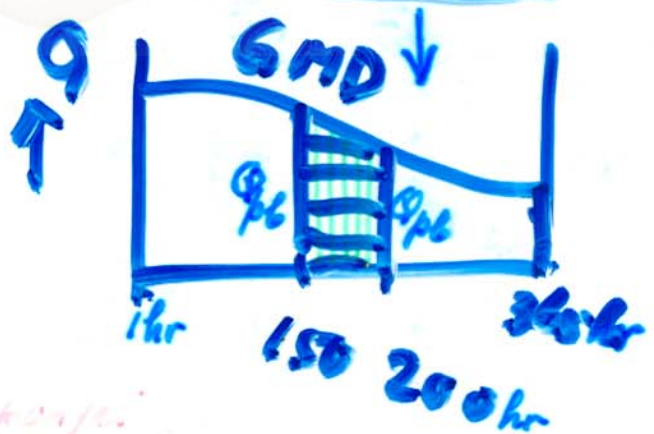
data debit ('30-'40)



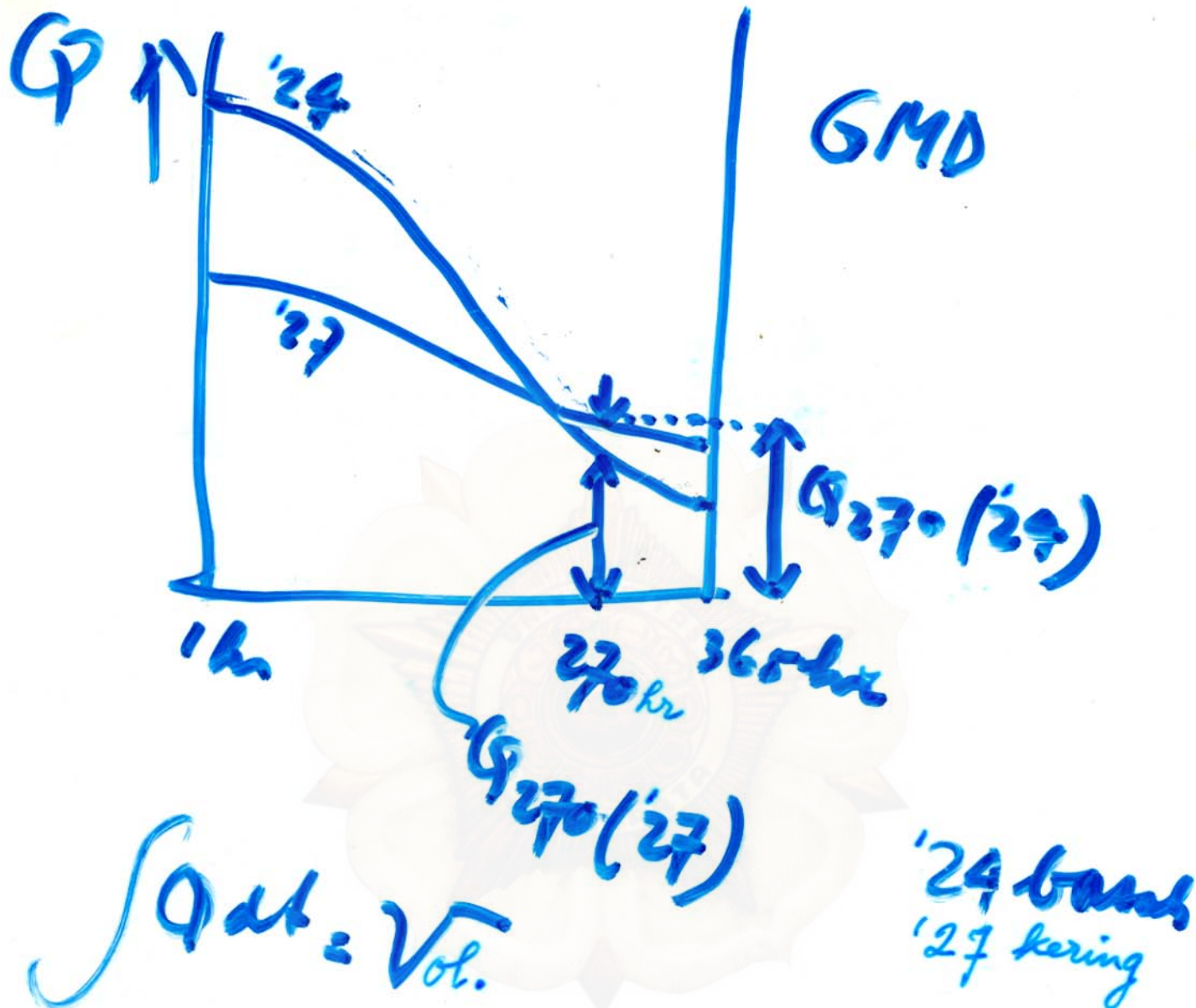
# K. Progo

data hujan ('30-'40)

Hidrologi



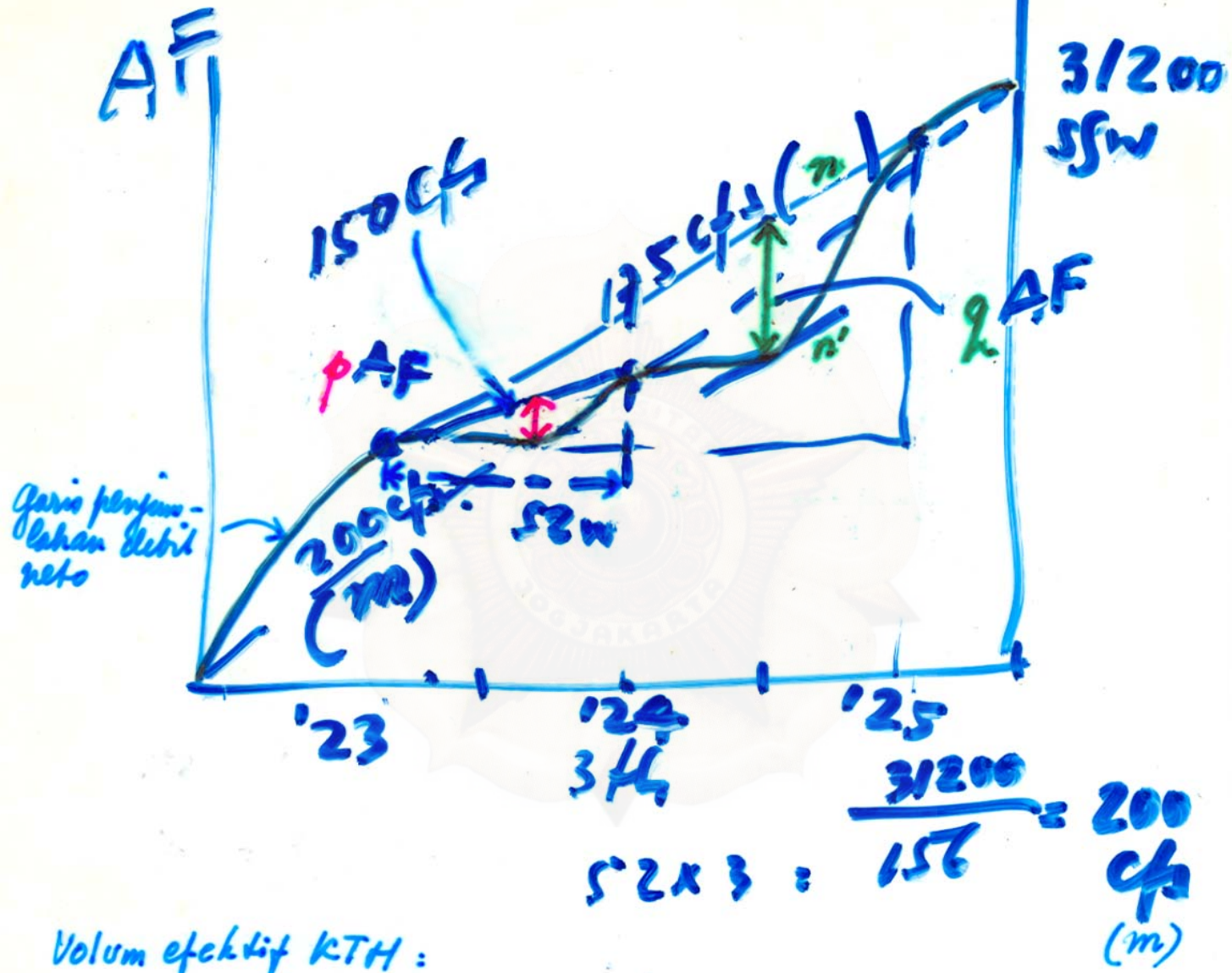
\* Sifat:  
 Triang sungai yang klimatologi  
 berbeda-beda (berdekatan, mendatar)  
 GMDND yang sama (komponen)



Kejelekan cara lama!

- (1) relatif, tergantung banyaknya data (tahun) atau tahun yg 80% kering dapat bergeser.
- (2) tidak wajar dalam kasus seperti digambarkan di atas.  
 $Q_{pemb\ tahun\ basah} < Q_{pembangunan\ tahun\ kering}$

Mencari Volum Efektif Kolam Tando Tahuman.

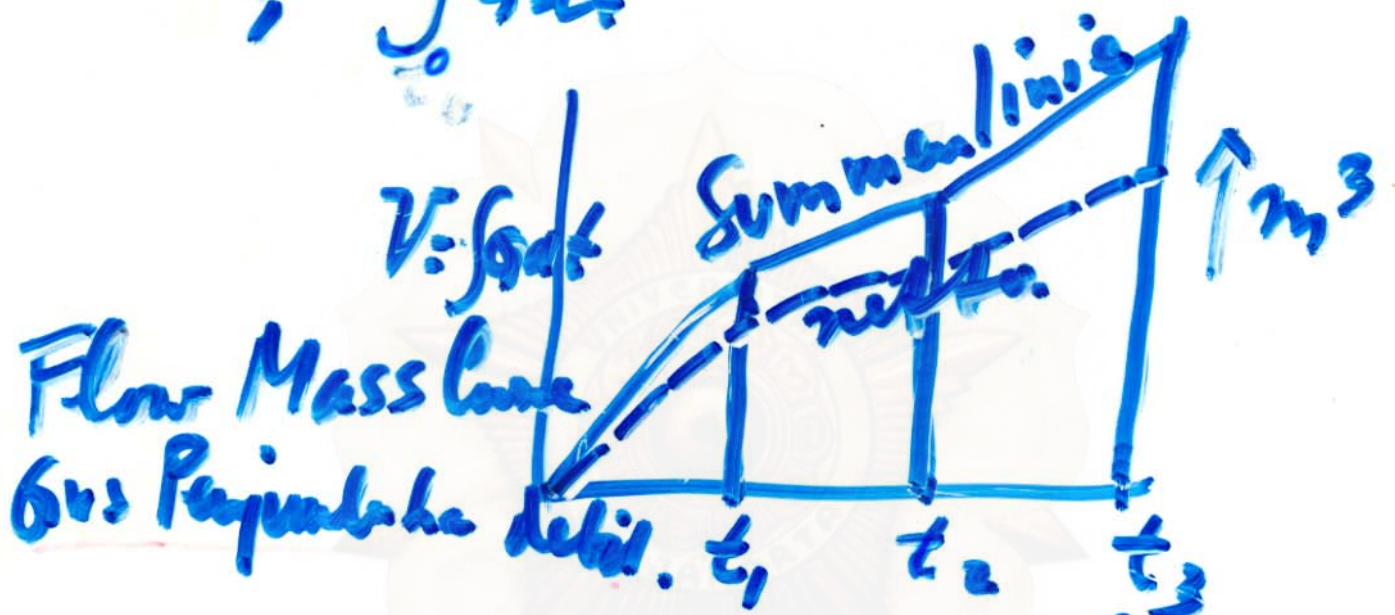


Volum efektif KTH :

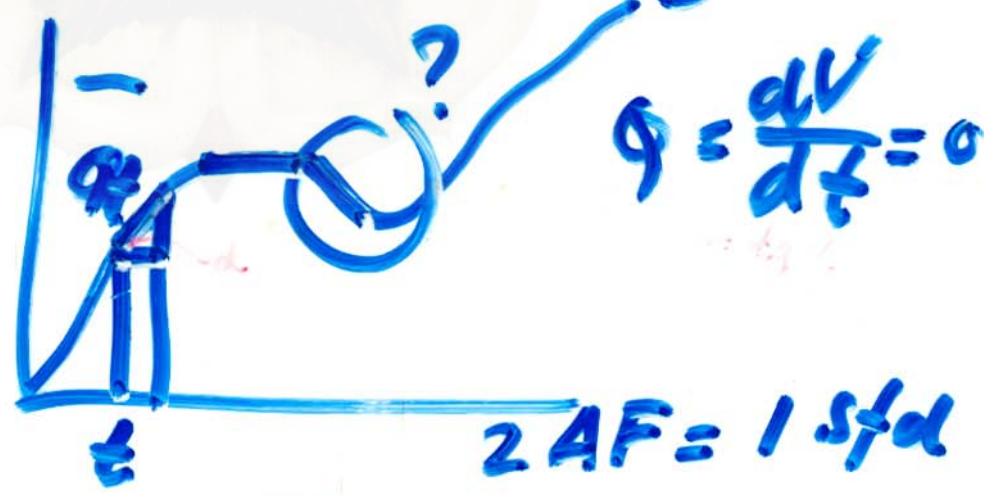
QAF berdasarkan 3th terkering atau  
 PAF " " 1th "



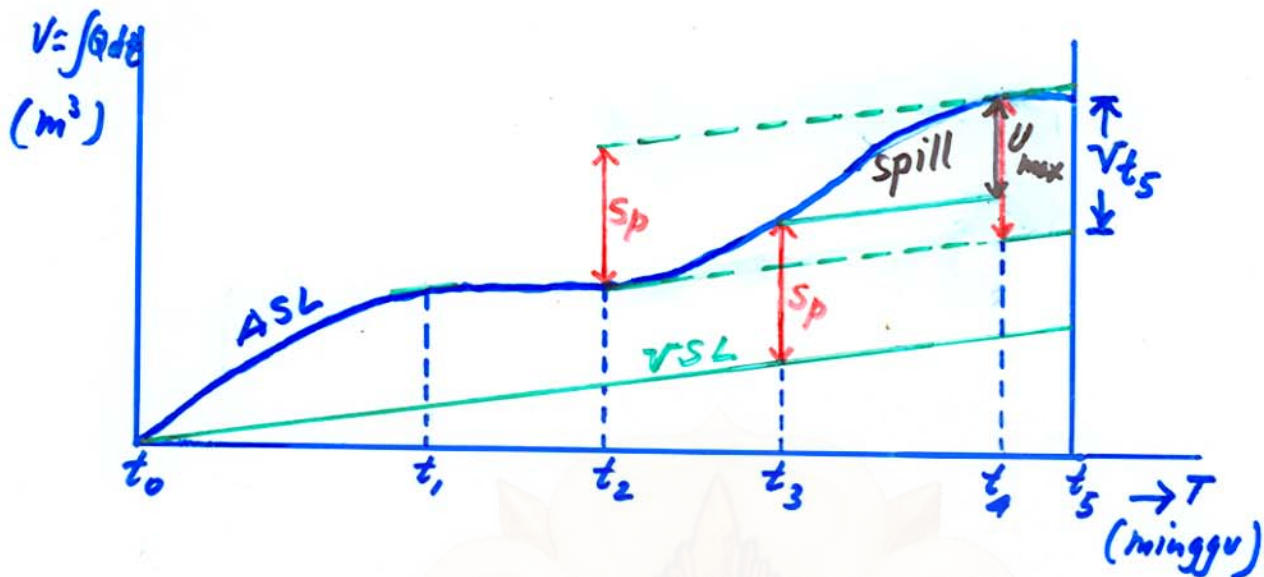
$$V_t = \int_0^t Q dt$$



1 cfs.day.  
1 sfd



1 H =  $F \cdot p$  acre. feet.  
1 day =  $\frac{F \cdot p}{720}$  sfd



ASL = Abfluss Summenlinie = Flow Mass Curve =  
Garis Penjumlahan Debit

VSL = Verbrauchs Summenlinie = Garis Kebutuhan

Sp = Speicher = Storage = Kolam Tando

U = Uberlauf = Spill = Limpasan

Pada  $t_0$  waduk kosong.

$t_0 \rightarrow t_1$  : Muka air waduk naik

$t_1 \rightarrow t_2$  : " " turun

$t_2 \rightarrow t_3$  : " " naik

$t_3$  : Waduk penuh.

$t_3 \rightarrow t_4$  : Terjadi pelimpasan (Spillway bekerja)  
Waduk tetap penuh

Banyaknya air yang melimpas =  $U_{max}$

$t_4 \rightarrow t_5$  : Muka air waduk turun

$t_5$  : Banyaknya air di waduk =  $V_{t_5}$

## Fungsi Bendungan .

1. Membendung air hingga terjadi waduk ("storage dam")
2. Membelokkan sebagian air agar masuk ke dalam saluran pengangkut ("diversion dam")
3. Membendung air hingga diperoleh terjun yang cukup tinggi.

## TIPE BANGUNAN TENAGA AIR

Tipe BTA dapat digolongkan dalam 5 aspek sbb. :

### A. Maksud Penggunaannya.

1. Eka guna ("Single purpose")  
khusus untuk pembangkitan tenaga air  
contoh: PLTA Cika-long.
2. Serbaguna ("multiple purpose")  
dialnya untuk
  - pembangkit tenaga listrik
  - pengendalian/pengegan banjir
  - pengairan
  - penyediaan air domestik dan industri
  - perikanan darat dan satwa liar
  - lalu lintas air
  - pengendalian kadar garam dan sedimen
  - rekreasi dan pariwisata
  - penanggulangan pencemaran air.

Contoh: PLTA Jabibuhur, Karanghates dll.

B. Menurut terjun yang tersedia

1. PLTA bertekanan tinggi ("high head power plant")

$$H > 100 \text{ m}$$

Turbin Pelton (TA 36) atau Francis (TA 37)

2. PLTA bertekanan sedang ("medium head power plant")

$$90 \text{ m} < H < 100 \text{ m}$$

Turbin Francis

3. PLTA bertekanan rendah ("low head power plant")

$$H < 90 \text{ m}$$

Turbin propeller (Nägler, Kaplan, bulb)  
(TA 37, 38, 39)

C. Menurut letak rumah mesin/sentral.

1. di atas tanah ("above ground") (TA 1, 16)

2. di bawah tanah ("under ground") (TA 15)

Contoh: PLTA Jati Luhur, Sigura-gura, Sangguruh.  
"Cirata."

D. Menurut letak generatornya.

1. tipe "indoor" (lazim di Indonesia)

2. " "outdoor" (harus "weather proof")

3. " "semi outdoor"

E. Menurut suplai airnya.

1. "Storage plant" ("concentrated fall type") (TA 16)

2. "run of river plant" ("Laufwerke") → (TA 19)

3. "head race type plant" ("divided fall type") → (TA 21)

Menurut MOSonyi :

1 = "valley dam station development"

3 = "diversion canal type plant" atau  
"diversion tunnel type plant", tergantung  
macam saluran pengangkutnya.

## Ad 1. Storage Plant.

Pada prinsipnya tanpa pembendungan limbah  
→ "Tailsperran"

Lelah kemah oncori/sentral dapat jauh di hilir bendung (TA 17).

Dapat juga langsung di hilir badan bendung (TA 16), disebut "tail development" (TD)

Ada yang di hulu badan bendung opt PLTA Jaliluhun, disebut "head development" (HD)

Untung-rugi TD versus HD dapat ditinjau dari 4 aspek sb.:

### (a) Terowong.

Pada TD terowong berfungsi sbg terowong tekan, jadi harus ditulangan → mahal

Pada HD terowong dapat dengan muka air bebas, tanpa tulangan, berfungsi sebagai saluran pembuangan → murah.

(b) Pada TD diperlukan pendatar air ("surge tank") jika terowong tekan cukup panjang, untuk mengalami tekanan kejut.

Pada HD tak perlu pendatar air karena terowong lehannya/pipa pesatnya sangat pendek.

(c) Tenaga yang dihasilkan pada HD > TD, karena gesekan pada terowong tekan lebih kecil pada HD.



(d) HD lebih aman daripada TD dalam masa perang karena tidak begitu "exposed"

Ad 2. "Run of river plant" ("Laufwerke")

Banyak di Jerman Barat pada sungai di dataran rendah. Juga di Amerika Serikat (TA 19)

Biasanya H kecil, jadi Q hiran besar.

Ketentuan khusus adalah Pfeiler Kraftwerk (TA 20) di mana rumah mesin diletakkan dalam pilar jembatan

Ad. 3. "Head race Type Plant" = "Divided Fall Type Plant"

BTA tipe ini di Indonesia juga cukup banyak dibangun, disebut Tipe dengan Saluran Pengangkut (TA 21), mis PLTA Jelok, Tuno, Cikalong, Lamajan, Plengen dll. Terjun antara bangunan penangkap air dan turbin dibagi dua :

- Antara bangunan penangkap air dan kolam tando harian atau kolam pengumpul - terjun kecil, seolah-olah saluran pengangkut mengikuti garis kontur.
- Antara kolam tando harian dan turbin - terjun besar

## PIPA PESAT

Penempatan  $\left\{ \begin{array}{l} \text{di atas tanah (lebih baik)} \\ \text{di bawah tanah (terpendam)} \end{array} \right.$

- Hal-hal yang menguntungkan pipa pesat di atas tanah.
  1. Ruang untuk konstruksi lebih luas
  2. Lebih mudah untuk inspeksi, pemeliharaan dan reparasi
  3. Lebih tahan lama (abiotak 2)
  4. Biaya pemasangan lebih murah.
  
- Hal-hal yang menguntungkan pipa pesat terpendam
  1. Pipa pesat melalui lereng gunung yang curam dengan fondasi tanah (tak perlu anker yang pembuatannya jadi sulit)
  2. Pada lereng curam sering ada bahaya longsor tanah/batu/pohon dll. Kemungkinan kecil untuk merusak pipa pesat bila terpendam.
  3. Di daerah dingin, bila pipa pesat panjang dan  $V$  air kecil. Alat pencekik bebannya air, mahal. Jika terpendam tak memerlukan nya.
  4. Pipa pesat melalui "earth cut" atau gunung. Lebih murah menutup pipa pesat dengan tanah galian daripada membuat konstruksi penyokong. Jika menimbulkan kembali pipa pesat dengan tanah galian, harus teliti. Kerap kali tanah di bawah pipa pesat turun. Tanah penutup yang porous memperpanjang umur pipa (tanah campur pasir  $\rightarrow$  baik)

## Macam pipa pesat.

Tugas pipa pesat

1. Menghantar air
2. mengimbangi tekanan air

Syarat

1. rapat air
2. Kuat terhadap tegangan +/-

Macam Bahan pipa pesat.

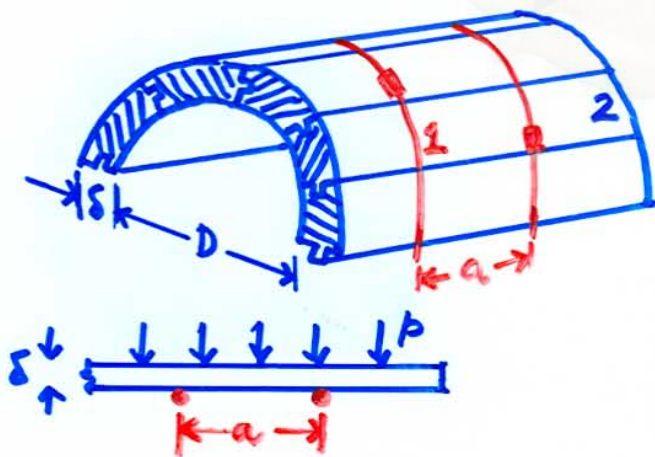
1. kayu
2. baja
3. beton bertulang
4. kombinasi 2 dan 3. (Sistem Sedijatmo)

1. Pipa pesat kayu ("wood stave penstock")

di Indonesia : Cilaki (1918) ; Canada banyak.  
(kayu murah)

- Keuntungan :
- biaya konstruksi ringan
  - beratnya kecil.
  - angkutan dan pembangunan sederhana
  - angka muai/susut kecil
  - tahan korosi
  - licin ( $k_s$  Strickler  $\approx 90$ )
  - penghemat tenaga yang jelek

- Kerugian :- Pembuatan sulit ( D besar );  $D = 0,5 - 5,0 m$
- Kurang rapat air ( di joints )
  - tidak tahan terhadap lekuk.  $[\sigma] = 60 kg/cm^2$
  - umur kayu terbatas



- untuk tugas 2
- 1 Begel (Spanring, bandage)
  - 2 Papan kayu (Dauben, doeken)
- untuk tugas 1.

Ditinjau balok ternaman dengan lebar 1 cm.

$$M = 0,106 p a^2$$

$$= [\sigma] \frac{1}{6} \cdot 1 \cdot \delta^2$$

$$(p = 0,1 H_{dyn})$$

$$(W = \frac{1}{6} \cdot 1 \cdot \delta^2)$$

$$\delta \geq 0,252 a \sqrt{\frac{H_{dyn}}{[\sigma]}}$$

$\delta$  = tebal pipa (cm)

$a$  = jarak antara begel (cm)

$H_{dyn} = 1.2 H_{st}$  = tinggi tekanan air dinamik (m)  $\rightarrow$  TA 29

$[\sigma]$  = tegangan ijin =  $60 \text{ kg/cm}^2$

Biasanya pada  $\delta$  masih ditambah toulag akibat

- kerusakan begel.
- " kayu karena aus (mikroorganisma).
- syarat  $\delta \geq 2.5 \text{ cm}$

Ada 2 tipe : (a) dibuat dengan mesin di pabrik.  
Panjang pipa  $\leq 6 \text{ m}$ .

(b) dibuat secara terusan "in situ"  
Sambungan dengan arus bertulang seling (rapat air)

## 2. Pipa pesat baja.

Biasanya diletakkan di atas tanah dengan konstruksi penyokong (Socket, support) beton dkk.  
Anker blok dipasang pada tiap belokan atau tiap jarak  $\leq 100 \text{ m}$

macam :

(a) Pipa pesat terputus ("anggelösten Rohrleitung"), dengan sambungan (joint) di antara ankerblok.  $\rightarrow$  TA-30

(b) Pipa pesat terusan ("geschlossen Rohrleitung"), tanpa sambungan

(c) Pipa pesat melayang/menggantung ("fliegende Rohrleitung"), pada belokan tanpa ankerblok.  
 $\rightarrow$  "Verteilleitung" (Pipa pesat pembagi).

Pipa pesat baja kadang pakai begel juga.

$p.D < 10.000 \text{ kg/cm} \rightarrow$  tanpa begel (Simple steel pipe)

$p.D > 10.000 \text{ kg/cm} \rightarrow$  perlu begel (Banded " ")

Keuntungan :

- rapat air
- licin,  $k_s$  Strickler = 80 (paku heling)
- $k_s$  " = 90 (las listrik)
- kuat terhadap tekanan air
- $[\sigma] = 1200 \text{ kg/cm}^2$  (baja St 37).

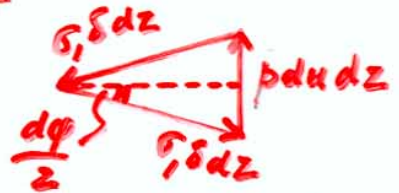
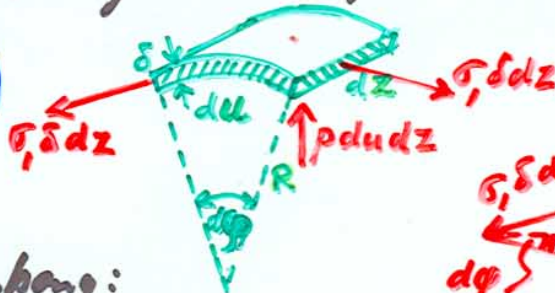
Kerugian :

- mudah berkarat, biaya eksploitasi (pemeliharaan) besar.
- untuk D besar diperlukan tenaga ahli dari luar negeri  $\rightarrow$  devisa.
- biaya pembuatan mahal (import)
- ada bahaya lekuk/lipat dalam keadaan tekanan vakum (TA-25)

• Hitungan kekuatan pipa pesat baja ber dinding tipis :

$$\frac{D}{\delta} \geq 20$$

(a) Tegangan cincin / tangensial :  $\sigma$ ,



Dalam keadaan seimbang :

$$\frac{1}{2} p \cdot du \cdot dz = \sigma \cdot \delta \cdot dz \cdot \sin \frac{d\phi}{2}$$

$$p R d\phi = \sigma \cdot \delta d\phi$$

$$\boxed{\sigma = \frac{pR}{\delta}} \text{ RUMUS KETEL}$$

$$\sin \frac{d\phi}{2} \approx \frac{1}{2} \sin d\phi \approx \frac{d\phi}{2}$$

$$du = R d\phi$$

$\sigma_t$  = tegangan cincin/tangensial ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\rho$  = tekanan air ( $\text{kg/cm}^2$ )

$R$  = jari-jari pipa pesat (dalam) (cm)

$\delta$  = tebal pipa pesat (cm) ditambah toeslag karet  $\pm 3 \text{ to } 4 \text{ to}$

Untuk mendimensi:

$$\delta \geq \frac{\rho R}{\eta [\sigma_t]}$$

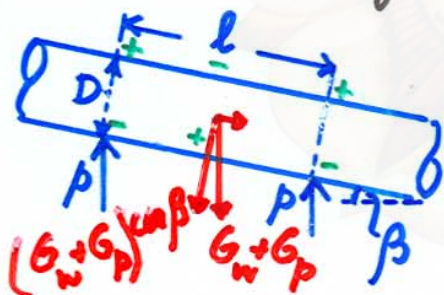
$\eta$  = koefisien las (0.85 - 1.00)  $\rightarrow$  "seamless pipes"

Tipe baja:

Pipa pesat terputus: St 37  $\rightarrow [\sigma] = 1200 \text{ kg/cm}^2$   
St 55 " = 1600 "

Pipa pesat terusan: St 37  $\rightarrow [\sigma] = 900$  "  
St 55 " = 1400 "

(b) Tegangan lengkung (axial):  $\sigma_2$



$$M_{\max} = \frac{(G_w + G_p) l \cos \beta}{12}$$

$$W = \frac{1}{4} \pi \delta D^2$$

$$\sigma_2 = \frac{(G_w + G_p) l \cos \beta}{3 \pi \delta D^2} \text{ kg/cm}^2$$

$G_w$  = Berat air sepanjang  $l$  (kg)

$G_p$  = " pipa "  $l$  (kg)

$l$  = panjang pipa antara 2 penyokong (cm)

$\delta$  = tebal pipa pesat (cm)

$D$  = diameter " " (cm)

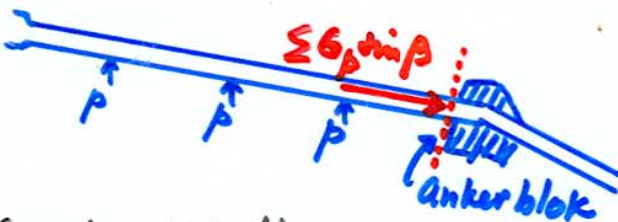
$\beta$  = sudut lereng sumbu pipa pesat dengan horizontal

$p$  = penyokong (support, Socket)

(c) Tegangan - regangan lain (aksial) :  $\sigma_3$ 

Banyak macamnya, misalnya akibat joint, Sockel, konis dll.

• Akibat berat pipa pesat ( $\sigma_3$ )



$$\Sigma G_p \sin \beta = \pi D \delta \sigma_3$$

$$\sigma_3 = \frac{\Sigma G_p \sin \beta}{\pi D \delta}$$

kg/cm<sup>2</sup>

Gesekan di p dianggap  
hingga sempurna.

Apabila pipa pesat terusan :

$$\sigma_3' = \frac{\Sigma G_p \sin \beta}{2 \pi D \delta}$$

kg/cm<sup>2</sup>

Pada pipa pesat lerpukus,  $\Sigma G_p$  = berat pipa dari anker -  
blok sampai joint atas.

Pada pipa pesat terusan,  $\Sigma G_p$  =  $\frac{1}{2}$  berat pipa dari anker -  
blok sampai anker blok di atasnya.

• Akibat suhu ( $\sigma_3''$ )

Pipa dapat menci atau tumpul akibat perubahan  
suhu, khusus apabila pipa pesatnya terusan  
dapat mengakibatkan tegangan aksial extra.

$$\Delta l = \lambda \Delta t \rightarrow \frac{\Delta l}{L} = \epsilon = \lambda \cdot \Delta t$$

$$\frac{\sigma}{E} = \lambda \cdot \Delta t \quad (\text{Hooke})$$

$$\therefore \sigma_3'' = E \cdot \lambda \cdot \Delta t$$

Untuk baja St 37 atau St 55:  $E = 2,15 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$   
 $\lambda = 1,2 \times 10^{-5}$

$$\sigma_3'' = 26 \cdot \Delta t \quad \text{kg/cm}^2$$

$\Delta t$  = perubahan suhu dalam °C.

## • Tegangan Total.

Sebenarnya dalam tiap bagian dinding pipa pesat terjadi keadaan tegangan dalam ruang ("residual Spannungsbestand"), dengan tegangan-tegangan pokok tbb.:

$$\sigma_t = \sigma_1 - \frac{1}{m} (\sigma_2 + \sigma_3 + p)$$

$$\sigma_r = p - \frac{1}{m} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\sigma_a = \sigma_2 + \sigma_3 - \frac{1}{m} (\sigma_1 + p)$$

$\sigma_t$  = tegangan pokok tangensial } (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_r$  = " " radial  
 $\sigma_a$  = " " aksial

$$m = \frac{10}{3} \text{ (angka Poisson)}$$

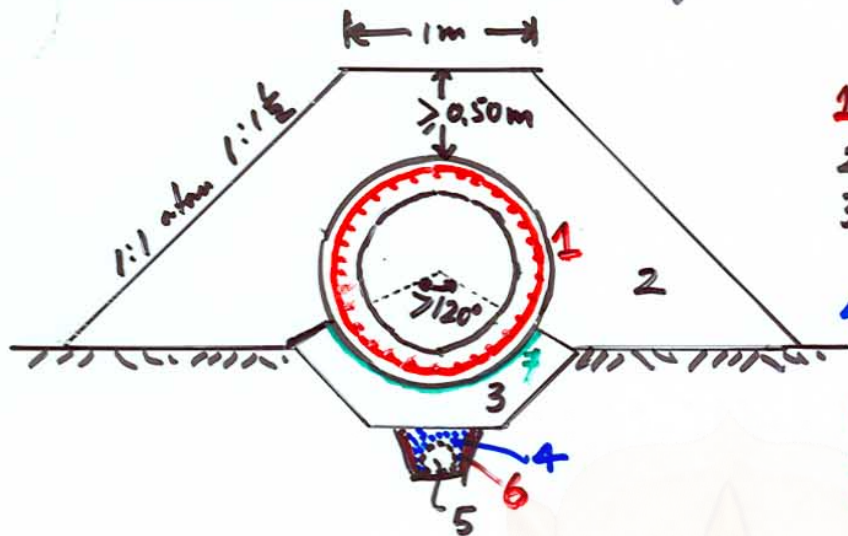
$$p = 0,1 \text{ H.dyn. (kg/cm}^2\text{)}$$

(m)

Catatan: Biasanya seluruh bagian pipa pesat di test di pabrik dengan tekanan sebesar  $1,5 p_{max}$  setelah dipasang in situ di-test lagi untuk sebagian atau seluruhnya.



### 3. Pipa pesat beton bertulang.



- 1 beton tulang 1:2:3
- 2 tanah urugan (porous)
- 3 Landasan beton tumbuk 1:2:4 (Betonbet)
- 4 kerikil
- 5 pipa drain (berlobang)
- 6 injuk (filter)
- 7 lapisan aspal atau kertas bitumen

Macam:  $D > 1m$  , dibuat di tempat (cast in place, cast in situ)  
 $D < 1m$  , dibuat di pabrik (pre cast)

Dapat juga "prestressed concrete" yang prinsipnya setelah dibebani tidak ada lagi tegangan tarik pada tampang beton .

#### Keuntungan :

1. biaya eksploitasi kecil karena tak perlu pemeliharaan.
2. biaya pembangunan murah. Walaupun berat besi tulangan kira-kira sama dengan berat baja pelat tetapi harga seluasnya lebih murah. Bahan tak perlu diimport. Hemat devisa
3. Kuat / tahan terhadap tekanan negatif (vakum)
4. biaya pelaksanaan murah. Tak perlu ahli luar negeri.
5. mesin k<sub>s</sub> Strickler = 80-90
6. tahan lama. Umur 25-30th masih seperti baru (asal airnya tak agresif).

Rangkian :

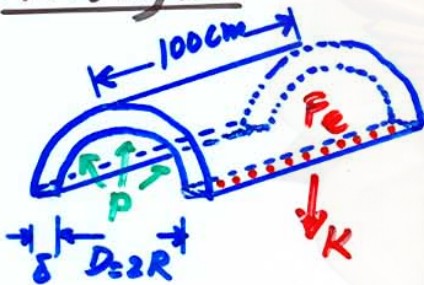
1. Air harus bebas asam. Perlu diperiksa terlebih dahulu.
2. Kual tarik beton kecil. Walaupun  $\sigma_{tarik}$  dipikul oleh tulangan (besi), jika tebal beton kurang, dapat retak perlu dikontrol dengan stadium IIa (lebih-lebih pada lekukan kejut)
3. bongkaran tak laku dijual.

Batas penggunaan pipa beton tulang konvensional.

- Indonesia  $H_d \leq 70m$
- Eropa  $" \leq 40m$
- Amerika  $" \leq 60m$  (Soap Lake Aqueduct)  
 $H_d = 75m \rightarrow \text{max}$

Hitungan :

Ditinjau pipa panjang 100cm.



(a) Hitungan berdasarkan stadium IIb.  $\rightarrow$  untuk tulangan.

$$K = p \cdot R \cdot 100 \text{ (tangensial)}$$

$$[K] = F_e \cdot [\sigma_e]$$

$$[K] > K \quad \text{Syarat!}$$

$$F_e > \frac{100 p R}{\eta [\sigma_e]}$$

$F_e$  = luas tampang besi tulangan (1 sisi) ( $cm^2$ )

$p$  =  $0.1 H_d$  (tekanan air) ( $kg/cm^2$ )

$R$  = jari-jari pipa ( $cm$ )

$[\sigma_e]$  = tegangan ijin besi ( $kg/cm^2$ )

$\eta$  = koefisien las tulangan : 0.9 - 0.95

(b) Hitungan berdasarkan Stadium II a. → untuk betonnya.

Beton dianggap ikut menahan tegangan tarik, jadi gaya k dipikul oleh beton dan tulangan → kurang rasional. Ini perlu karena jika tebal beton kurang, dapat retak dan tulangan dapat berkarat →  $F_c$  kurang → fatal.

$$F_b + 15 F_c > \frac{100 p R}{[\sigma_{bt}]}$$

$F_b$  = luasampang beton (isi)  
 $[\sigma_{bt}]$  = tegangan tarik beton yang diijinkan.

di Prancis dan USA 20 kg/cm<sup>2</sup>  
 di Jerman dan Indonesia 10 "  
 tergantung mutu betonnya.

Diperlukan tulangan memanjang:  $0,4 \%$   $F_b$  yang berfungsi sebagai tulangan susut dan untuk momen tak tersangka.

Ini menyebabkan  $F_c$  yang diperlukan  $\approx F_c$  baja pelat pada pipa baja.

Jelas bahwa pada H besar, pipa beton tulang konvensional menjadi kurang ekonomis karena syarat Stadium II a ini.

#### 4. Pipa Pesat Golang (Sedijatmo)

Karena uniknya, telah diperoleh patent di beberapa negara Eropa dan Amerika.

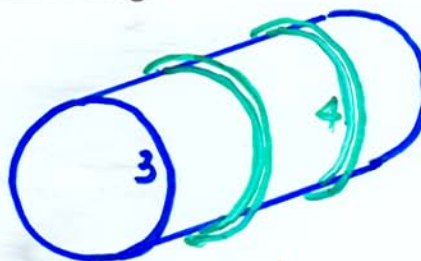
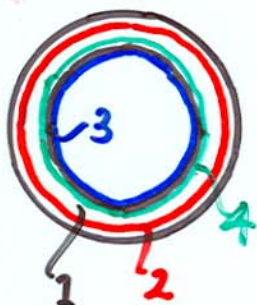
Pipa Golang dapat dipakai untuk H besar secara efisien.

Tujuannya: menggabungkan keuntungan pipa baja dan beton spt. tahan karat, tahan leleh, tahan tarikan dsbnya.

## Prinsipnya:

1. Beton hanya menahan tekanan dari luar pipa (-) → rational karena tak menahan tegangan tarik → boleh retak.  
 $\sigma_{bt}$  bukan soal.  $\delta_b = 10\% D$
2. Agar rapat air diberi mantel baja tahan karat (Cor-ten steel), panjang  $6m$ , yang ikut menahan sebagian tegangan tarik tangensial  $\delta_m = 3-5mm$   
 Cor-ten steel diinhor sebagai pelat (transport murah), di-las in situ
3. Sebagian besar tegangan tarik tangensial dipikul oleh tulangan cincin (pohok)
4. Beton antara tulangan cincin dan mantel bekerja sebagai landasan (pengisi). Teoretis dianggap sebagai lamel, praktis sebagai beton tumpang biasa.
5. Untuk memperbesar koefisien las tulangan cincin, tambuangannya lidah diletakkan pada 1 garis // sumbu pipa (lelaki spiral)
6. Agar mantel lebih kaku (selama di-transport) dan mantel terpegang lebih baik oleh beton, mantel diperkuat dengan rib-rib besi I atau E yang dilas sekeliling mantel pada beberapa tempat.

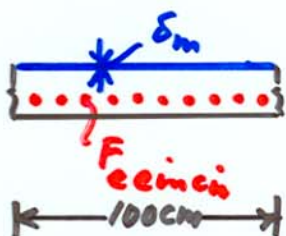
## • Pipa Golang (Sedijatmo)



- 1 beton tulang 1:2:3
- 2 tulangan cincin / pokok
- 3 mantel baja Corten
- 4 rib penguat (ber I atau E)

Hitungan:

$\sigma$  tarik tangensial ditahan oleh tulangan cincin dan mantel baja Corten  
 Karena adanya mantel baja Corten, beton boleh retak, tulangan cincin tak akan karapam.  
 $\therefore$  Stadium II a tak perlu. H bisa besar.



$$F_{\text{total}} > \frac{100kR}{\gamma[\sigma_c]}$$

$$F_{\text{total}} = F_{\text{cincin}} + 100\delta_m$$

## • Keuntungan Pipa Pesat Golang.

1. Dapat dipakai pada tekanan tinggi yang tak terbatas (praktis), karena  $\sigma_b$  tak menjadi soal.
2. Rapat air dengan adanya mantel baja Corten
3. Licin,  $k_s$  Strickler = 90  $\rightarrow$  ekonomis.

4. Mandel tahan karat. Corlon steel daya tahan terhadap karat 6x baja biasa (St 37)
5. Meskipun harga Corlon steel 30% lebih tinggi daripada baja biasa, tetapi  $[\sigma_c]$  jupa 10-25% lebih tinggi  $[\sigma_c]$  baja biasa. Sedang dalam hitungan dianggap sama. <sup>daripada</sup>  $[\sigma_c]$  baja biasa.  
 $\therefore$  Menambah angka keamanan.
6. Menghemat cetakan, karena mandel berfungsi sebagai cetakan dalam.
7. Syarat  $D > 1m$  untuk pipa beton "cast in situ", pada pipa pesat Golong menjadi tidak relevan.
8. Mandel dapat berfungsi sebagai tulangan memenjang dengan adanya rib-rib besi I atau E.
9. Seperti halnya pada PLTA Timo, setelah pendatar air, late diperlukan "shut off valve" (katup penutup) beserta rumah katupnya, karena pipa Golong itu perlu pemeliharaan.

● Contoh Pipa Pesat Sistem Golong yang telah dilaksanakan.

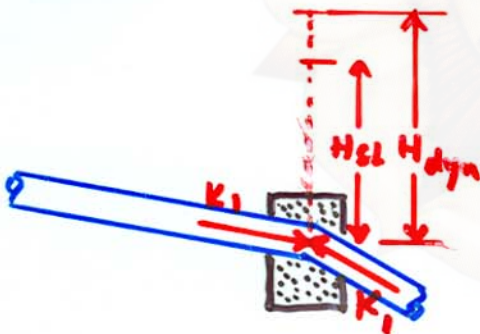
PLTA	$L_{\text{pipa}} (m)$	$H_{\text{max}} (m)$	$D (cm)$ max/min
Golong	2 x 404	120	100/90
Cikalong	2 x 1055	180	185/160
Timo	1 x 580	150	220
Ngebel	1 x 1048	240	100/70

ANKER BLOK (ANCHOR BLOCK, FESTPUNKT).

Lihat gambar TA 29 dan TA 30.

- Tugas: Memegang pipa pesat pada tanah fondasi; agar titik potong sumbu pipa pesat tidak bergerak. Pipa pesat masih dapat bergerak axial (masuk/susul)
- Tempat: Pada tiap belokan sumbu pipa pesat. Pada pipa pesat lurus, tiap jarak  $\leq 100m$
- Bahan:
  - pasangan batu bata (PLTA Lamajen)
  - " " " " ( " Jelok)
  - beton bulat (PLTA Plengan)
- Gaya-gaya pada Anker Blok. Dengan tambahan di Atas.

(1) Gaya hidrostatik ( $K_1$ ):



$$K_1 = A \gamma H_{dyn} \quad (\text{ton})$$

$A$  = luasampang pipa pesat (dalam) di tempat anker blok. ( $m^2$ )

$\gamma$  = B.J. air ( $t/m^3$ )

$H_{dyn} = 1.20 H_{st}$  (m)

= tinggi tekanan dinamik

(2) Gaya hidrodinamik ( $K_2$ ):

Atibal air mengalir yang berubah arah, maka timbul gaya  $K_2$  yang arahnya tpt gaya-gaya  $K_1$ .

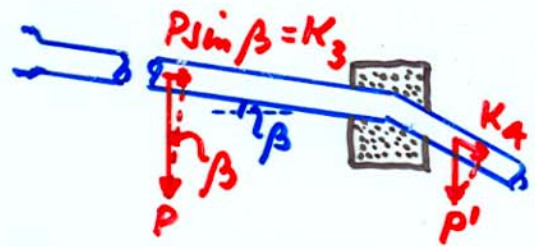
$$K_2 = \frac{Q \gamma V}{g} \quad (\text{ton})$$

$Q = Q_{peak}$  ( $m^3/det$ )

$V = V_{max} = \frac{Q_{peak}}{A}$  ( $m/det$ )

$g$  = percep. gravitasi ( $m/det^2$ )

(3) Gaya akibat berat pipa kosong ( $K_3$ ) di atas anker blok.



$$K_3 = P \sin \beta \quad (\text{ton})$$

$P$ : berat pipa pasat dari anker blok sampai sambungan atas (ton)

$\beta$ : sudut lereng sumbu pipa pasat dengan horisontal

Gesekan antara pipa pasat dan penyokong (Socket) dianggap licin sempurna.

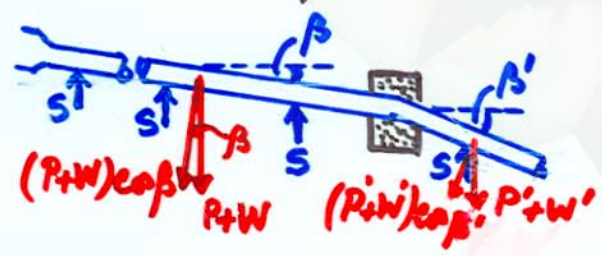
(4) Gaya akibat berat pipa kosong di bawah anker blok ( $K_4$ ):

$$K_4 = P' \sin \beta'$$

$P'$ : berat pipa pasat kosong dari anker blok sampai sambungan bawah (ton)

$\beta'$ : sudut lereng pipa pasat di bawah anker blok dengan horisontal.

(5) Gaya akibat gesekan antara pipa pasat sebelah atas dengan Socket ( $K_5$ ):



$$K_5 = f \cos \beta \left\{ P+W - \frac{1}{2}(p+w) \right\} \quad (\text{ton})$$

$P+W$  = berat pipa + air dari anker blok sampai joint atas

$p+w$  = berat pipa + air dari anker blok sampai Socket di atasnya

$\beta$  = sudut lereng sumbu pipa pasat dengan horisontal

$f$  = koefisien gesek antara pipa dengan Socket

Nilai f	
baja pada baja tanpa lubricant	0,30-0,50
" dengan graphite	0,20-0,22
" grease	0,12-0,15
steel roller on steel	0,05-0,10



- (6) Gaya aksial gesekan pipa pesat di bawah anker blok dengan Socket ( $K_6$ ):

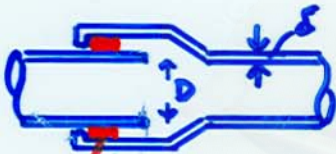
$$K_6 = f \cos \beta' \left\{ P + W - \frac{1}{2}(p+w) \right\} \quad (\text{ton})$$

arti parameter seperti pada  $K_5$ , hanya tanda ' berhubungan dengan pipa pesat di bawah anker blok.

Catatan:  $K_6$  ada jika terdapat Socket di bawah anker blok.

- (7) Gaya gesek pada sambungan (joint) sebelah atas ( $K_7$ ):

$$K_7 = f'' \pi (D + 2\delta) \quad \text{ton}$$



neoprene  
Sealing

$f'' = 0,75 \text{ t/m'}$  keliling pipa untuk neoprene sealing.

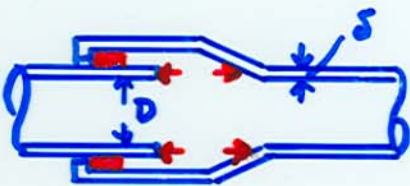
$D$ : diameter (dalam) pipa (m)

$\delta$ : tebal pipa (m)

- (8) Gaya gesek pada sambungan (joint) sebelah bawah anker blok ( $K_8$ ):

$$K_8 = f'' \pi (D + 2\delta) \quad (\text{ton})$$

- (9) Gaya tekanan hidrostatik pada pipa pesat di sambungan atas ( $K_9$ ):



$$K_9 = a_j H_{dyn} \quad (\text{ton})$$

$a = \pi D \delta \quad (\text{m}^2)$

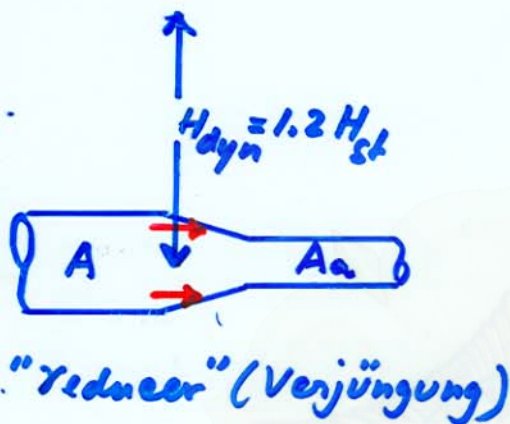
= luasampang pipa ( $\text{m}^2$ )

$H_{dyn}$  = tekanan dinamik di joint atas

(10) Gaya tekanan hidrostatik pada ujung pipa pesat di-  
tambungan bawah anker blok ( $K_{10}$ ):

$$K_{10} = a_j H_{dyn}' \quad (\text{ton})$$

(11) Gaya akibat "reducer" di atas anker blok ( $K_{11}$ ):



$$K_{11} = (A - A_a) j H_{dyn}' \quad (\text{ton})$$

$A$  =ampang lintang pipa pesat  
sebelum "reducer" ( $\text{m}^2$ )

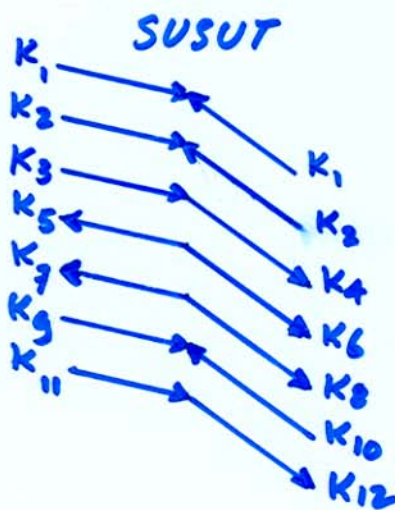
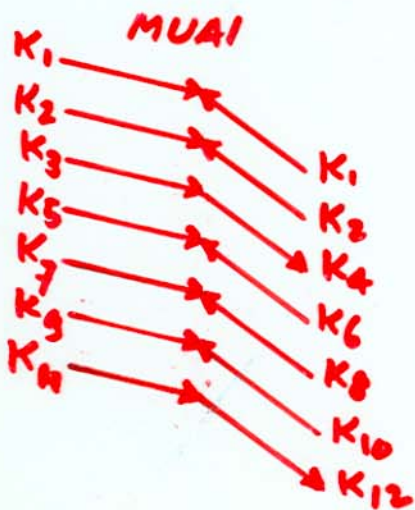
$A_a$  =ampang lintang pipa pesat  
di anker blok ( $\text{m}^2$ )

$H_{dyn}'$  = tinggi tekanan dinamik  
pada tempat "reducer" (m)

(12) Gaya akibat "reducer" di bawah anker blok ( $K_{12}$ ):  
ini jarang ada.

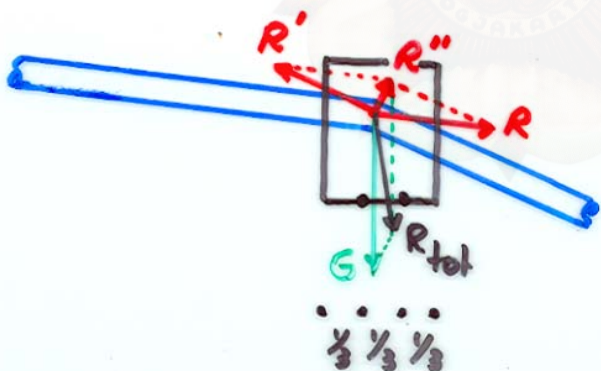
$$K_{12} = (A_a - A') j H_{dyn}' \quad (\text{ton})$$

• Arah gaya-gaya yang bekerja pada Anker blok.



- Syarat Kestabilan Anker Blok.

Jika resultante gaya-gaya yang sejajar sumbu pipan pasak sebelah atas anker blok =  $R$  dan resultante gaya-gaya yang sejajar sumbu pipa pasak sebelah bawah anker blok =  $R'$ , maka resultante  $R$  dan  $R'$  ialah  $R''$  dengan berat anker blok  $G$  menjadi  $R_{\text{total}}$  haruslah berletak dalam inti (kern) atau "middle third".



Mendimensi Kolam Pasir Tipe Büchi.

$$L = v_h \cdot T_h \quad (1)$$

$L$  = panjang neto kolam (m)  
 $v_h$  = kecepatan rata-rata horizontal dalam kolam (m/det)  $0,15-0,30 \frac{m}{det}$   
 $T_h$  = waktu lintas sepanjang  $L$  (det)

Agar semua bahan padat yang dalam suspensi mengendap di kolam perlu syarat:

$$T_h > T_v = \frac{H}{v_v} \quad (2)$$

$T_v$  = waktu butir mengendap sedalam  $H$  (det)

$v_v$  = kecepatan mengendap dalam air mengalir (m/det)

Menurut Levin:

$$v_v = (v_v) - \eta v_h$$

$(v_v)$  = kecepatan mengendap dalam air diam (m/det) → Grafik L Sed, TA 35

$\eta = \frac{0,132}{\sqrt{H}}$  menurut Bestelli, Büchi, Velikanov dan Sokolov

$$\text{Sehingga: } v_v = (v_v) - \frac{0,132 v_h}{\sqrt{H}} \quad (3)$$

$$(2) \text{ dan } (3) \rightarrow T_v = \frac{H}{v_v} = \frac{H}{(v_v) - \frac{0,132 v_h}{\sqrt{H}}} = \frac{H \sqrt{H}}{(v_v) \sqrt{H} - 0,132 v_h}$$

$$(1) \text{ dan } (2) \rightarrow L > v_h \cdot T_v \text{ atau}$$

$$L > \frac{v_h \cdot H \sqrt{H}}{(v_v) \sqrt{H} - 0,132 v_h} \quad (4)$$

Selain itu Hukum Kontinuitas:

$$H = \frac{Q}{B \cdot v_h} \quad (5)$$



• Dimensi lobang kisi.

$$F_n = \frac{Q}{v_k}$$

$Q$  = debit max

$v_k$  = kecepatan lewat lobang kisi:  
= 0.60 - 1.00 m/det (Indonesia)

$$F_{br_1} = 2 F_n$$

$F_n$  = luas lobang kisi yang tidak akan tertutup oleh kotoran

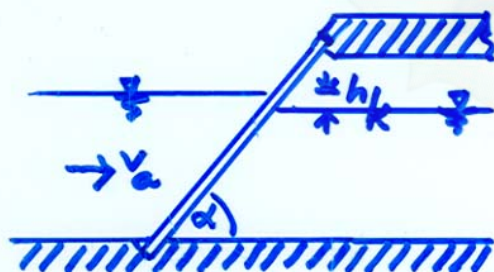
$F_{br_1}$  = luas lobang kisi

$$F_{br_2} = (3 \text{ a } 4) F_n$$

$F_{br_2}$  = luas tampang lobang termasuk besi-besi kisi.

• Kehilangan tinggi tenaga head kisi ( $h_k$ ):

Rumus KIRSCHMER:



$$h_k = \xi \frac{v_a^2}{2g}$$

$$\xi = \beta \left(\frac{\delta}{a}\right)^{4/3} \sin \alpha$$

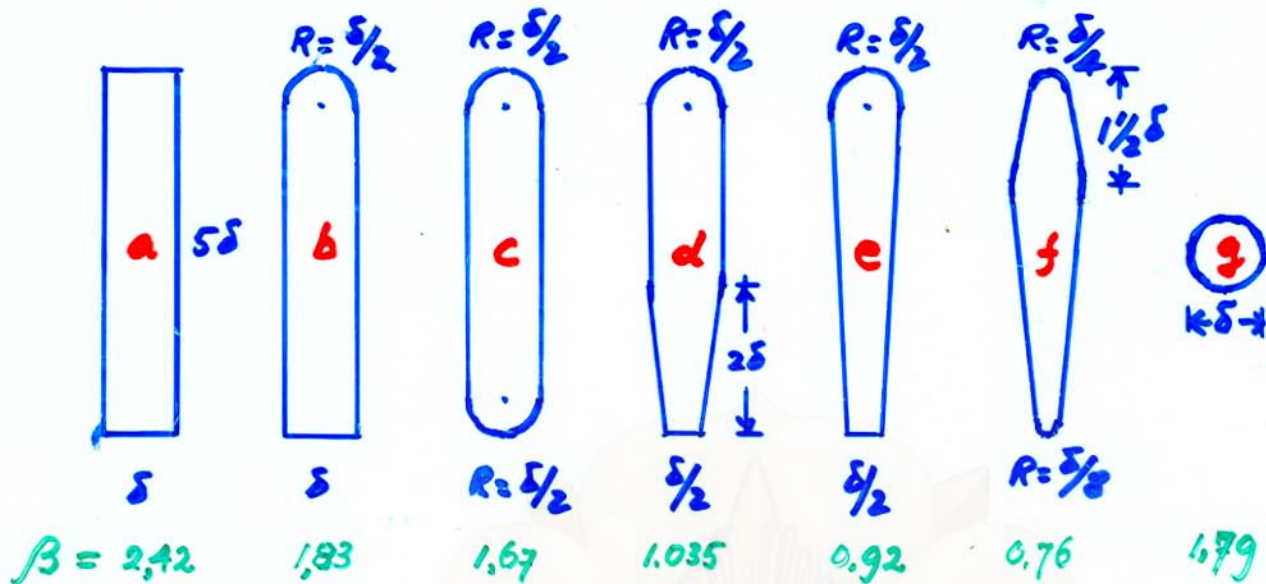
$v_a$  = kecepatan datang

$\beta$  = koefisien bentuk tampang kisi

$\delta$  = tebal kisi

$a$  = jarak antara kisi

• Beberapa nilai koefisien  $\beta$  :



- Kesimpulan :
- Bentuk terbaik adalah **f** dengan  $\beta = 0.76$  tetapi membuatnya sukar  $\rightarrow$  mahal, untuk PLTA besar.
  - Bentuk terjelek adalah **a** dengan  $\beta = 2.42$  membuatnya mudah  $\rightarrow$  murah, untuk PLTA kecil.
  - Bentuk **g** juga praktis
  - Umumnya  $l = 5\delta$ . Jika  $l > 5\delta$  pengaruhnya kepada nilai  $\beta$  tak seberapa (THOMAS, 1926)

## TURBIN AIR (HYDRAULIC TURBINE)

Macam turbin tergantung angka putar spesifik atau kecepatan spesifiknya ( $n_s$ ).

Definisi : Angka putar spesifik ( $n_s$ ) ialah banyaknya putaran tiap menit (rpm) turbin yang homolog (geometrik sebentuk), yang dengan  $H_m = 1$  m menghasilkan output 1 DK.

Di negara Anglo-Sakson dipakai definisi lain, sbb.:

- Angka putar spesifik atau kecepatan spesifik ( $N_s$ ) ialah banyaknya putaran tiap menit (rpm) turbin yang homolog (geometrik sebangun), yang dengan  $H_n = 1$  ft menghasilkan output 1 HP (1 DK)

Rumus:

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H_n^{5/4}} \quad (\text{metrik})$$

$n$  = putaran (rpm)  
 $P$  = output (DK)  
 $H_n$  = terjun efektif (m)

$$N_s = \frac{n\sqrt{P}}{H_n^{5/4}} \quad (\text{Inggris})$$

$n$  = putaran (rpm)  
 $P$  = output (HP)  
 $H_n$  = terjun efektif (ft)

Konversi:

$$n_s = 4,42 N_s$$

Di Jepang dipakai:

$$n_s' = \frac{n\sqrt{P}}{H_n^{5/4}}$$

$n$  = putaran (rpm)  
 $P$  = output (kw)  
 $H$  = terjun efektif (m)

### • Macam Turbin.

1. T. Impuls : a. Single jet (Pelton wheel)  $4 - 30$  ( $n_s$  TA 36)  
 b. Multiple jets (Doble ..)  $30 - 70$

Catatan: Batas-batas nilai  $n_s$  tidak eksak!



## 2. Turbin Reaksi :

75

## a. Francis type (TA 37)

- Francis Low speed Speed (FLL) 50-125
- " Normal " " (FNL) 125-200
- " High " " (FSL) 200-350
- " Express " " (FEL) 350-500

## b. Propeller type (Axial flow type)

- Fixed blade type (Nagler type) 400-800 (TA37)
- Adjustable blade type } (Kaplan type) 500-1000 (TA38)
- (Movable " " }
- Bulb turbine } (TA 39)
- (Rohr turbine) }

## • Evolusi turbin :

Dalam perkembangannya, turbin mengalami perubahan sbt.:

- (1) Arah arus lewat sudu berubah dari tangensial (Pelton) menjadi radial (Francis), dan akhirnya axial (Propeller)
- (2) Cincin bawak (Francis) makin lama menghilang (Propeller)
- (3) Jumlah sudu makin berkurang (Pelton banyak → Francis → Propeller ada yg 2 à 3)

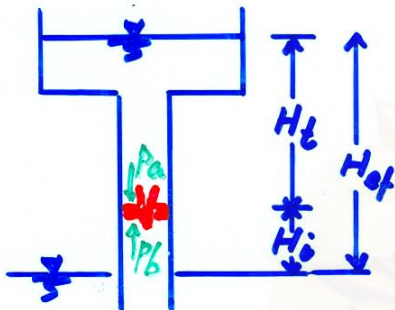
## • Efisiensi turbin :

Efisiensi turbin tidaklah tetap, tergantung keadaan beban. Masing-masing tipe mempunyai ciri sendiri. (TA40)

## • Penempatan (setting) turbin :

- Turbin impuls harus diletakkan di atas muka air belahang ("tail water level").

- Turbin Reaksi penempatannya agak bebas, karena tenaga yang menggerakannya tergantung dari beda tekanan di atas dan di bawah sudu-sudunya



$$P_a = \gamma H_t + P_{atm}$$

$$P_b = P_{atm} - \gamma H_i$$

$$P_a - P_b = \gamma (H_t + H_i) = \gamma H_{ef}$$

$$P_{ef} = \gamma H_{ef}$$

∴ Letak turbin tak menjadi soal.

- Dapat juga turbin diletakkan di bawah muka air belakang. Ini kurang disukai karena :

- montage dan inspeksi lebih sulit.

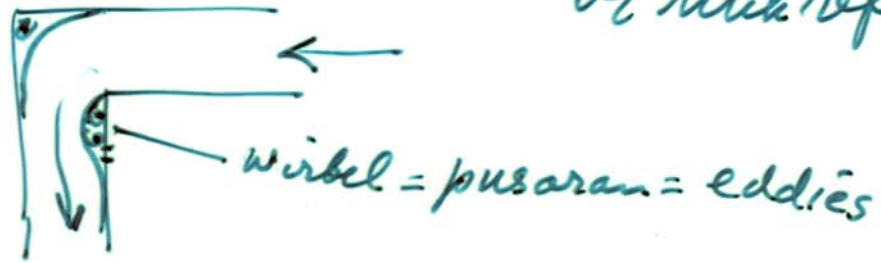
- Jika turbin diletakkan terlalu tinggi terhadap muka air belakang, maka  $H_i$  besar,  $p_b$  sangat kecil hingga bisa terjadi kavitasi yang mengakibatkan bahan "pitting" (baja berlobang-lobang)

## Berbagai istilah diameter turbin.

1. T. Pelton.  $D_1$  = diameter "pitch circle" (tempat kedudukan pusat besat sudu-sudu)  
(TA 36)
2. T. Francis.  $D_1$  = diameter cincin di tengah-tengah distributor (diameter nominal)  
(TA 37)  
 $D_2$  = diameter terkecil yang diukur di sebelah dalam cincin bawah (diameter minimum).  
 $D_3$  = diameter sebelah dalam "discharge ring" ("discharge diameter")
3. T. Propeller.  $D_1$  = diameter cincin diukur dari ujung sudu sampai ujung sudu (diameter nominal)  
(TA 37)  
 $D_2$  = diameter lingkaran yang melalui titik tengah sudu-sudu  
 $D_3$  = diameter sebelah dalam "discharge ring" ("discharge diameter")

cavities  $\rightarrow$  pitting

$\sigma_{plant} \rightarrow \sigma_{kr}$   
di titik referensi

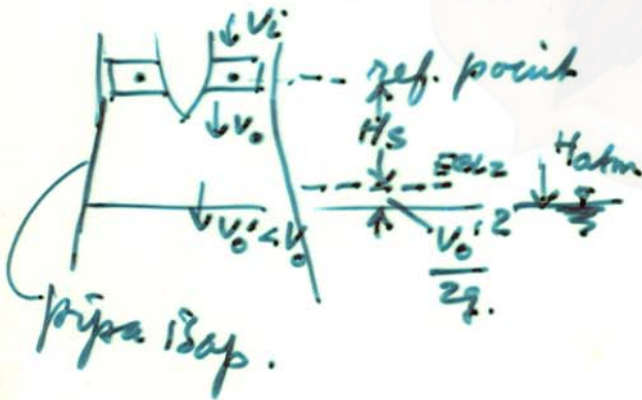


Plant sigma kritik (min) = Koef. Kavitasi

$$\sigma_{min} = \sigma_{kr} \quad \text{TA-41}$$

Turbin Prop = ref. point = tengah sudu

" Francis = " a = tepi bawah  
ancin bawah  
(lower shroud)



Kritik :

$$H_{min} = H_{attm} - H_s - \frac{v_0'^2}{2g} = H_v$$

$$\frac{v_0'^2}{2g} = H_{attm} - H_v - H_s$$

$$" = H_b - H_s$$

$$\text{THOMA} = \frac{v_0'^2}{2g} = \sigma \cdot H_{eff}$$

$$\boxed{\sigma = \frac{H_b - H_s}{H_{eff}}} \quad \text{THOMA}$$

\* Menentukan elevasi garis tengah distributor

- 1)  $T_k$  dari TA-41
- 2)  $H_b$  " "
- 3)  $H_s$  max dari THOMA
- 4)  $A$  dari Francis :

Francis:  $\frac{A}{D_3} = \frac{N_s^{0.34}}{10.7}$

$D_{35} = \frac{129}{N_s^{0.37}}$  (inci)

$D_{35} = \frac{113}{N_s^{0.34}}$  (inci)

Prop:  $\frac{A}{D_3} = 0.41$

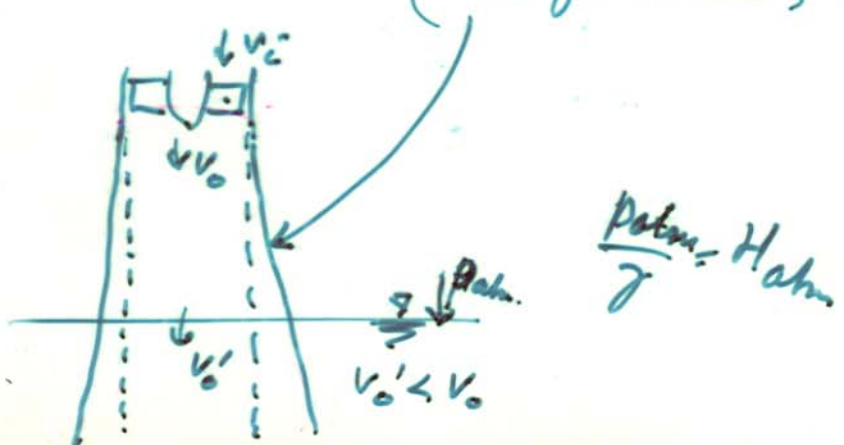
$D_3 = m D_{35}$

$m = \frac{VP}{H_n^{3/4}}$

inci  $\rightarrow$  ft.   
 Eugler

- 5)  $A + H_s \rightarrow$  ft
- 6) Elev. garis tengah distributor (max) =  
Min. tailwater level (1 turbin) +  $A + H_s$

\* Pipa Isap hanya pd turb reaksi  
(draft tube, Saugrohr)



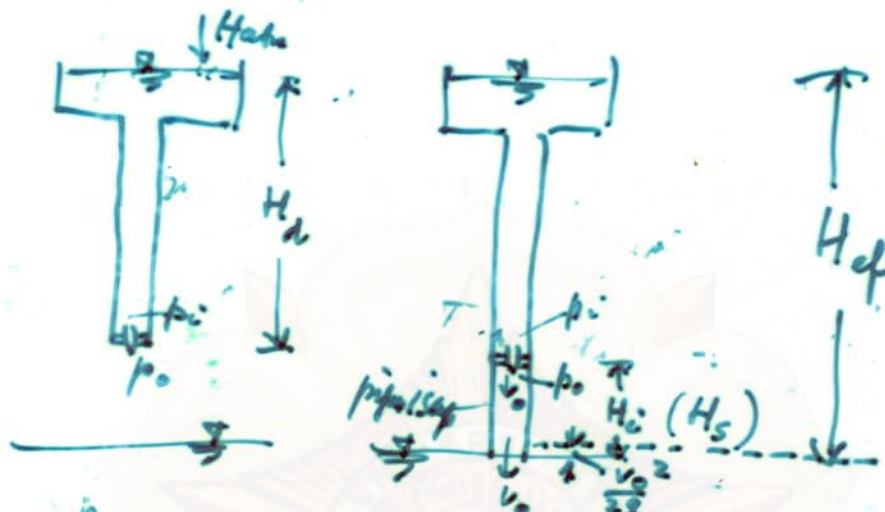
Tugas :

1) memperbesar daya dgn memperbesar  $H_m$ .

2) " " " mengambil kembali:

bagian energi yg hilang akibat  $v_0$  (energy regain)

1)



$$\frac{p_i}{\gamma} = H_m + H_d$$

$$\frac{p_o}{\gamma} = H_m$$

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = H_d$$

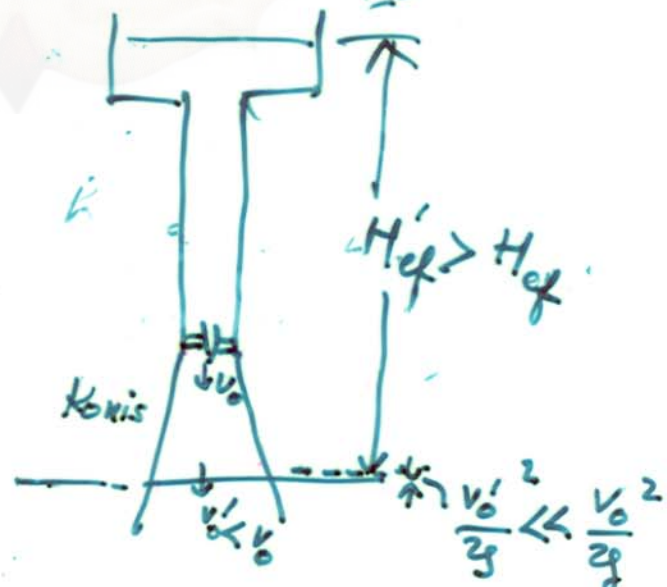
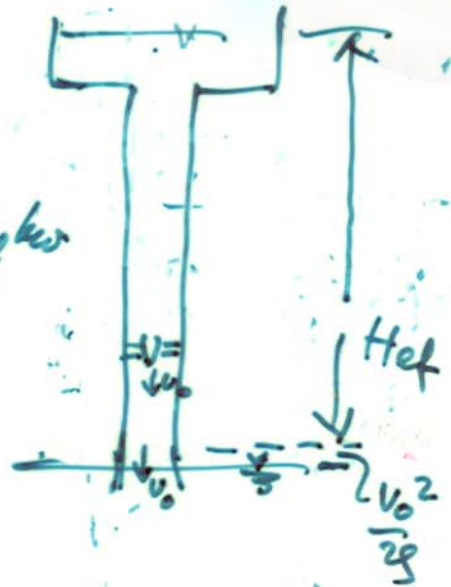
$$\frac{p_i}{\gamma} = H_m + H_d$$

$$\frac{p_o}{\gamma} = H_m + H_i$$

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = H_d + H_i = H_{ef}$$

2)

$$P = 9.879 Q H_{ef} \text{ kw}$$



Kepulauan: Turb. Kaplan:  $\frac{v_0^2}{2g} = (0,30-0,50) H_n$

Francis:  $\frac{v_0^2}{2g} = 0,06 H_n$   
 0,10  
 0,15  
 0,25

Cond: Energy regain perlu

