

# Bangunan Tenaga Air: Kolam Tando - Waduk

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan  
Fakultas Teknik UGM

oleh

Djoko Luknanto

# Skema Bangunan Tenaga Air



Ilustrasi kebutuhan listrik untuk pelbagai kawasan ...

# KEBUTUHAN LISTRIK DIAGRAM BEBAN HARIAN

# Kebutuhan Listrik Harian

Bangunan Tenaga Air (BTA) biasanya melayani kebutuhan listrik sebuah kawasan. BTA ini biasa berdiri sendiri atau merupakan bagian suatu jaringan listrik nasional.

Kebutuhan listrik sebuah kawasan biasanya dinyatakan dalam sebuah kurva yang diberi nama Diagram Beban Harian (DBH).

Diagram Beban Harian dapat merupakan DBH kebutuhan nyata sebuah kawasan, maupun prakiraan kebutuhan yang harus dilayani oleh sebuah BTA.

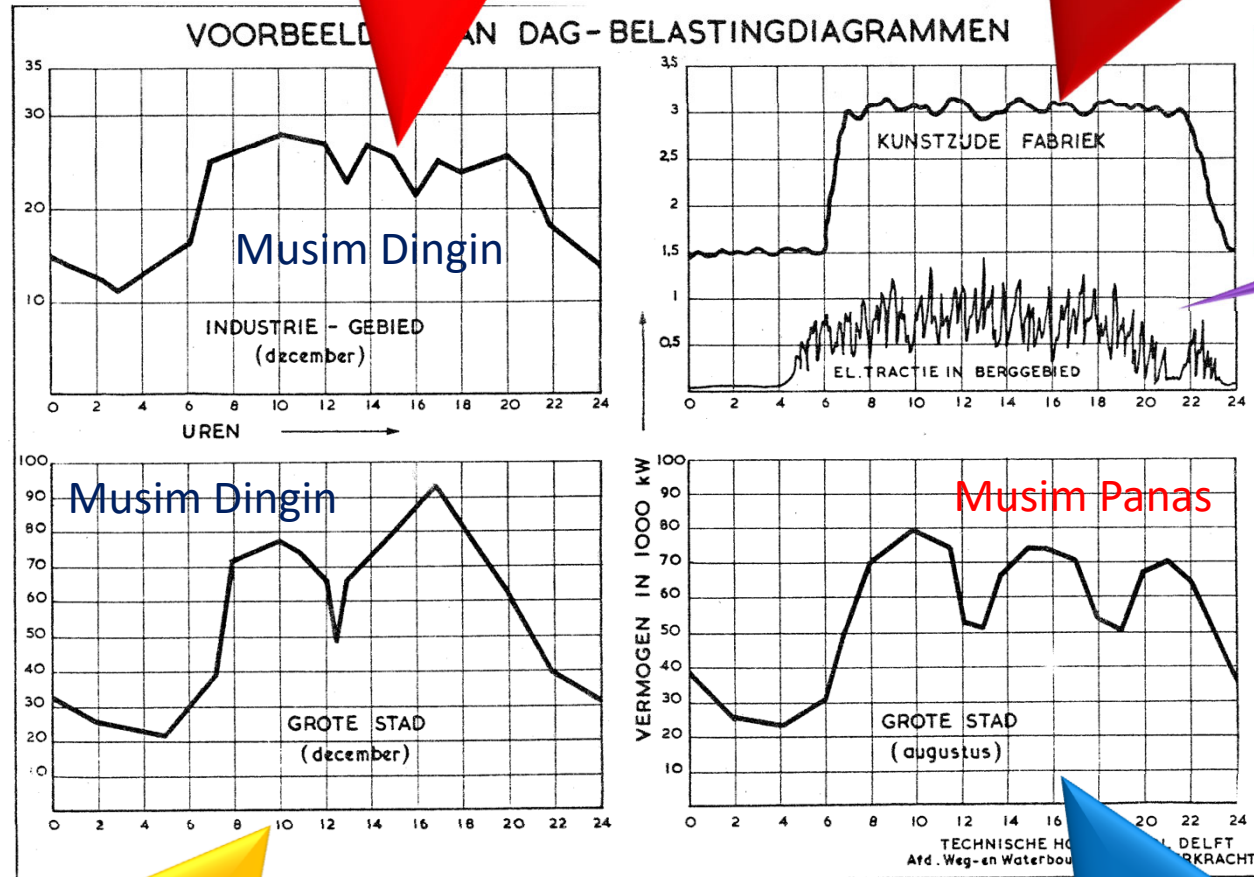
DBH untuk sebuah kawasan mungkin berlainan dengan kawasan yang lain. Pada tayangan berikut dikenalkan pelbagai DBH untuk pelbagai jenis kawasan.

# Diagram Beban Harian (Eropa)

Kawasan Industri

Pabrik Sutra Tiruan

Trem Listrik  
Pegunungan

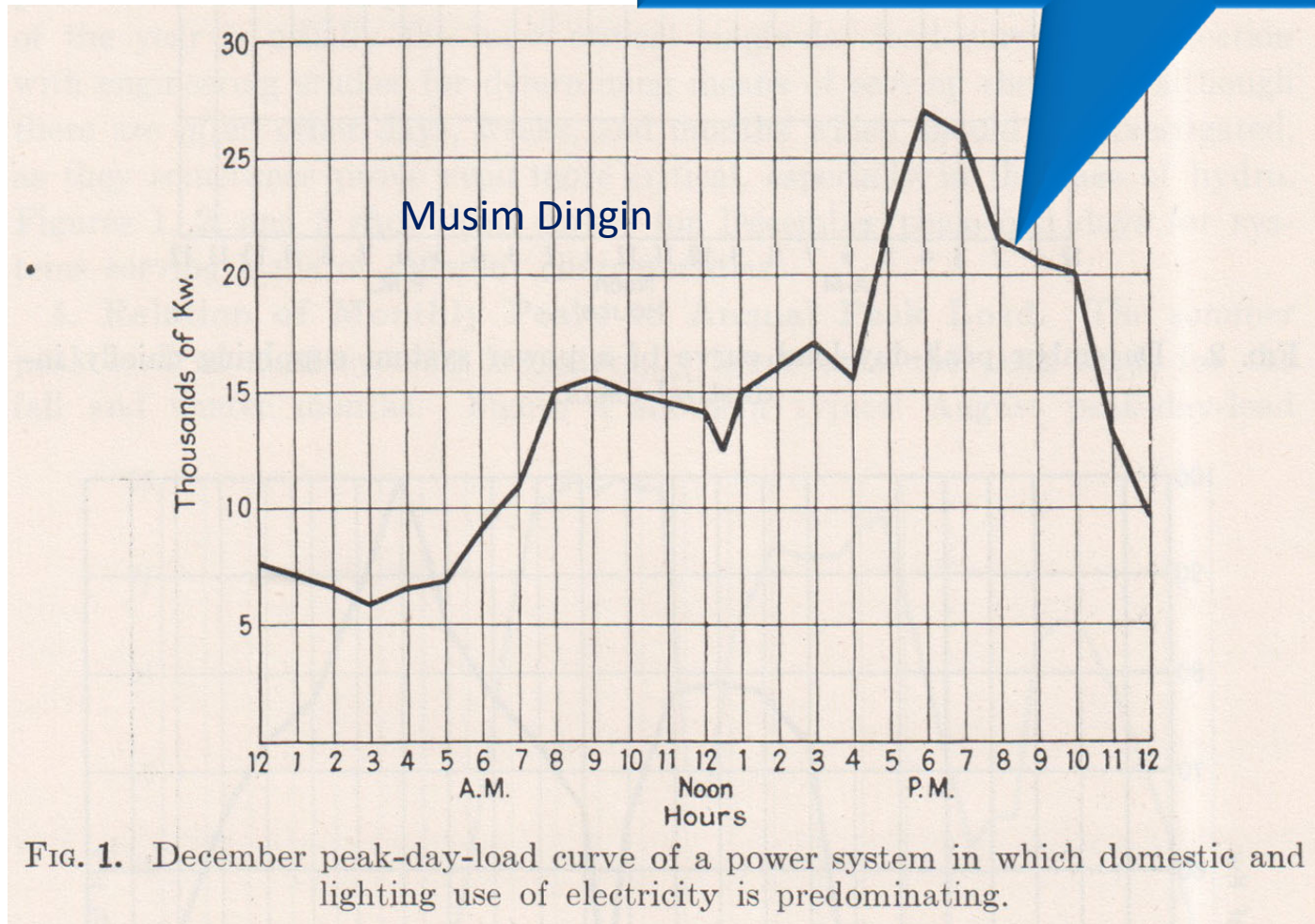


Kota Besar Desember

Kota Besar Agustus

# Diagram Beban Harian (AS)

Kawasan Perumahan



# Diagram Beban Harian (AS)

Kawasan Industri

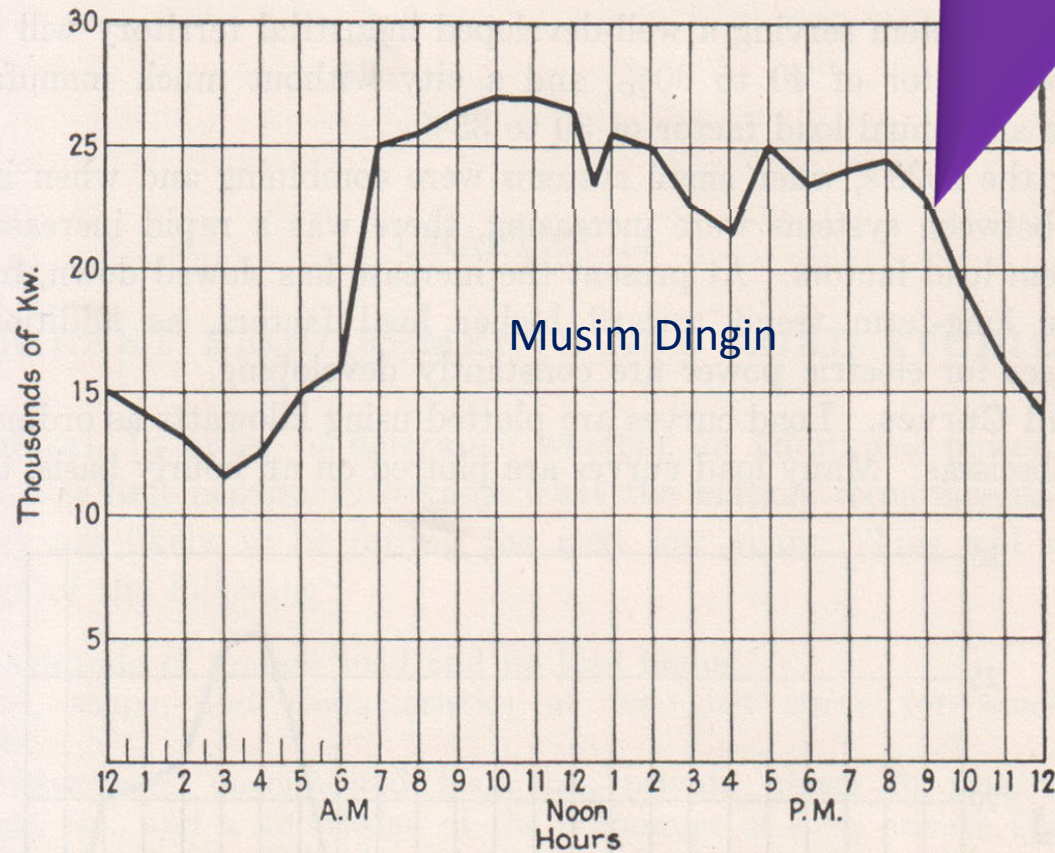


FIG. 2. December peak-day-load curve of a power system supplying chiefly industrial users.

# Diagram Beban Harian (AS)

Kawasan Perkotaan

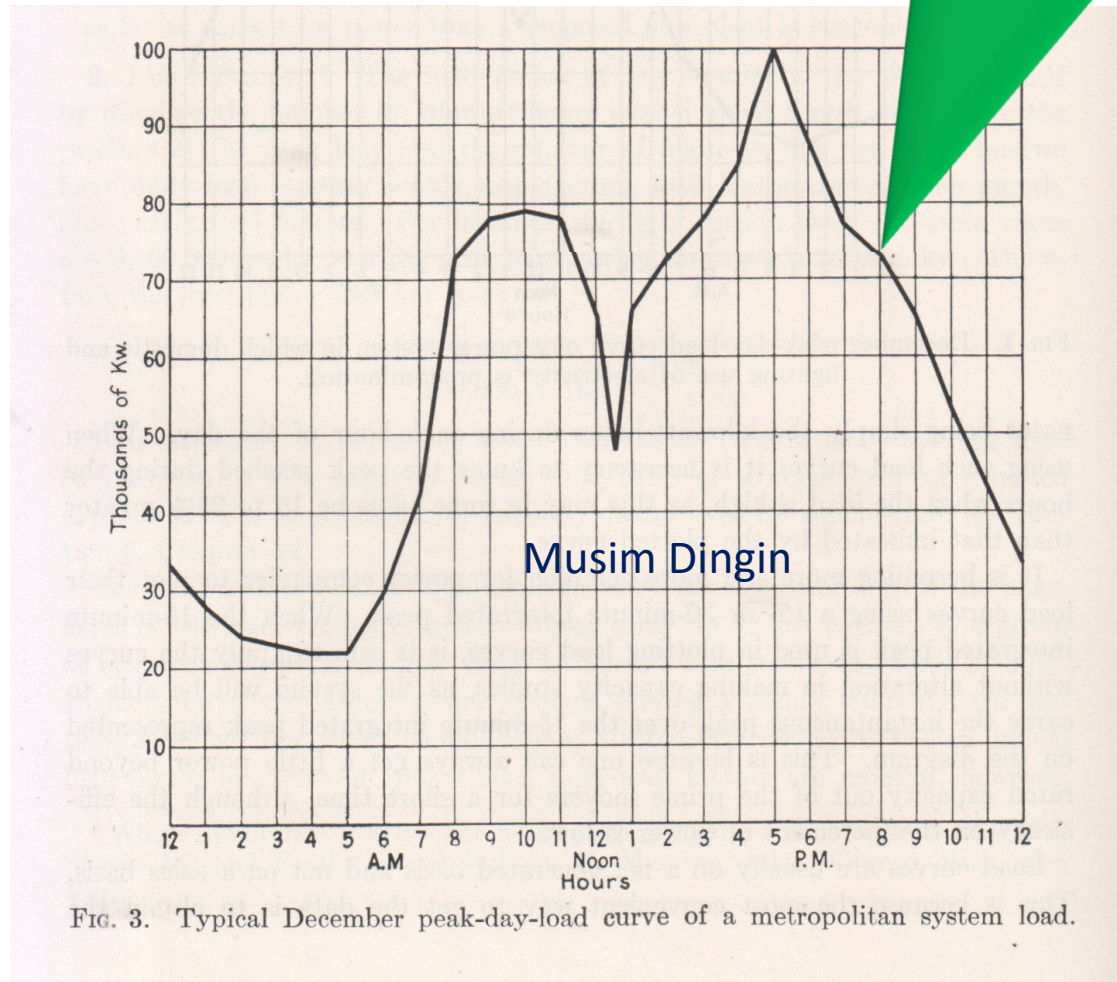


FIG. 3. Typical December peak-day-load curve of a metropolitan system load.



# Diagram Beban Harian (AS)

## Kawasan Perkotaan bulan Agustus

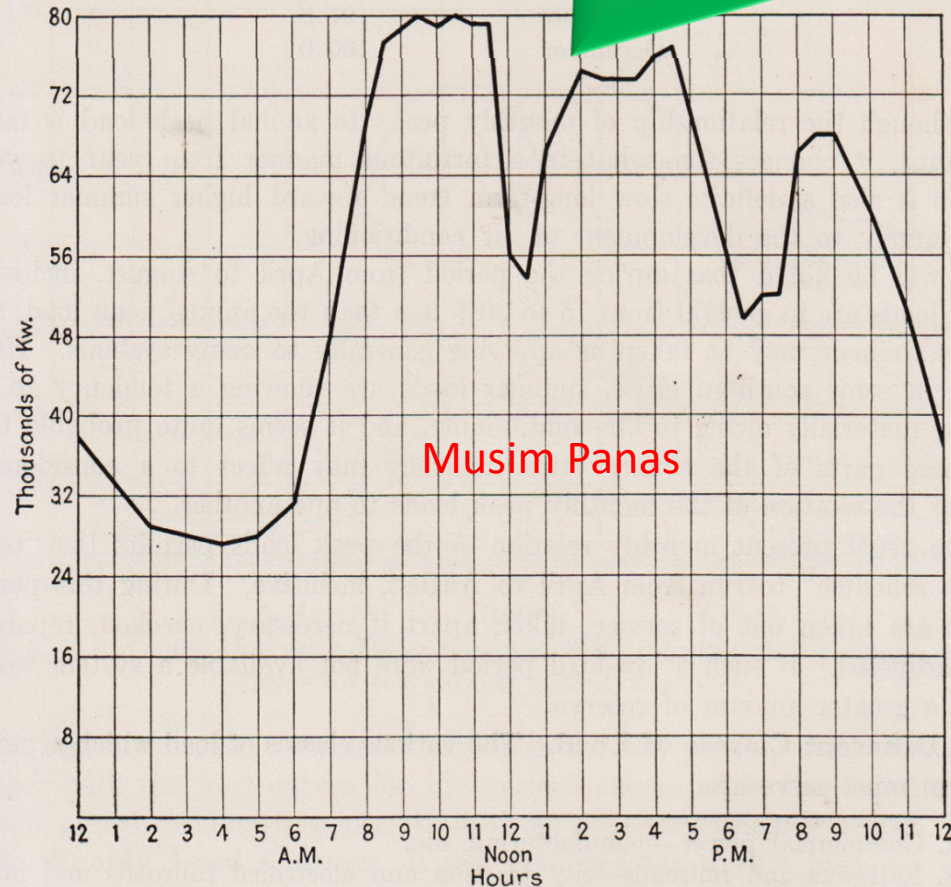
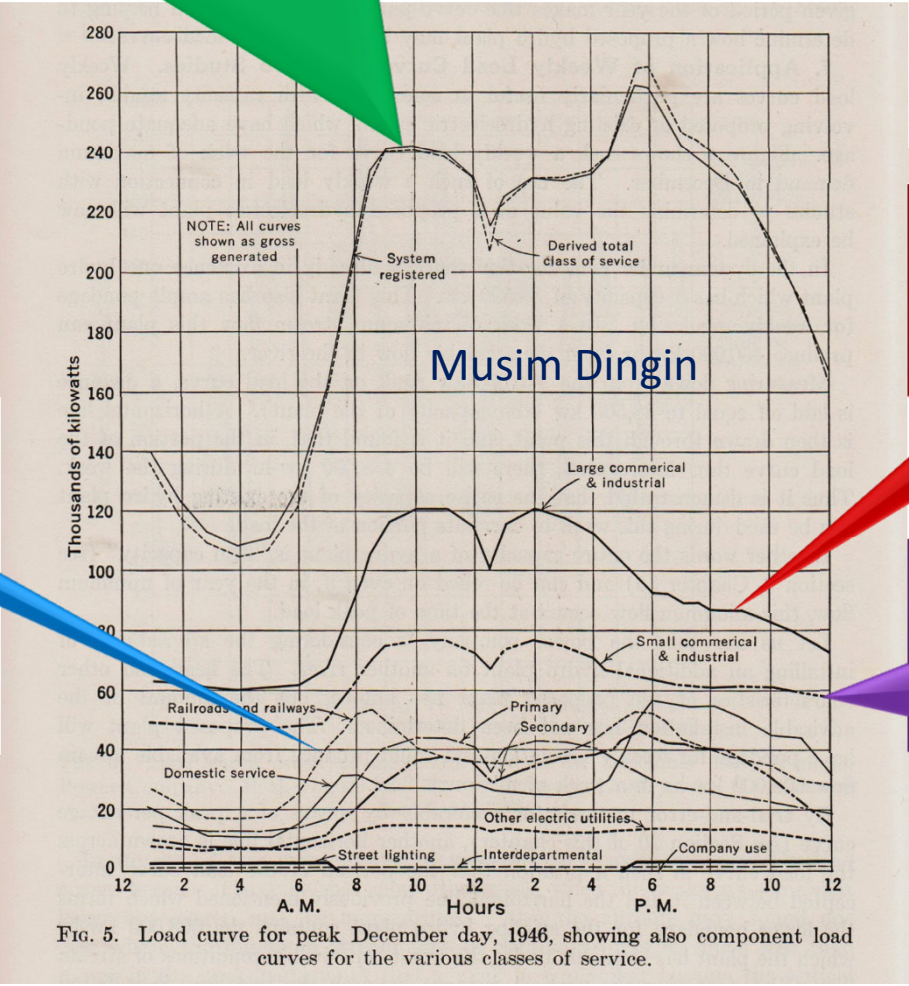


FIG. 4. Typical August peak-day-load curve of a metropolitan system load.

# Diagram Beban Harian (AS)

DBH total bulan Desember

Kereta Api



Komersial & Industri Besar

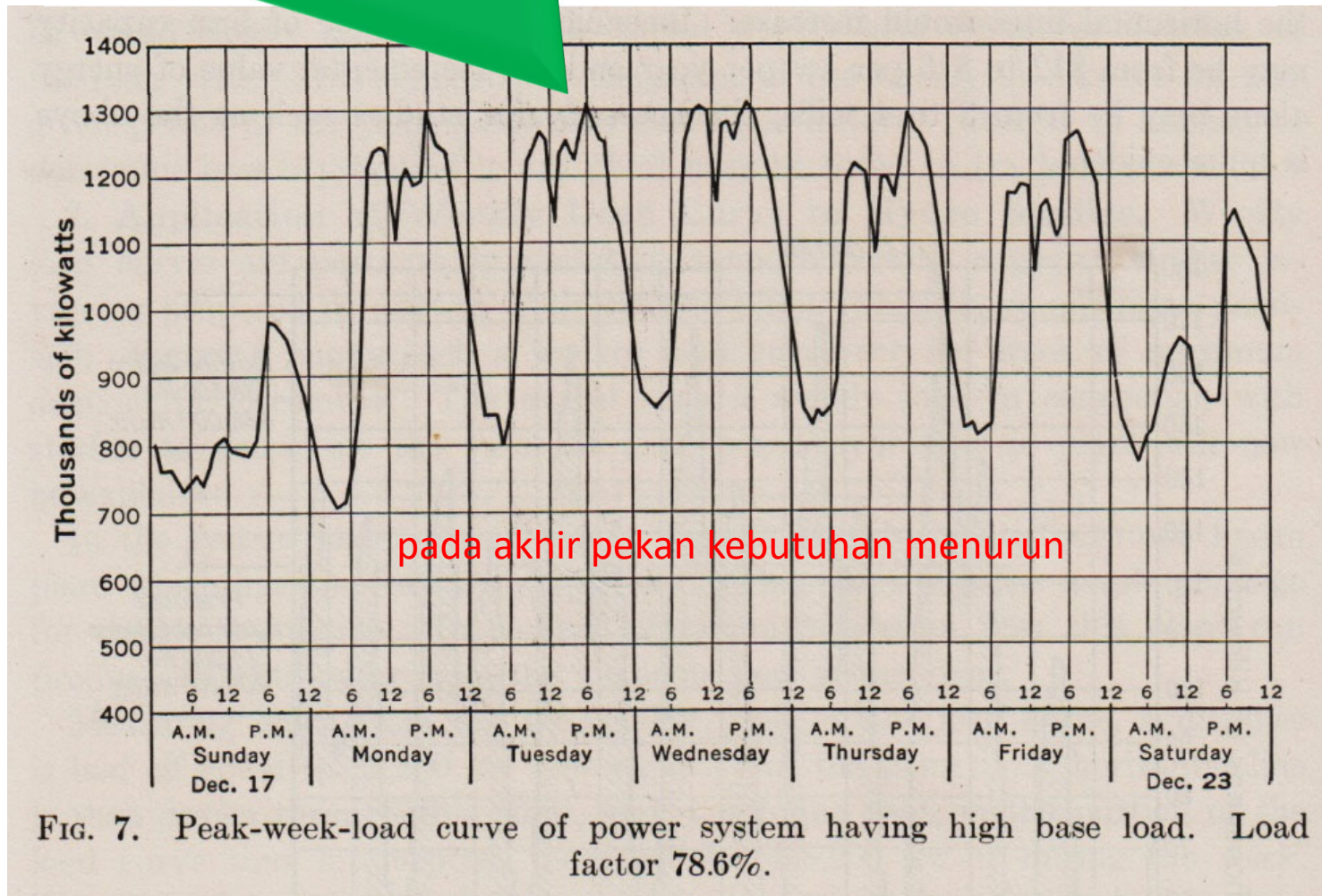
Komersial & Industri Kecil

FIG. 5. Load curve for peak December day, 1946, showing also component load curves for the various classes of service.

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# Diagram Beban Harian (AS)

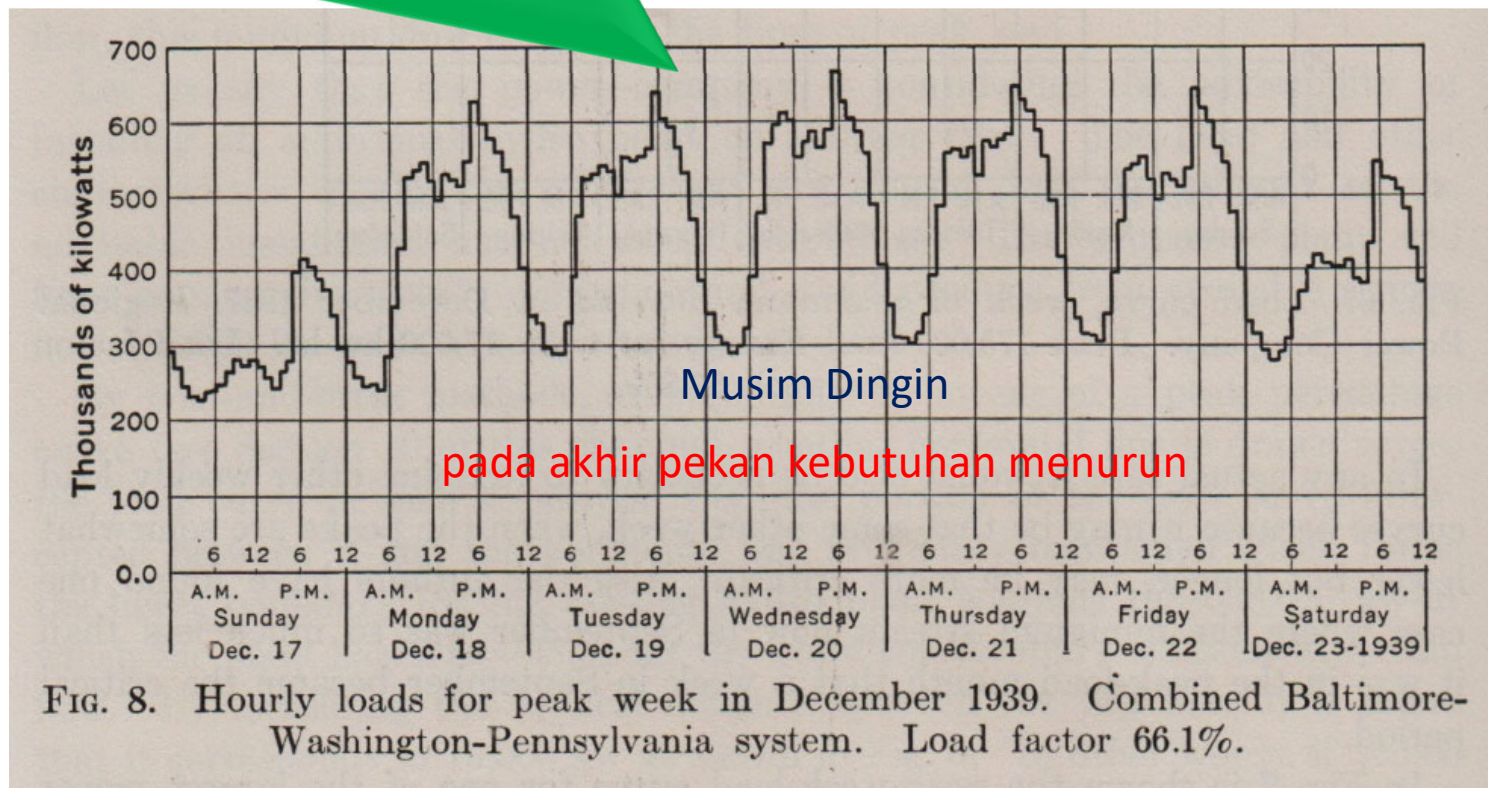
DBH selama seminggu, beban dasar besar



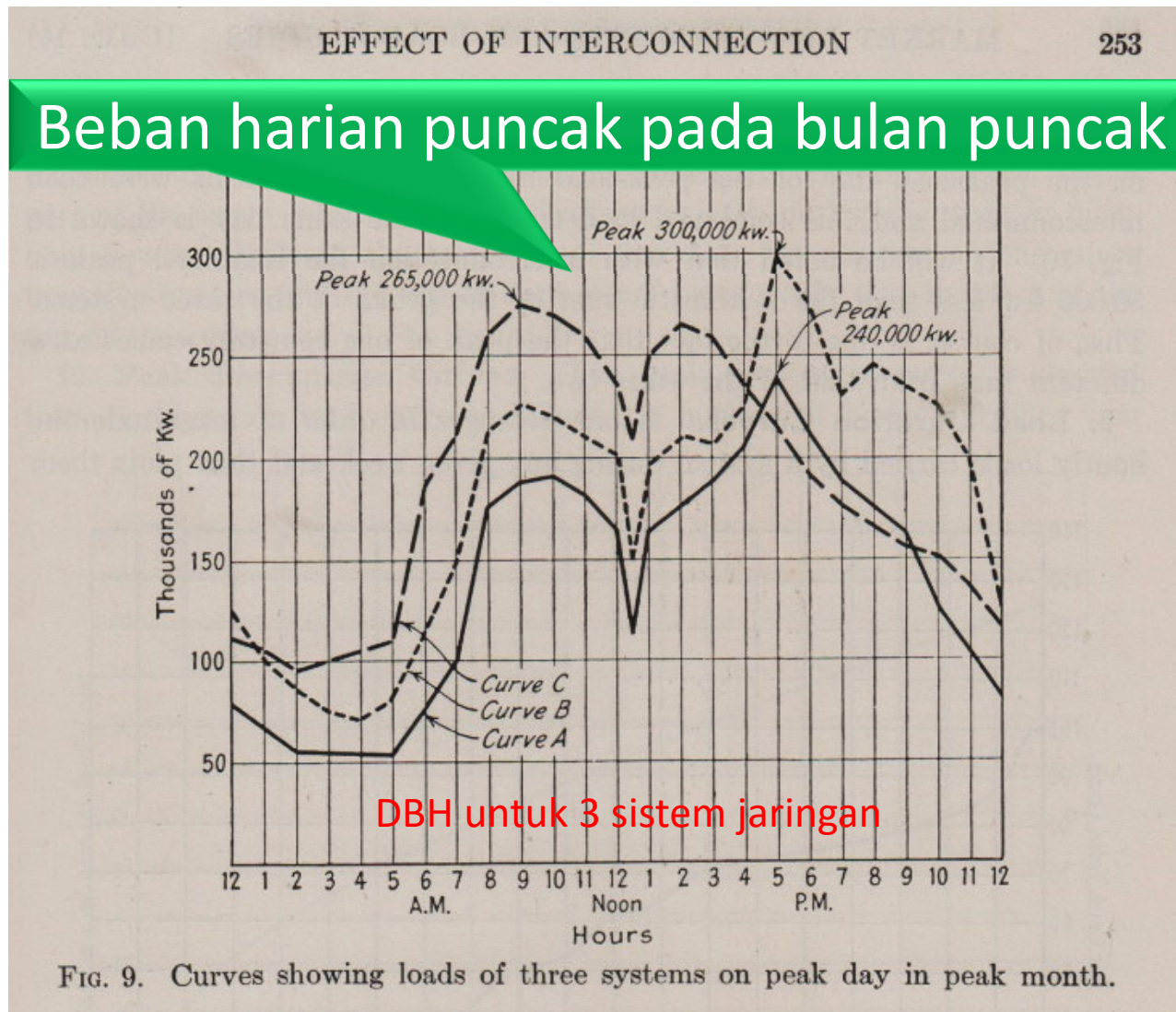
William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# Diagram Beban Harian (AS)

Gabungan DBH selama seminggu untuk 3 kota



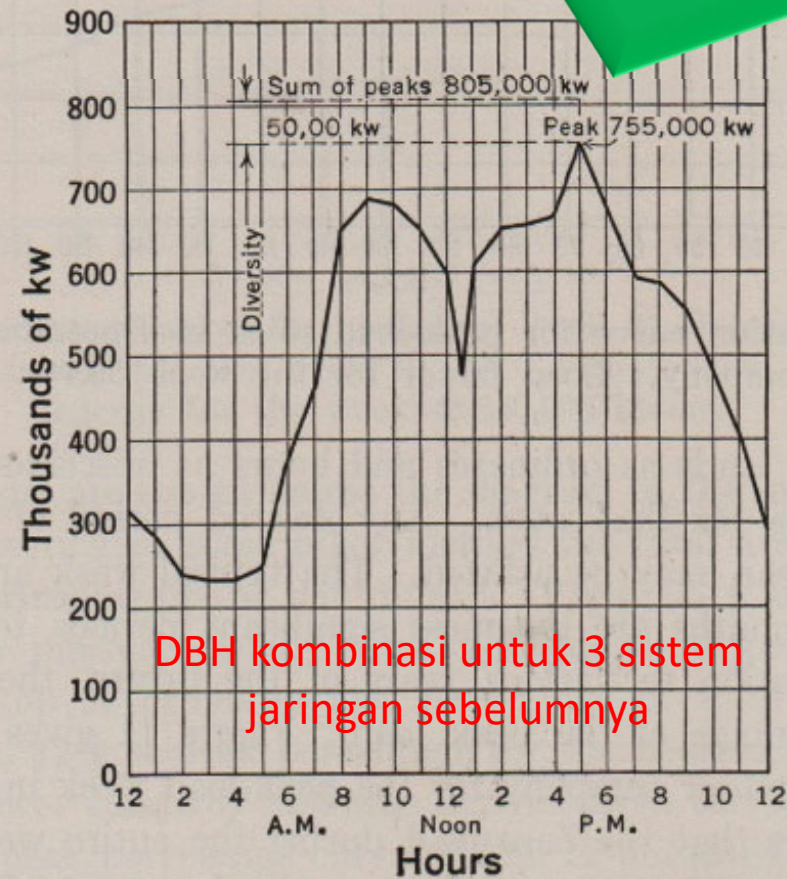
# DBH Interkoneksi 3 Jaringan (AS)



William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# DBH Interkoneksi 3 Jaringan (AS)

Beban harian total pada bulan puncak



DBH kombinasi untuk 3 sistem jaringan sebelumnya

FIG. 10. Combined load curve for three systems shown in Fig. 9 showing diversity in load.

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# Beban Dasar Kebutuhan Listrik (AS)

Saat  $Q$  sungai besar:  
pelayanan beban dasar  
menggunakan TA & beban  
puncak menggunakan TU

Saat  $Q$  sungai rendah:  
pelayanan beban dasar  
menggunakan TU & beban  
puncak menggunakan TA

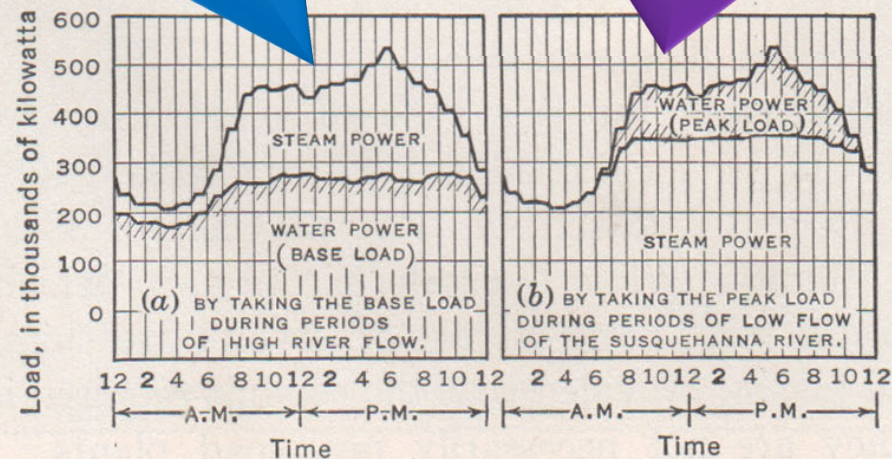


FIG. 6. Utilization of run-of-river plants with pondage. Combined 24-hr load curve of Baltimore, Md., and Washington, D. C., showing how systems are served by water power from Holtwood and Safe Harbor plants of Pennsylvania Water and Power Co. (From "Combined Energy Generation," by Ezra B. Whitman, *Trans. A.S.C.E.*, Vol. 104, p. 1120, 1939.)

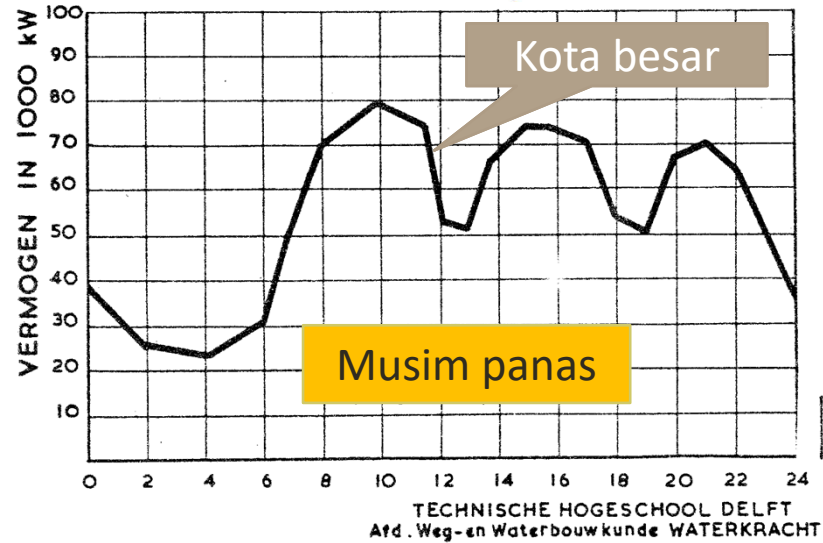
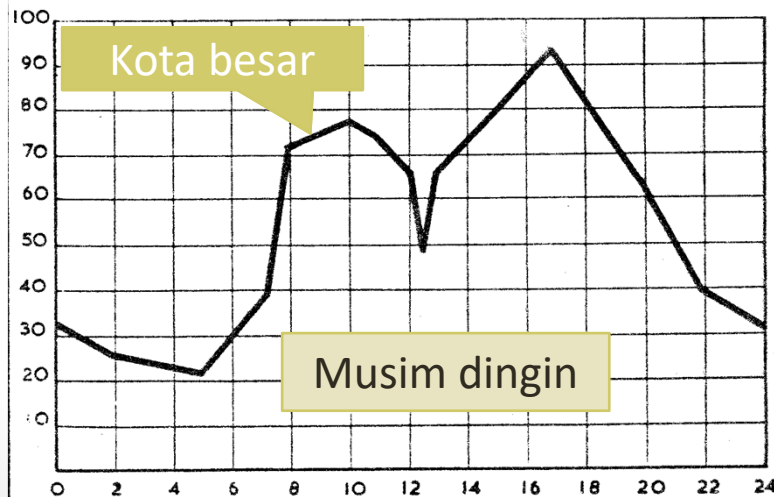
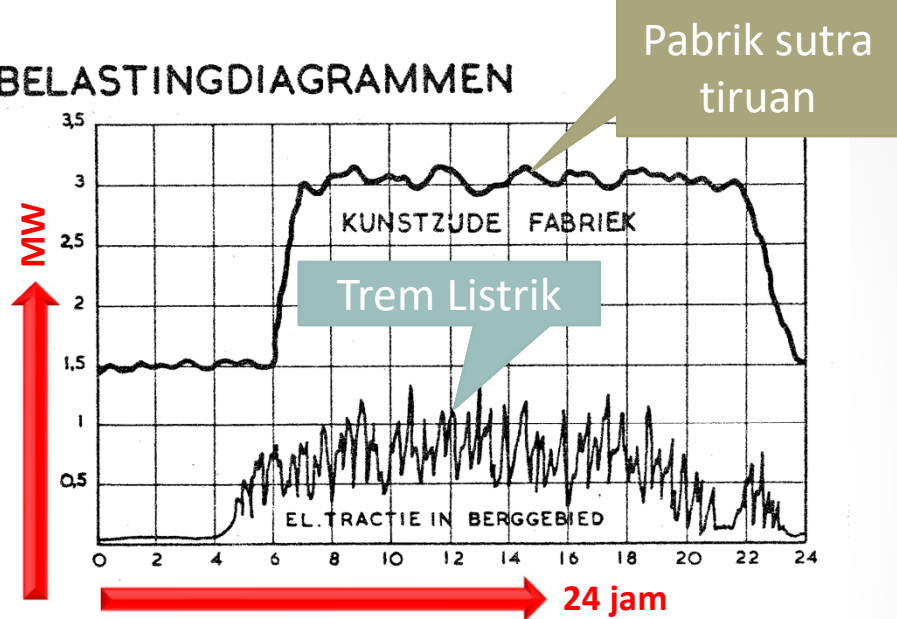
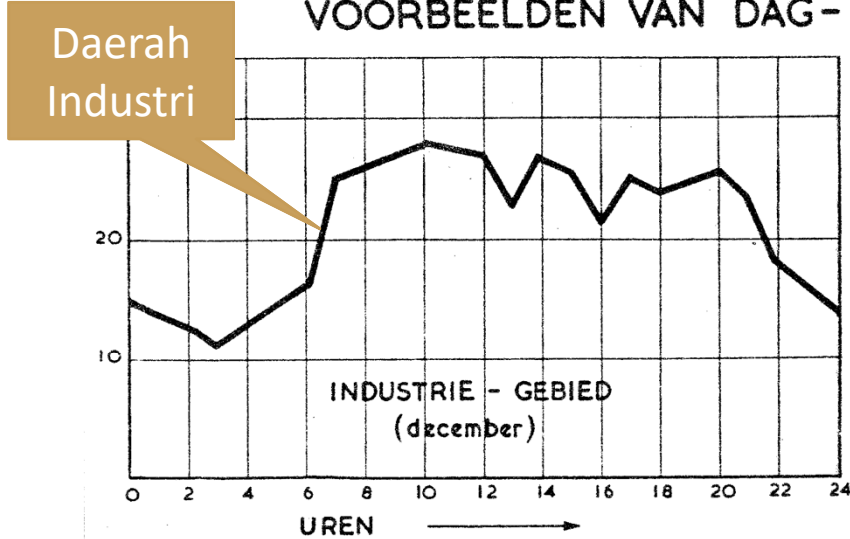
Hitungan volume Kolam Tando Harian (KTH) dalam BTA

# DEBIT SUNGAI & KEBUTUHAN LISTRIK

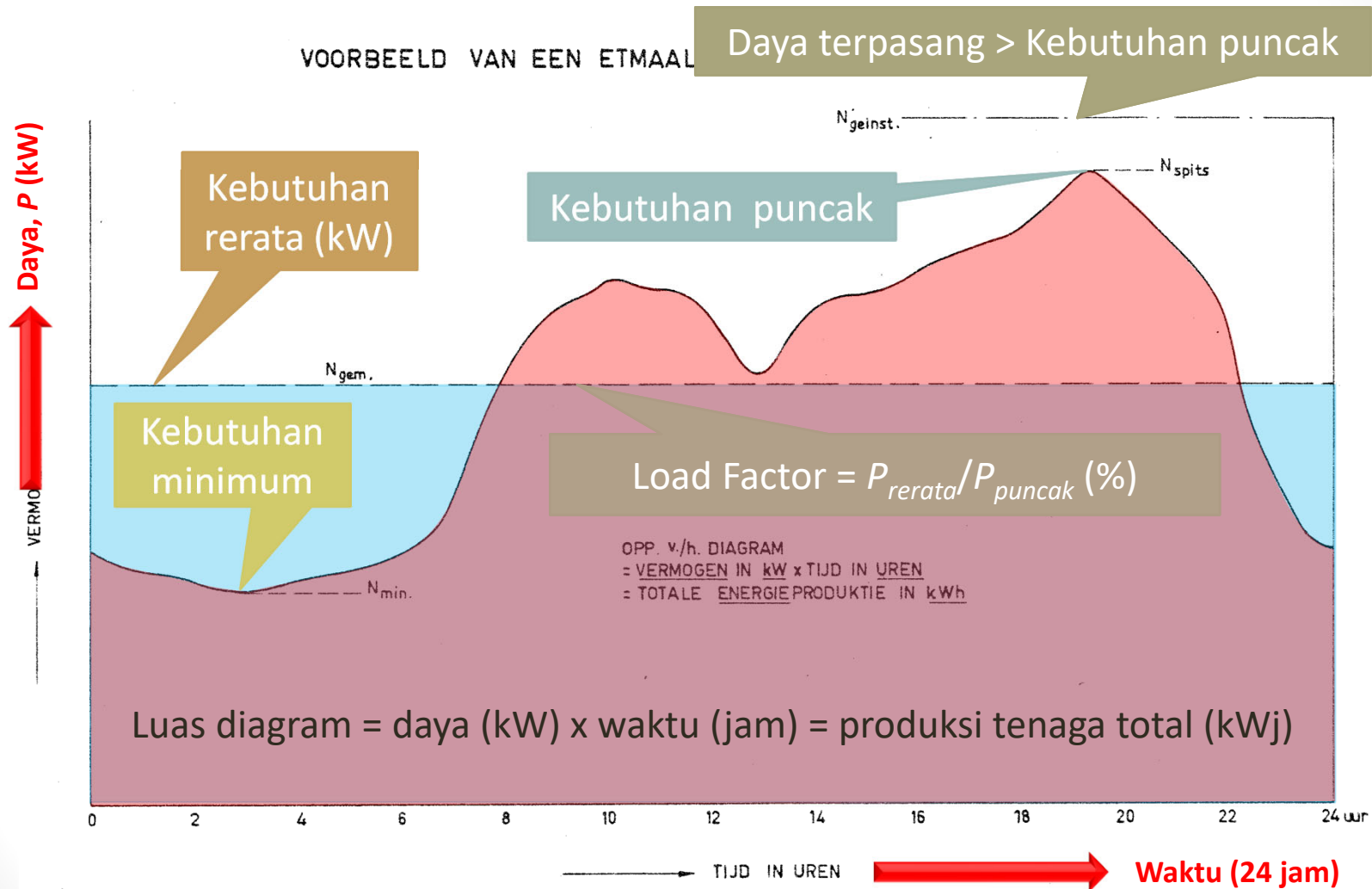


# TA 3: Diagram Beban Harian

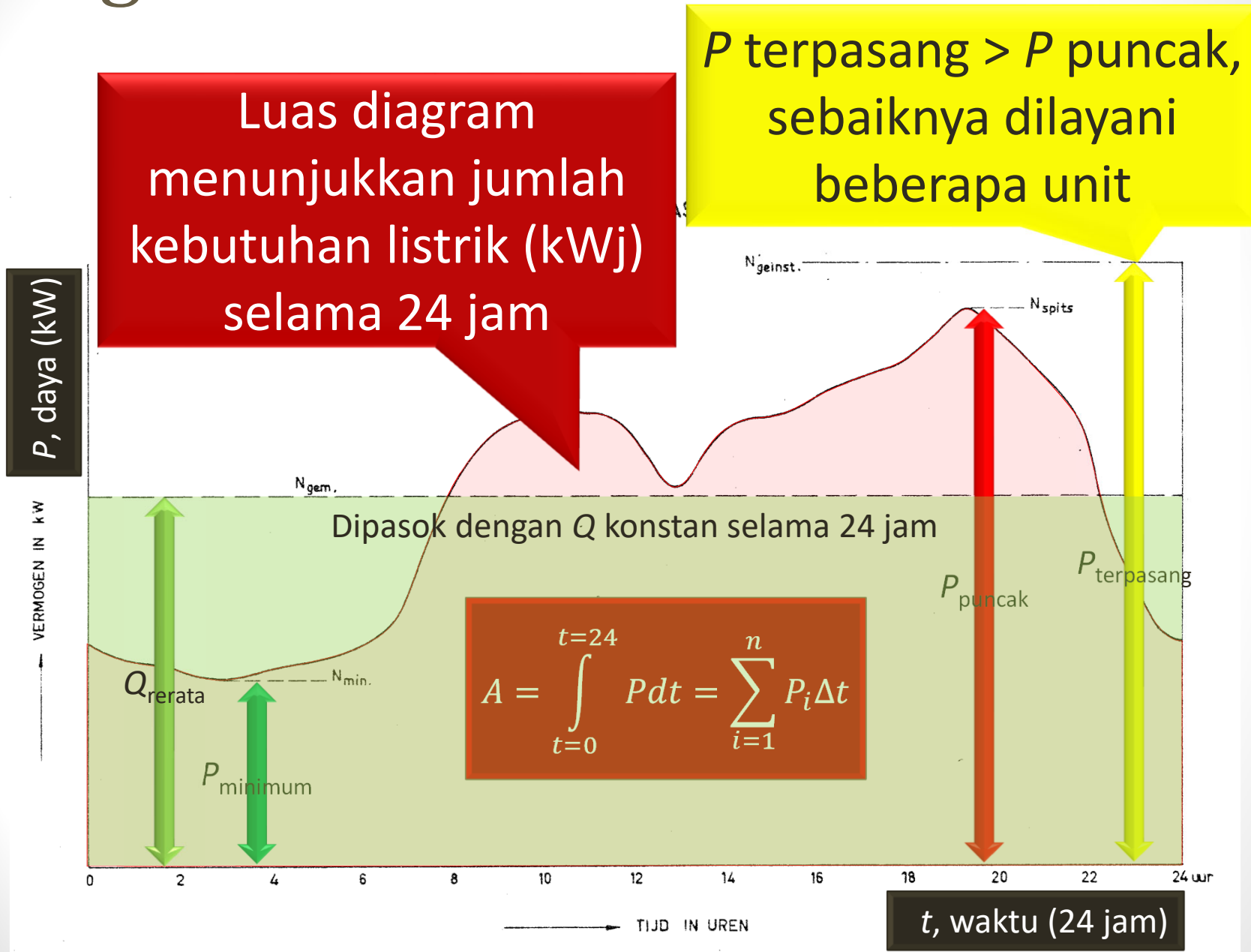
## VOORBEELDEN VAN DAG-BELASTINGDIAGRAMMEN



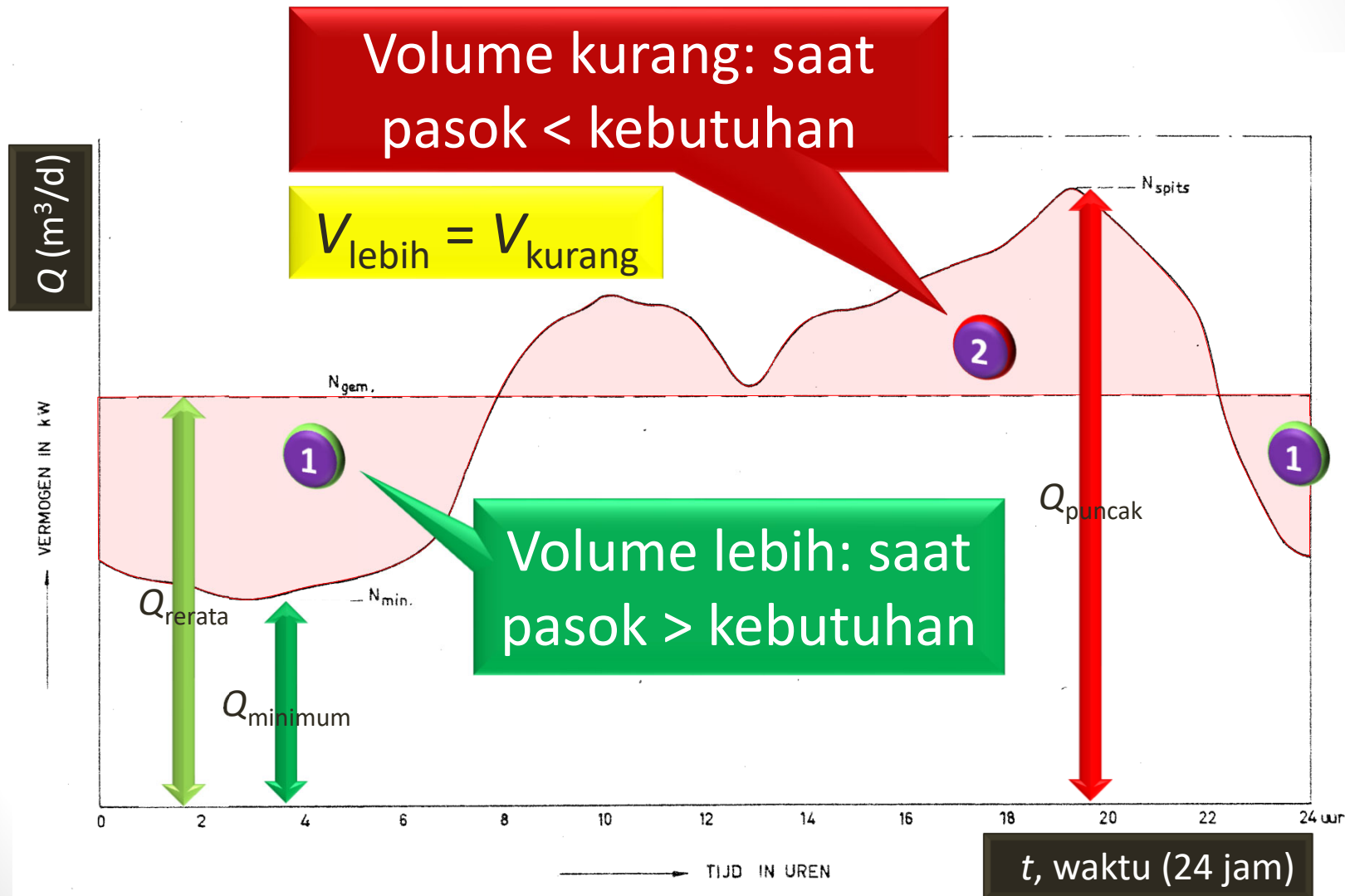
# TA 4: Diagram Beban Harian



# Diagram Beban Harian



# Diagram Beban Harian



# 1. Hitungan KTH (Volume Kurang & Lebih)

Prinsip hitungan KTH adalah menjumlahkan volume air yang harus disediakan saat  $Q_{\text{pasok}} < Q_{\text{butuh}}$ .

Pada gambar sebelumnya volume ini ditunjukkan oleh volume air pada Bagian **2**.

Jadi volume KTH dalam hal ini adalah  $V_{\text{kurang}}$  yaitu volume yang harus disediakan saat kurang.

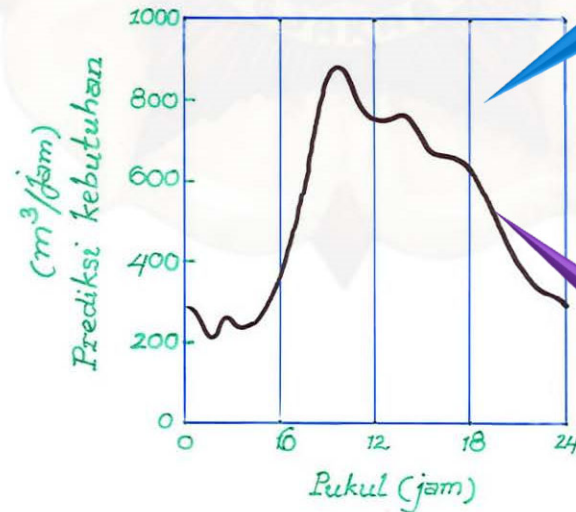
Pada saat  $Q_{\text{pasok}} = Q_{\text{rerata}}$ , maka  $V_{\text{kurang}} = V_{\text{lebih}}$ .

# 1. Hitungan KTH (Volume Kurang & Lebih)

## 3.3. Penentuan Volume Waduk.

- Dalam penentuan kapasitas tampungan sebuah waduk atau reservoir dibutuhkan analisis korelasi antara 'kapasitas - hasil.'
- Yg dimaksud hasil adalah sejumlah air yang dapat diharapkan dari suatu reservoir pada selang waktu tertentu  $\rightarrow Q_{keluar}$
- $Q_{keluar}$  teraman adalah debit air yg dapat diharapkan dari suatu reservoir pada periode kekeringan
- Resiko : - irigasi  
          - air minum } berbeda

### 1. Contoh untuk air minum



Berapa volume tandon air yang dibutuhkan?

Kebutuhan air baku kawasan perumahan

# 1. Hitungan KTH (Volume Kurang & Lebih)

- Dengan prediksi kebutuhan air seperti di atas, desain suatu pompa yg harus dioperasikan secara konstan sepanjang hari dan berapa volume reservoir (tandon) yang diperlukan?



- Jawaban :

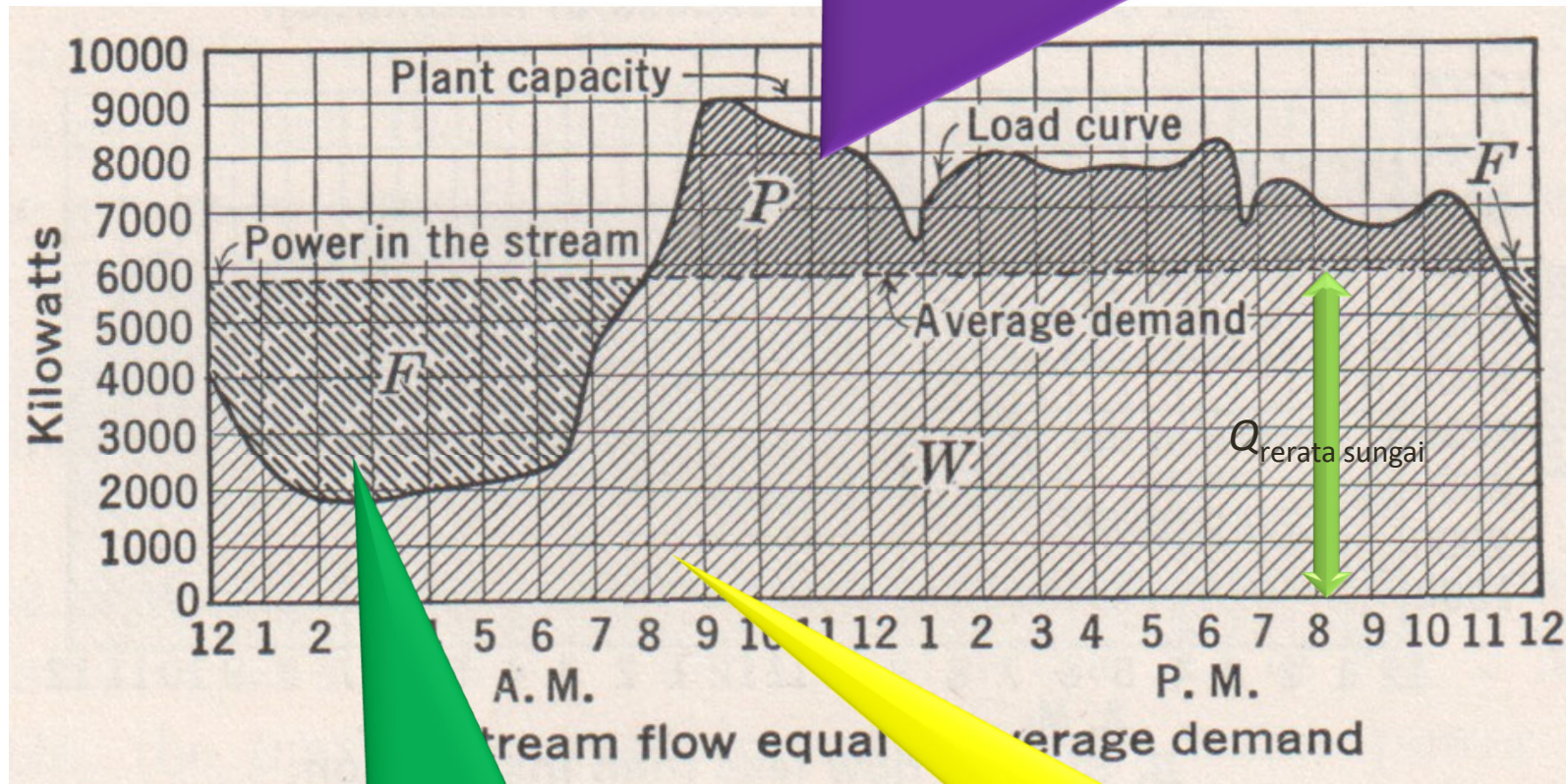
$$\text{Total kebutuhan selama 24 jam} = 12\,703 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Pompa : kapasitasnya} &= 12\,703 / 24 \\ &= 529.3 \text{ m}^3/\text{jam} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vol. tandon} &= \text{luas arsir} \\ &= 2426 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

# Kasus $Q_{\text{rerata sungai}} = Q_{\text{rerata butuh}}$

$P$ : kebutuhan listrik dicukupi oleh waduk



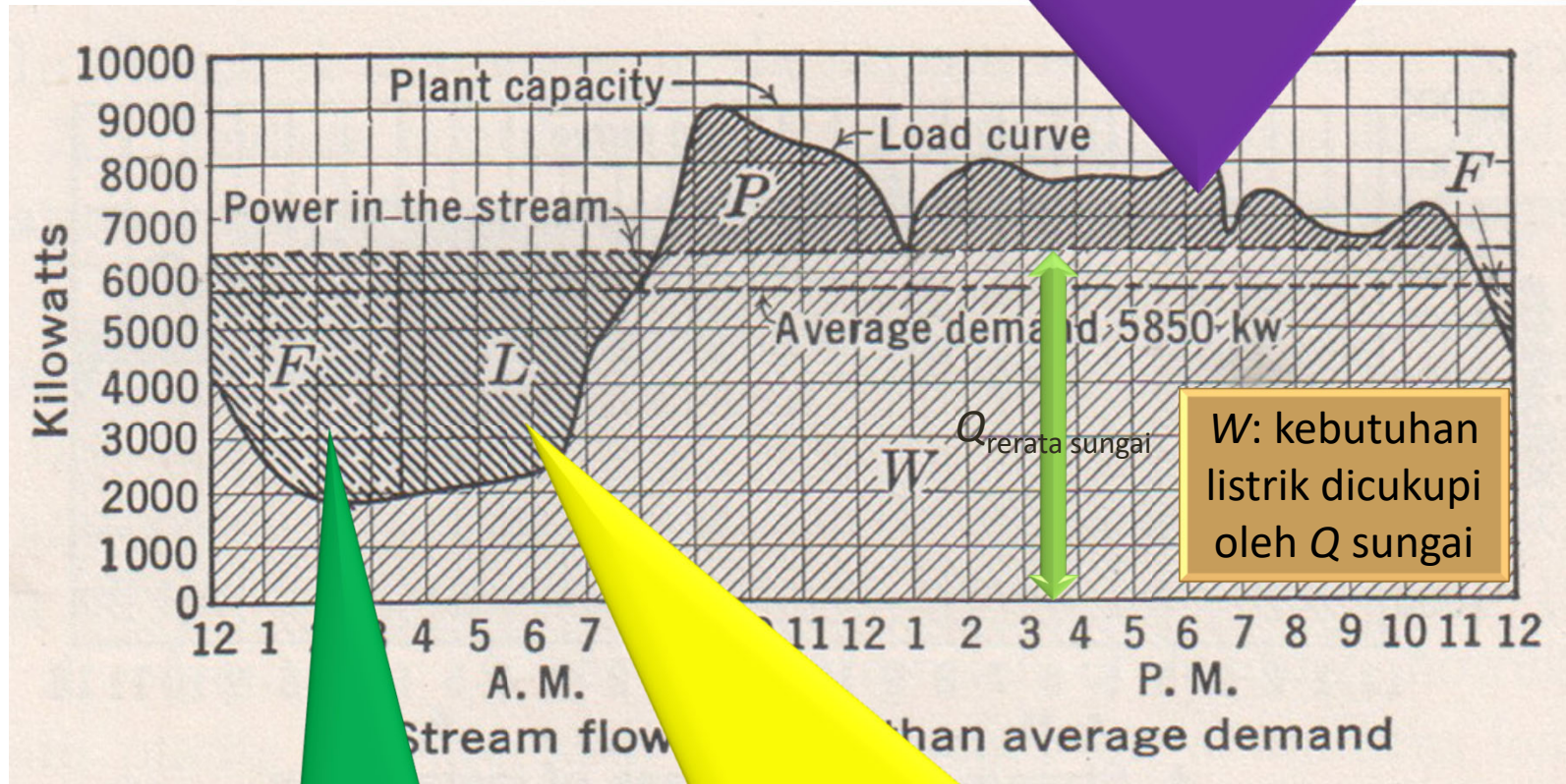
$F$ : waduk terisi oleh  $Q$  sungai

$W$ : kebutuhan listrik dicukupi oleh  $Q$  sungai



# Kasus $Q_{\text{rerata sungai}} > Q_{\text{rerata butuh}}$

$P$ : kebutuhan listrik dicukupi oleh waduk



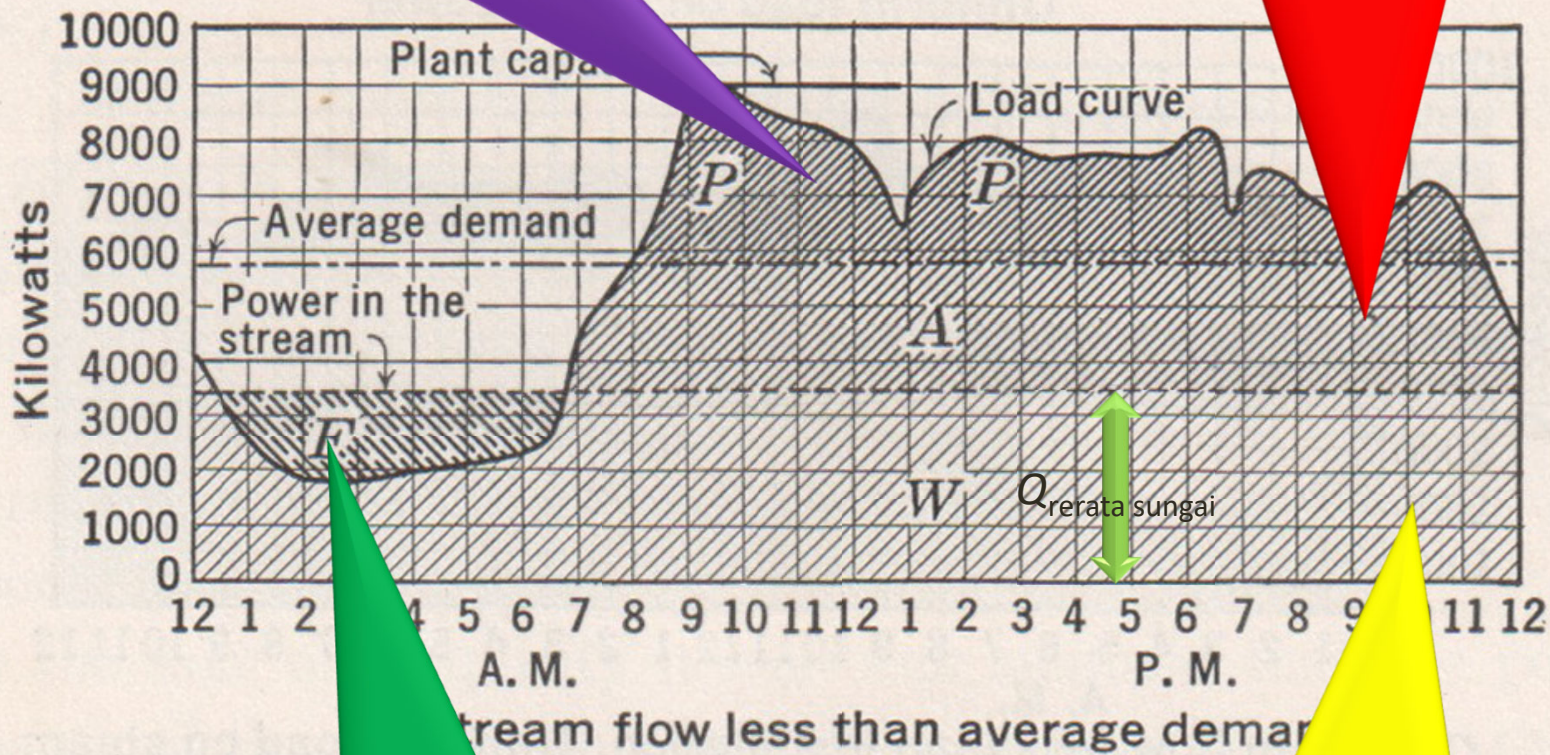
$F$ : wadah terisi oleh  $Q$  sungai

$L$ :  $Q$  sungai yang tidak dimanfaatkan karena wadah sudah penuh

# Kasus $Q_{\text{rerata sungai}} < Q_{\text{rerata butuh}}$

**P:** kebutuhan listrik dicukupi oleh waduk *F*

**A:** kebutuhan listrik dicukupi oleh TU



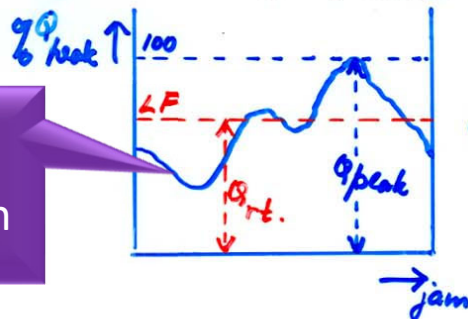
**F:** waduk terisi oleh  $Q$  sungai

**W:** kebutuhan listrik dicukupi oleh  $Q$  sungai

# 1. Hitungan Kolam Tando Harian

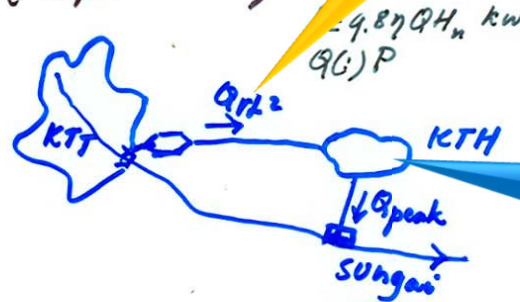
## DIAGRAM BEBAN SATUAN (HARIAN) ("Daily") "Unit Load Curve"

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



Kebutuhan listrik harian

Debit konstan masuk dari KTT



Volume KTH yang dibutuhkan?

## MENGHITUNG KAPASITAS KOLAM TANDO HARIAN (KTH)

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

- 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  $LF = \frac{960 \text{ jam}}{24 \text{ jam}} = 40 \%$

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

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

Hitungan kelistrikan DBH menjadi debit

# 1. Hitungan KTH (Volume Kurang & Lebih)

Debit konstan masuk dari KTT ke KTH

Apa yang terjadi jika  $Q_i$  lebih besar?

Kebutuhan listrik harian

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	Kekur- angan	kele- bihan	kekur- angan	Kapasitas	(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

Terdapat debit limpas karena KTH penuh!

Volume KTH yang dibutuhkan?

\* Pada jam ke-1 KTH penuh

- CATATAN:
- Kolom 1 dan 2 = unit load curve
  - $LF = \frac{960}{24} = 40\%$
  - Kolom 3 = Kolom 2 x  $Q_{peak}$
  - Kolom 4 =  $Q_{rt} - \text{kolom 3}$
  - Kolom 5 = Kolom 3 -  $Q_{rt}$
  - $\Sigma \text{ kolom 4} = \Sigma \text{ kolom 5} = \text{kapasitas KTH } (\text{m}^3/\text{det} \cdot \text{jam})$   
Secara blok diagram, lihat TA-6

# 1. Hitungan KTH (Volume Kurang & Lebih)

Apa yang terjadi jika  $Q_i$  lebih besar?

- Jika supply  $Q_{rt} = 130 \text{ m}^3/\text{det}$ ; maka
- kolom 6 dan 7 diisi seperti pada cara kolom 3 dan 4
  - Jika KTH dianggap penuh pada jam ke -1, maka pada kolom 8 dapat diisi kapasitas (air yang ada) di KTH tiap jamnya.
  - Air yang terbuang tiap jam dapat diisi di kolom 9.
- mis. dalam contoh ini air yang terbuang tiap hari =  
 $700 \text{ m}^3/\text{det} \cdot \text{jam} = 700 \times 3600 = \underline{2.520.000 \text{ m}^3}$ .

Terdapat debit limpas karena KTH penuh!

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

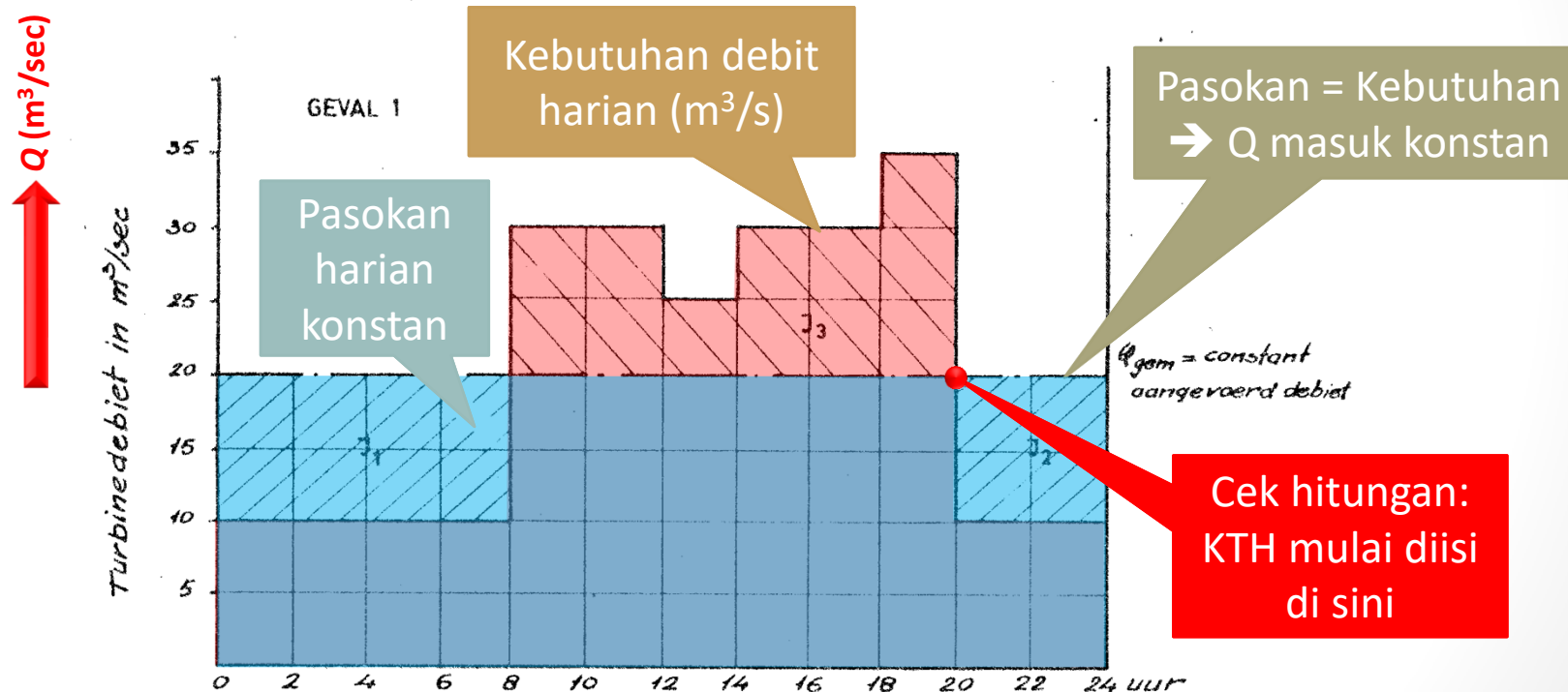
Volume KTH yang dibutuhkan, jika debit pasok =  $Q_{\text{rerata}}$ !

# TA 6: Kasus Hitungan Kolam Tando Harian (1/2)

TA 6

## BEPALING VAN DE INHOUD VAN EEN VERGAARKOM VOOR EEN AFTAPWERK.

(uit het in te verwerken turbine-debiten uitgedrukt dagbelasting -diagram)

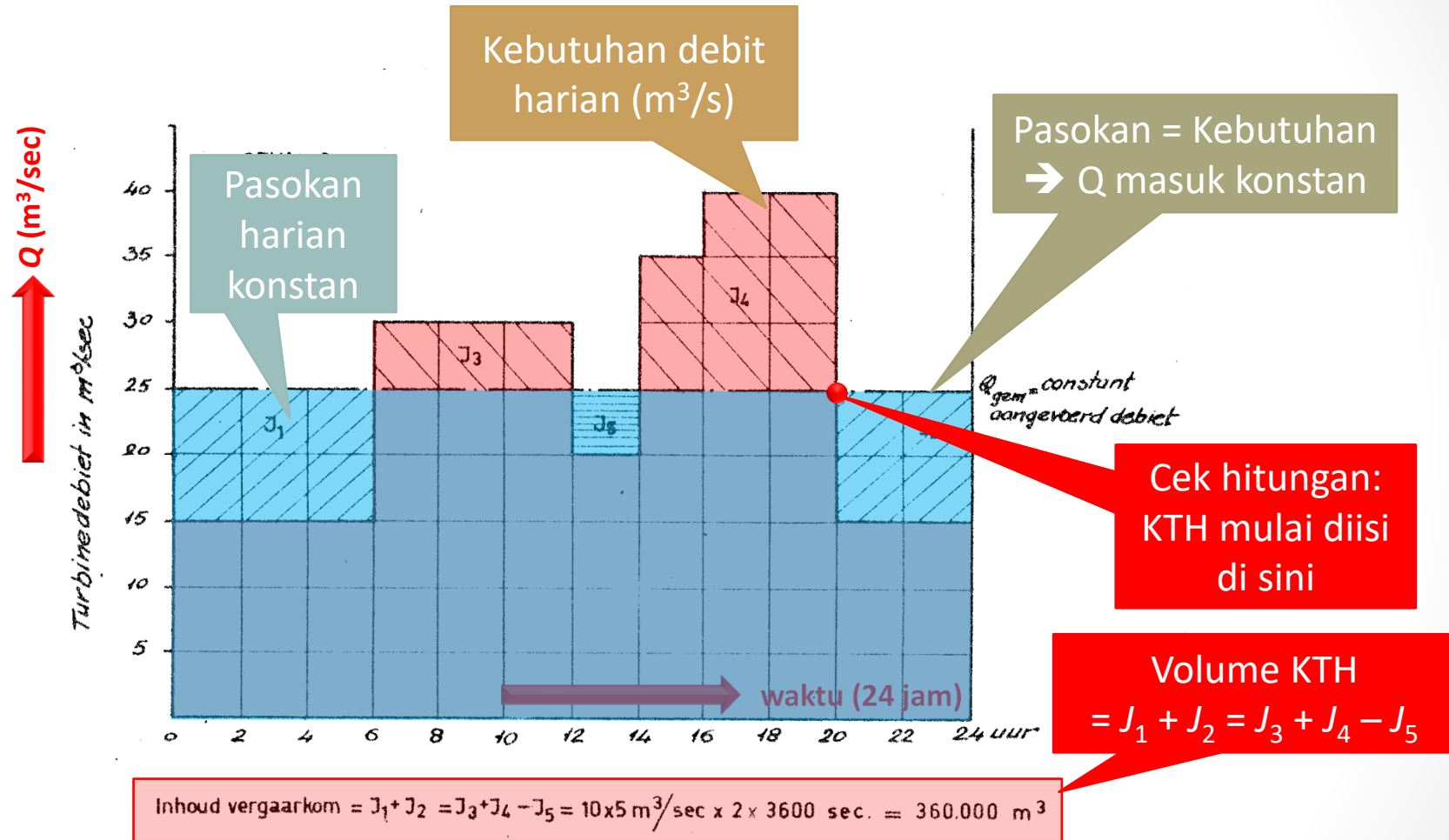


Inhoud vergaarkom =  $J_1 + J_2 = J_3 = 12 \times 5 \text{ m}^3/\text{sec} \times 2 \times 3600 \text{ sec.} = 432.000 \text{ m}^3$

waktu (24 jam)

Volume KTH =  $J_2 + J_2 = J_3$

# TA 6: Kasus Hitungan Kolam Tando Harian (2/2)



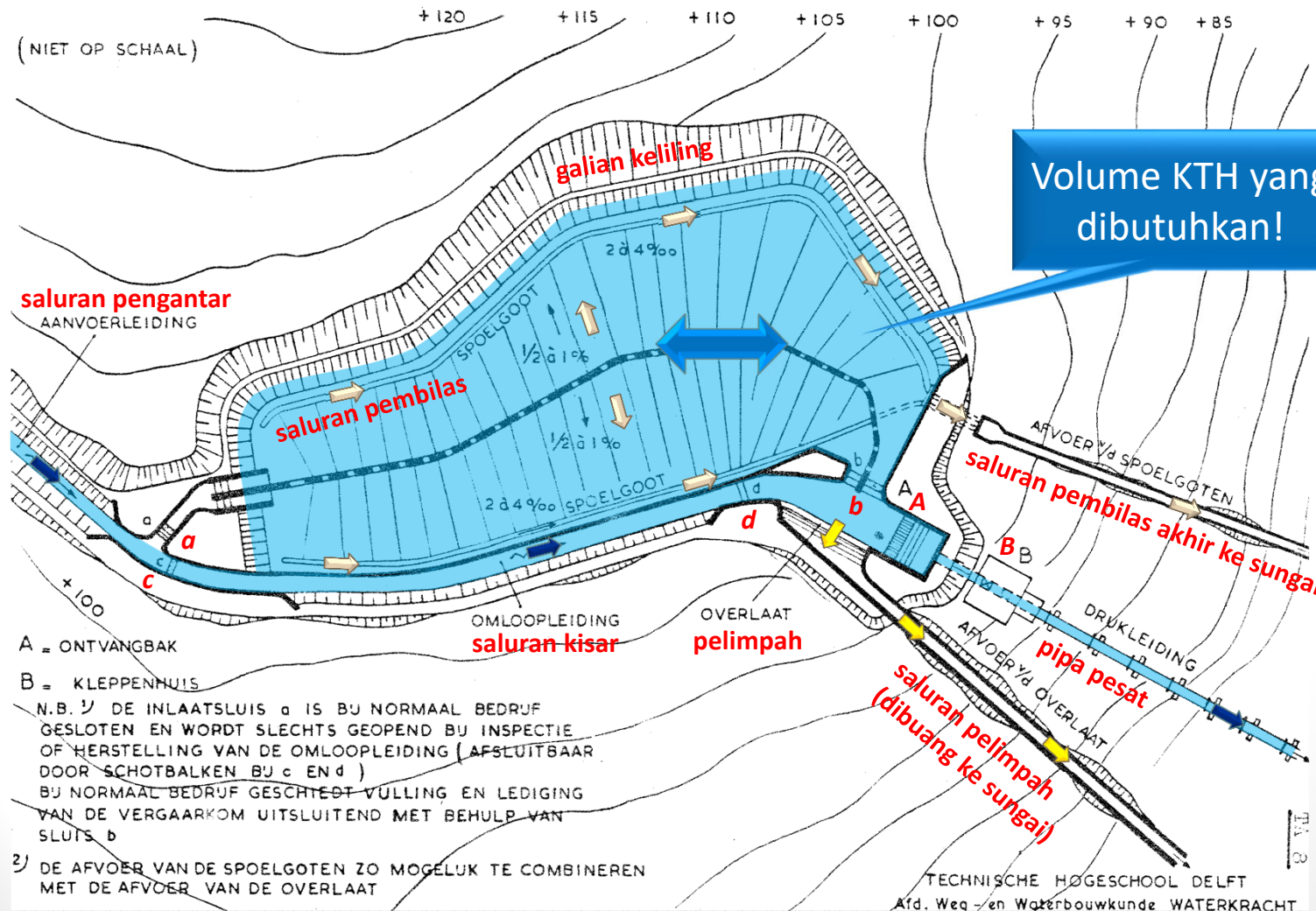
- Perhatikan dengan metode “Lebih-Kurang” diperoleh volume KTH = 11 “kotak,” sedangkan kalau disimulasikan diperoleh volume 10 “kotak.”

# T8: Skema Kolam Tando Harian

**A:** bangunan pengambilan, **B:** pintu katup

**a:** pintu *inlet* yang tertutup pada operasi normal, hanya dibuka untuk inspeksi atau reparasi saluran kisar (yang dapat ditutup dengan papan penahan pada lokasi **c** dan **d**).

**b:** pintu *outlet* ini digunakan untuk mengatur air masuk dan keluar KTH.





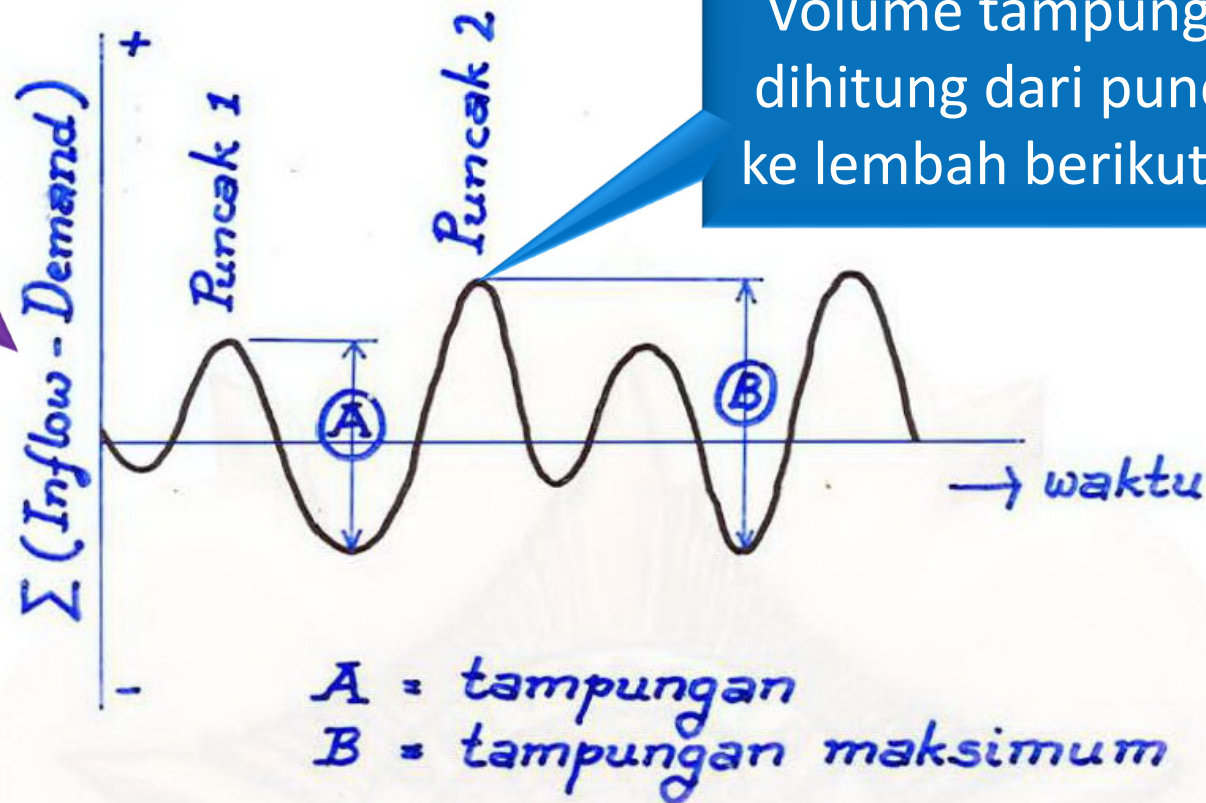
# Hitungan Kolam Tando Harian

- Cara hitungan KTH “Kurang-Lebih” seperti yang dijelaskan sebelumnya, pada kasus tertentu tidak menghasilkan volume yang benar. Ingat kasus volume KTH “Kurang-Lebih” menghasilkan 11 “kotak” yang tidak akurat, karena volume 10 “kotak” sudah mencukupi.
- Untuk menutupi ketidakakuratan ini dikenalkan metoda kedua yaitu “Algoritma Urutan Puncak” sebagai berikut
  1. Akumulasikan antara (*inflow-demand*) untuk jangka waktu perencanaan.
  2. Hitung selisih antara puncak dengan lembah berikutnya.
  3. Volume waduk yang digunakan adalah nilai maksimum pada Butir 2 di atas.

## 2. Algoritma Urutan Puncak

### 2. Algoritma Urutan Puncak

Kurva kumulatif  
inflow-kebutuhan

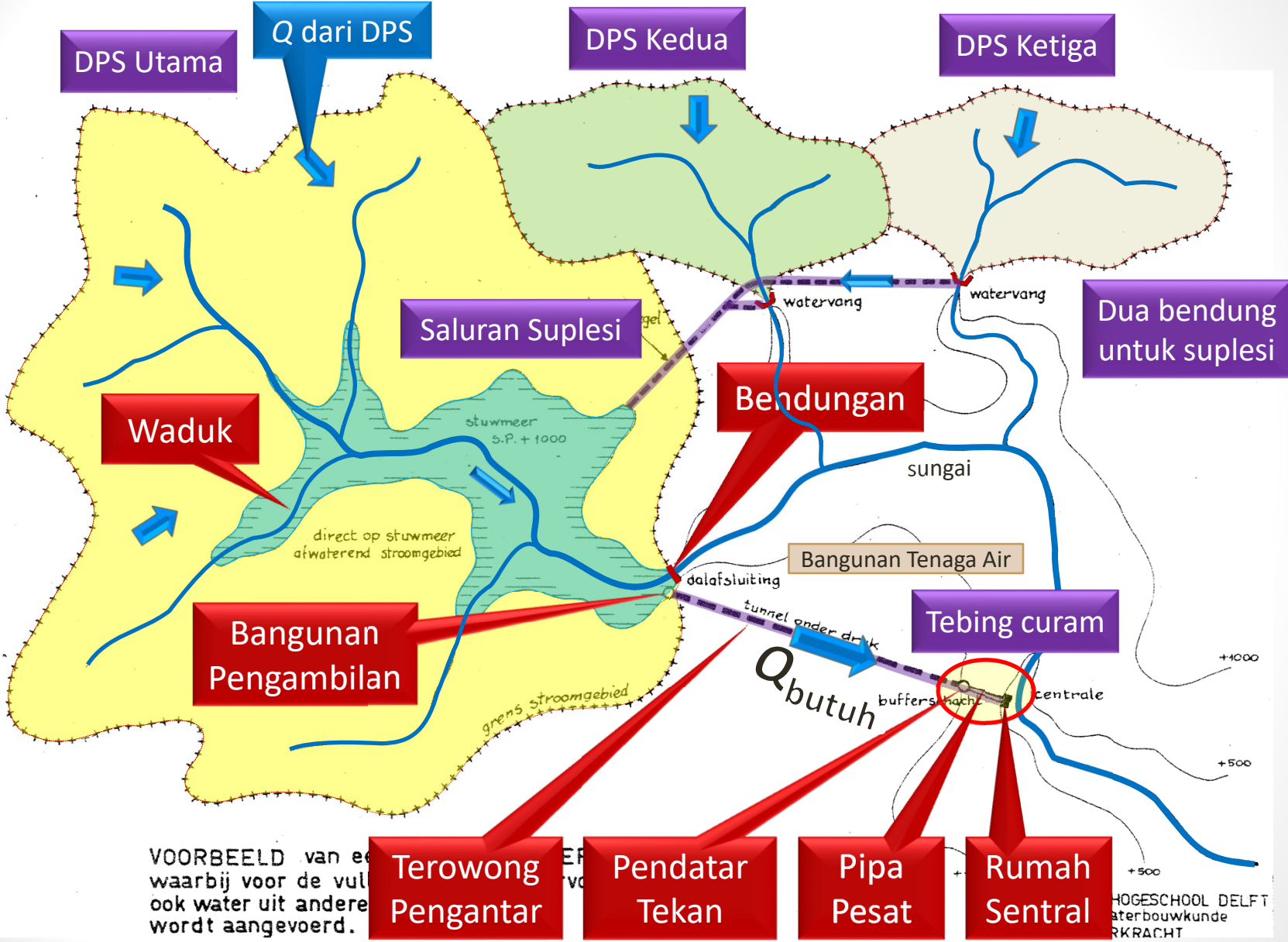


Volume tampungan  
dihitung dari puncak  
ke lembah berikutnya

Hitungan volume Kolam Tando Tahunan (KTT) dalam BTA

# DEBIT SUNGAI & KEBUTUHAN LISTRIK

# BTA dengan Waduk & Suplesi – TA 18



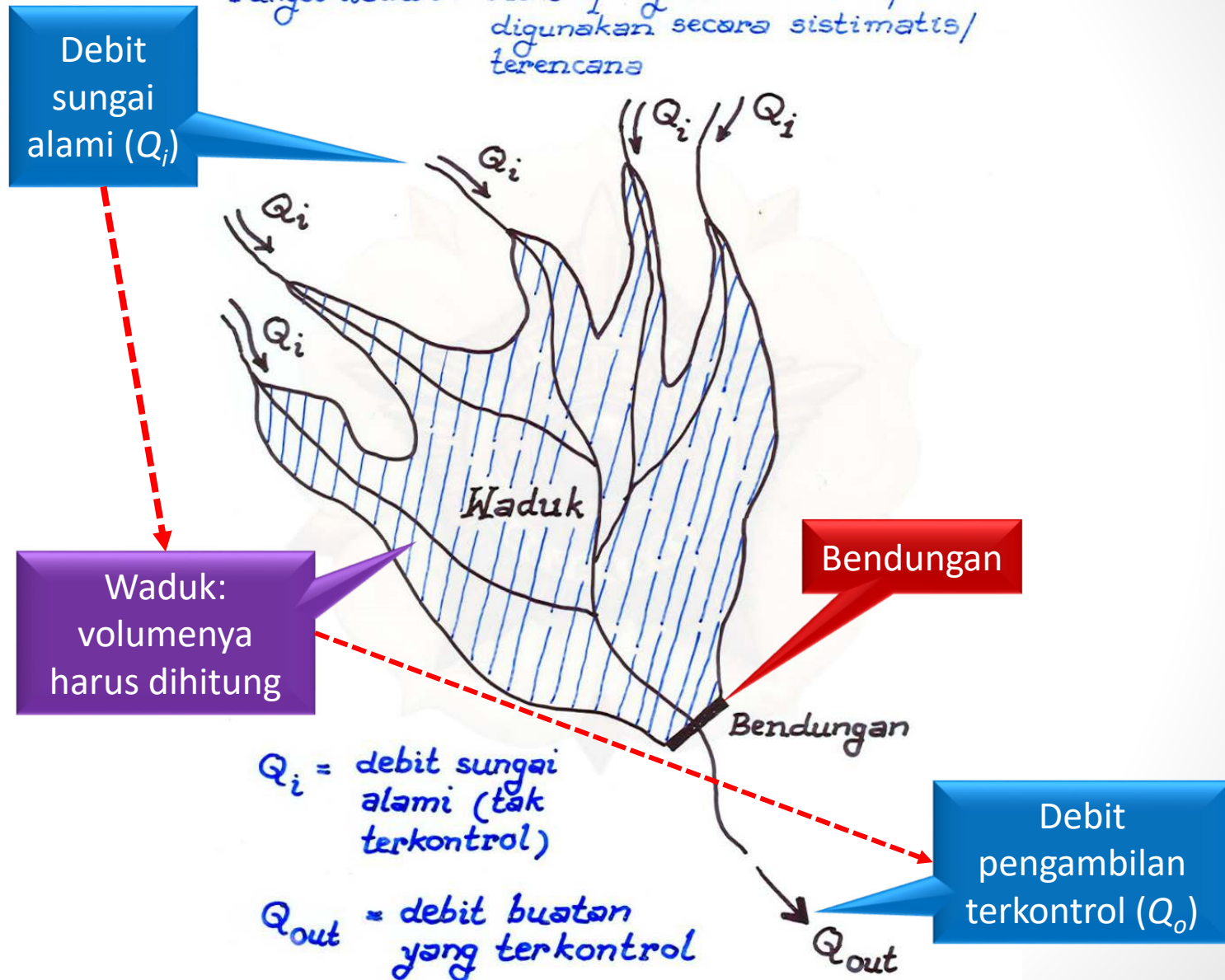
VOORBEELD van een systeem waarbij voor de vull ook water uit andere wordt aangevoerd.

- Terowong Pengantar
- Pendatar Tekan
- Pipa Pesat
- Rumah Sentral

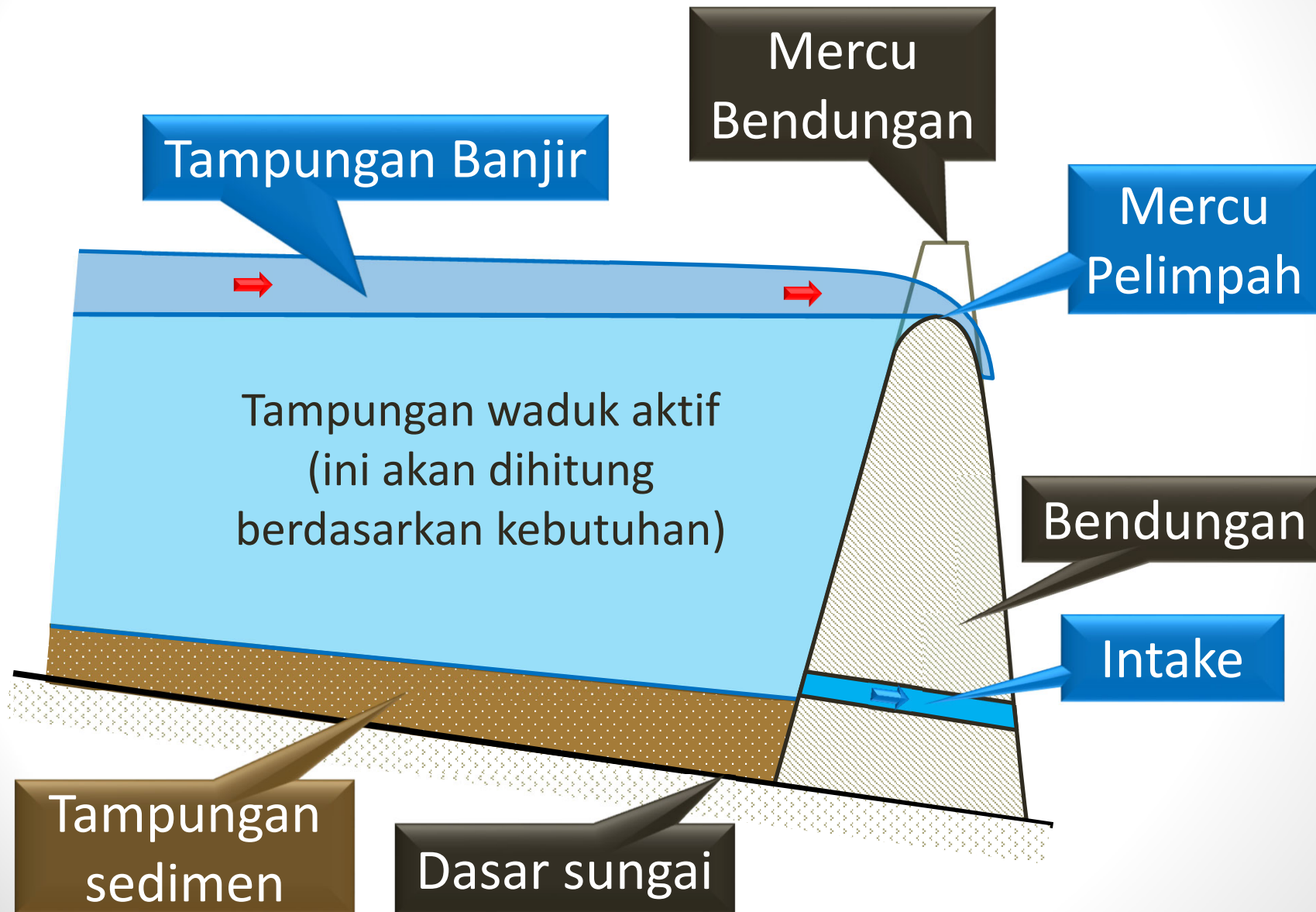
# Waduk (Kolam Tando Tahunan)

## III. WADUK

Fungsi waduk : menampung air untuk dapat digunakan secara sistimatis/terencana



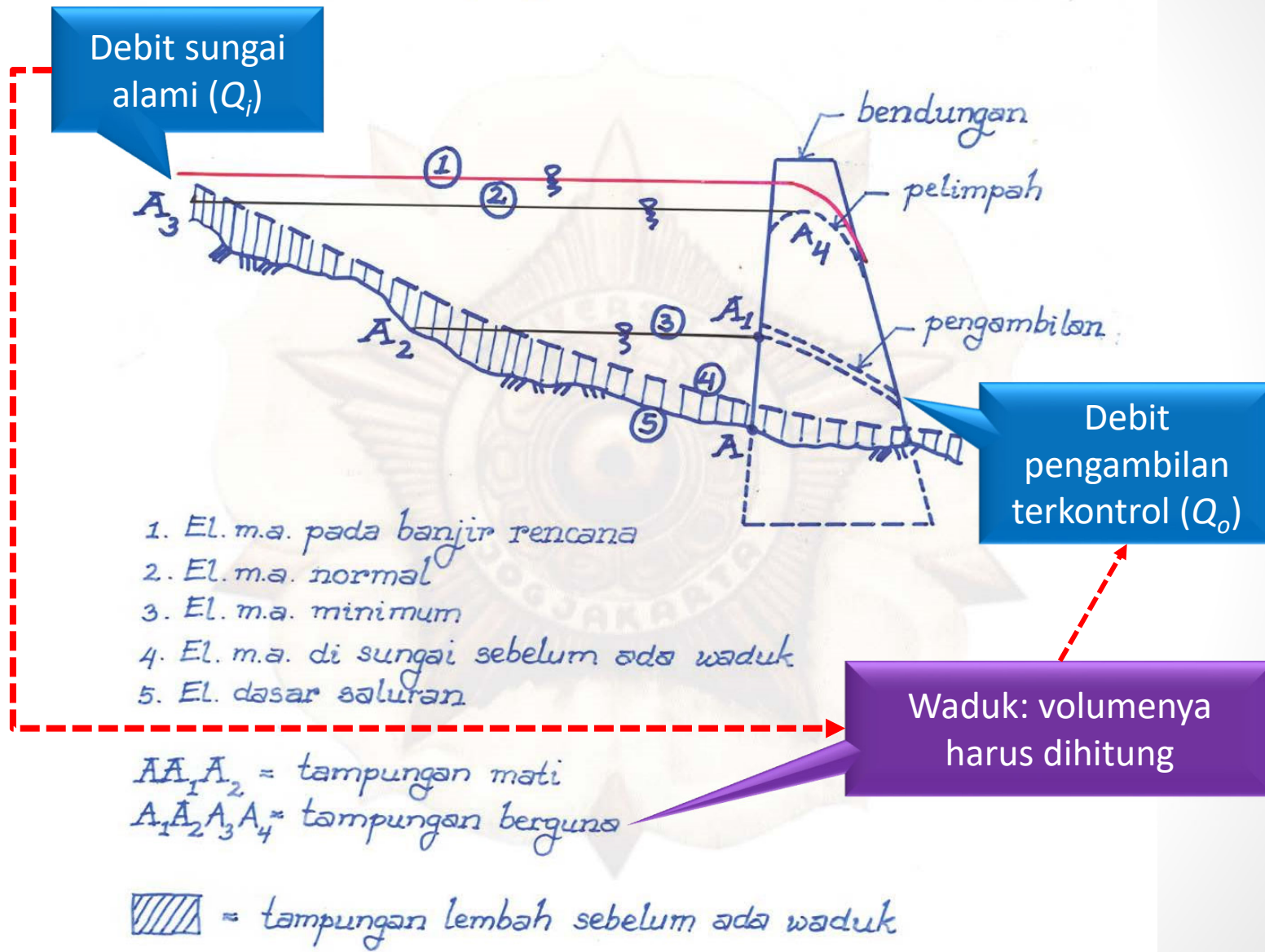
# Kolam Tando Tahunan (Waduk)



# Waduk (Kolam Tando Tahunan)

## Zona Tampungannya sebuah Waduk

4



# Debit Sungai & Kebutuhan Listrik

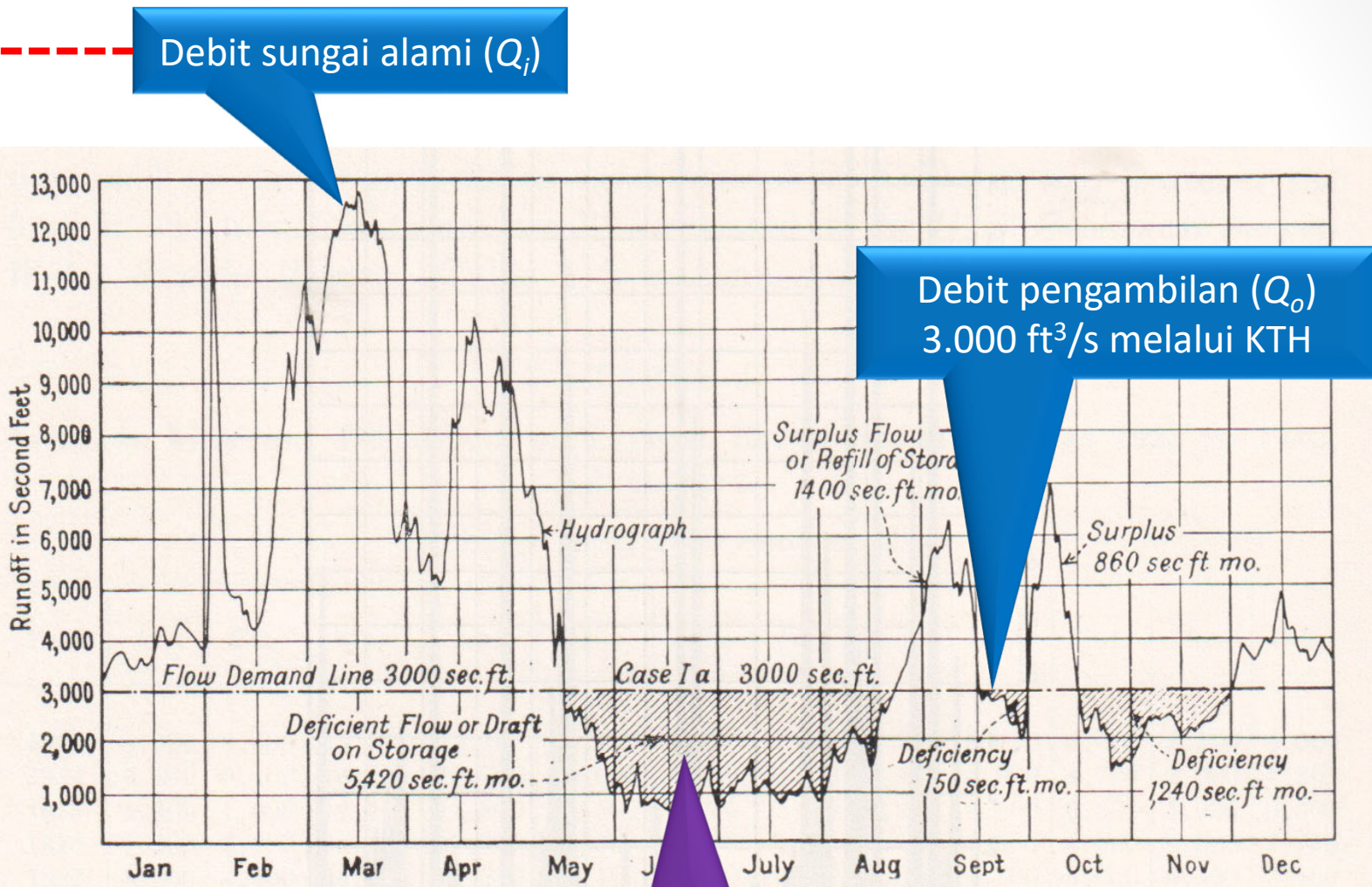
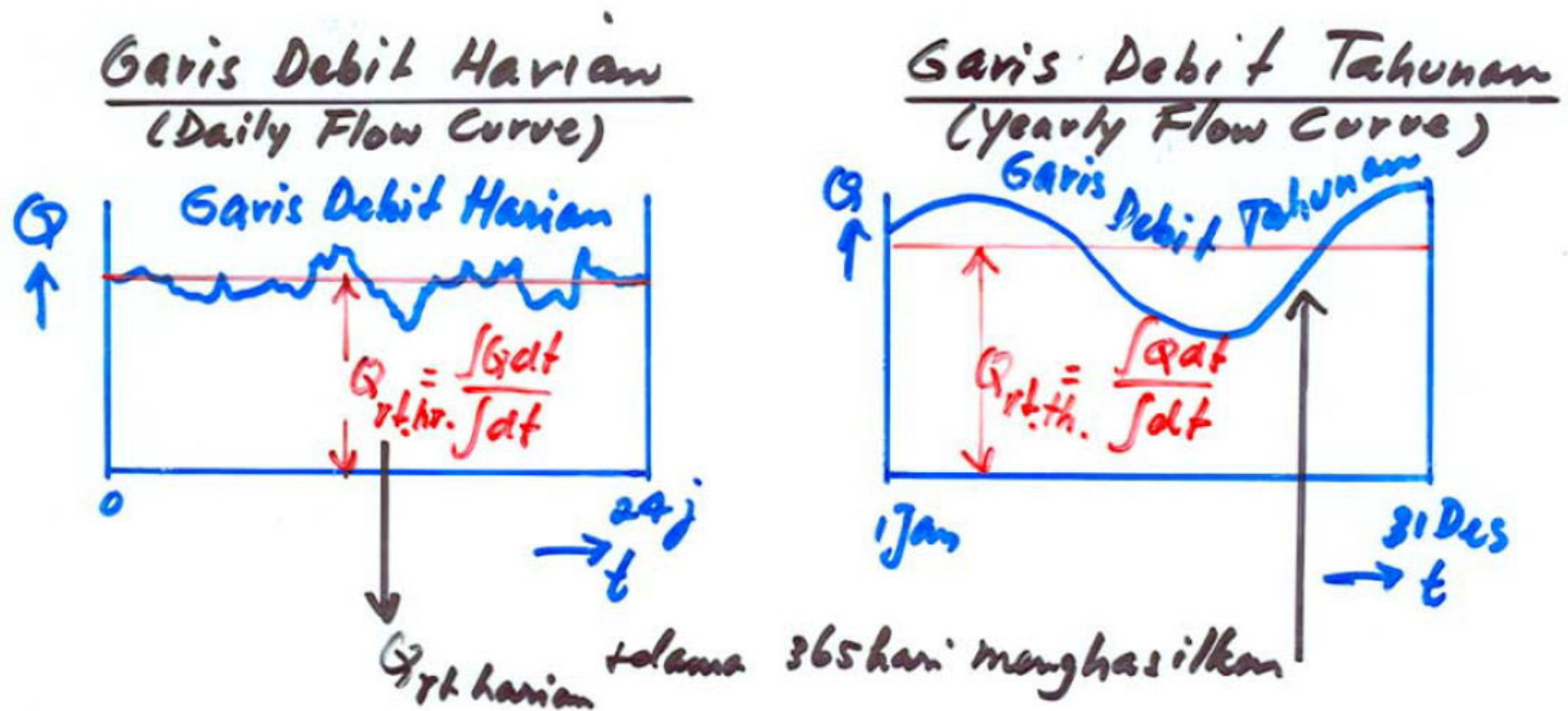


FIG. 6. Hydrograph of typical showing storage requirements.

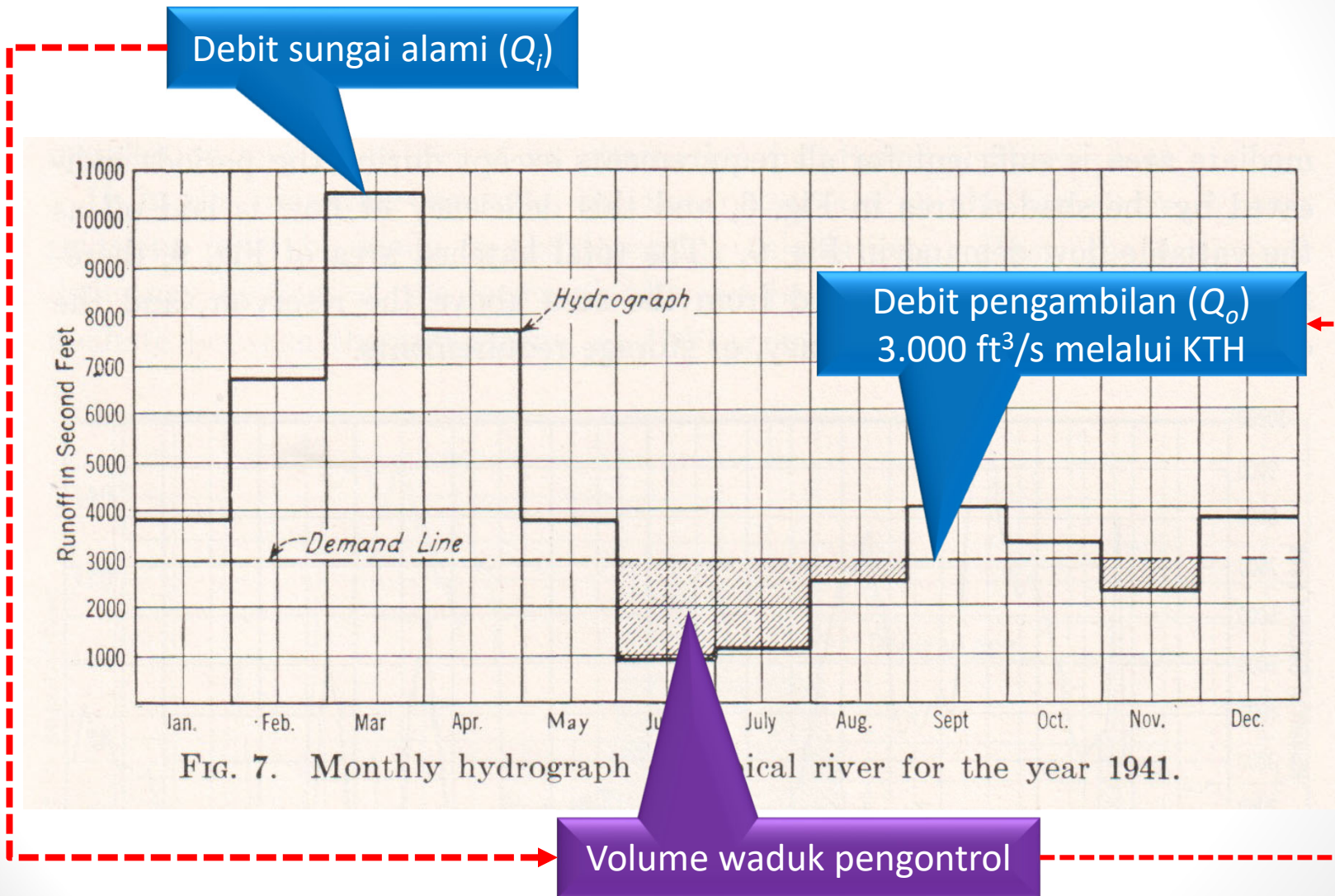


# Debit Sungai dan Perataannya

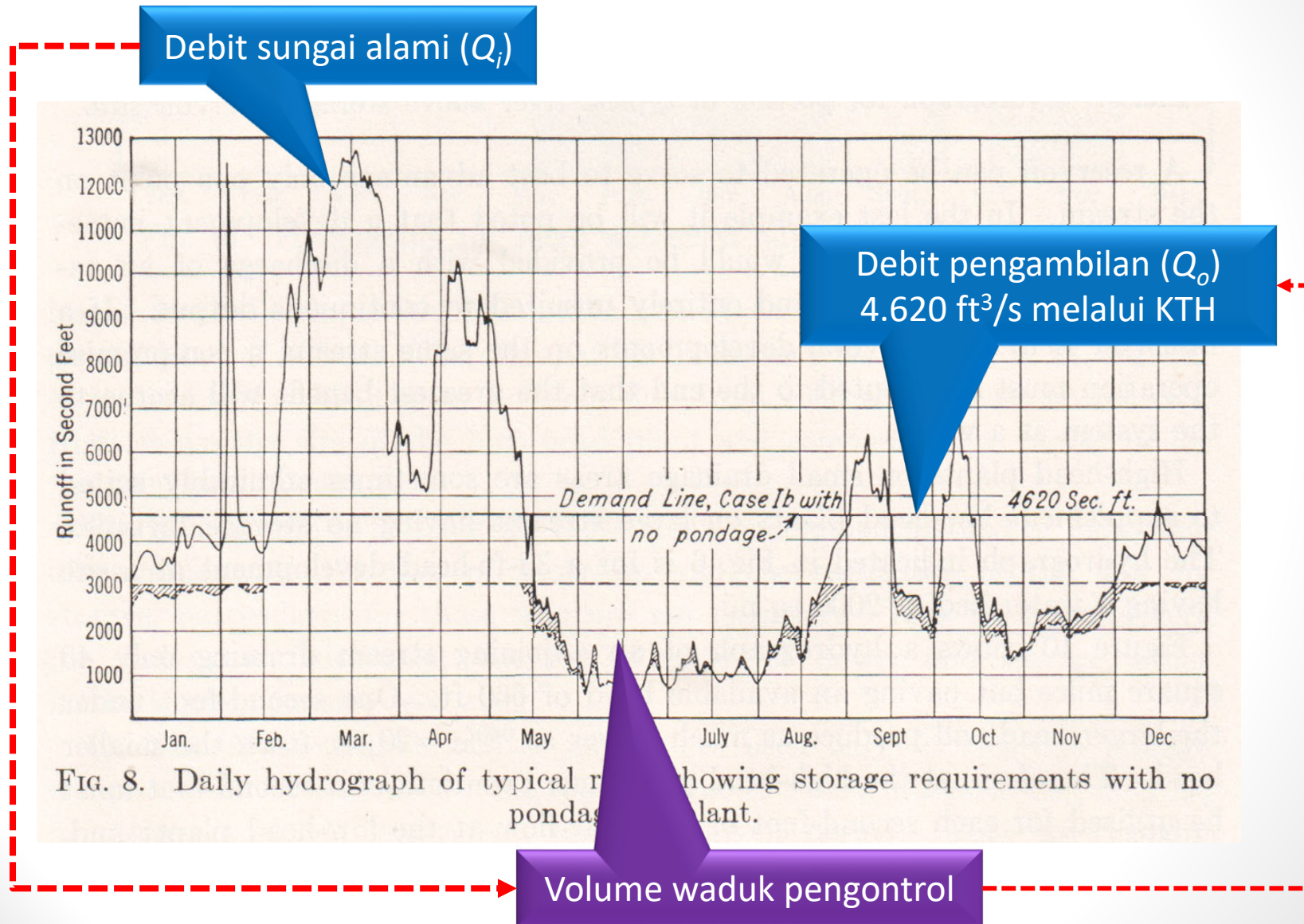


- Garis debit harian dapat di-rerata-kan menjadi debit mingguan, bulanan, tahunan, tergantung kebutuhan.
- Pada tayangan berikut disajikan garis debit bulanan hasil dari garis debit harian pada tayangan sebelumnya.

# Debit Bulanan Sungai & Kebutuhan Listrik



# Debit Sungai & Kebutuhan Listrik



# Debit Sungai & Kebutuhan Listrik

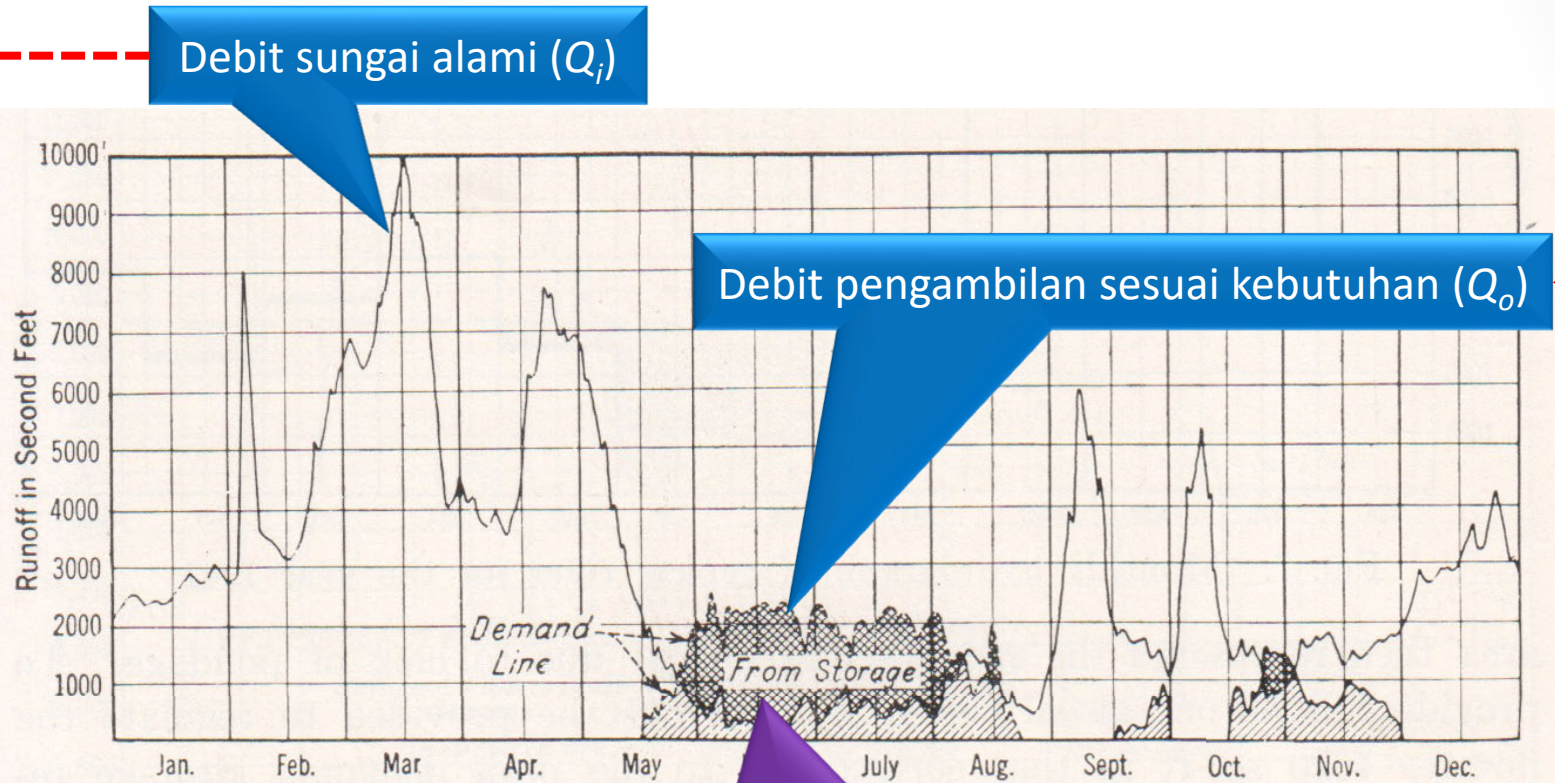
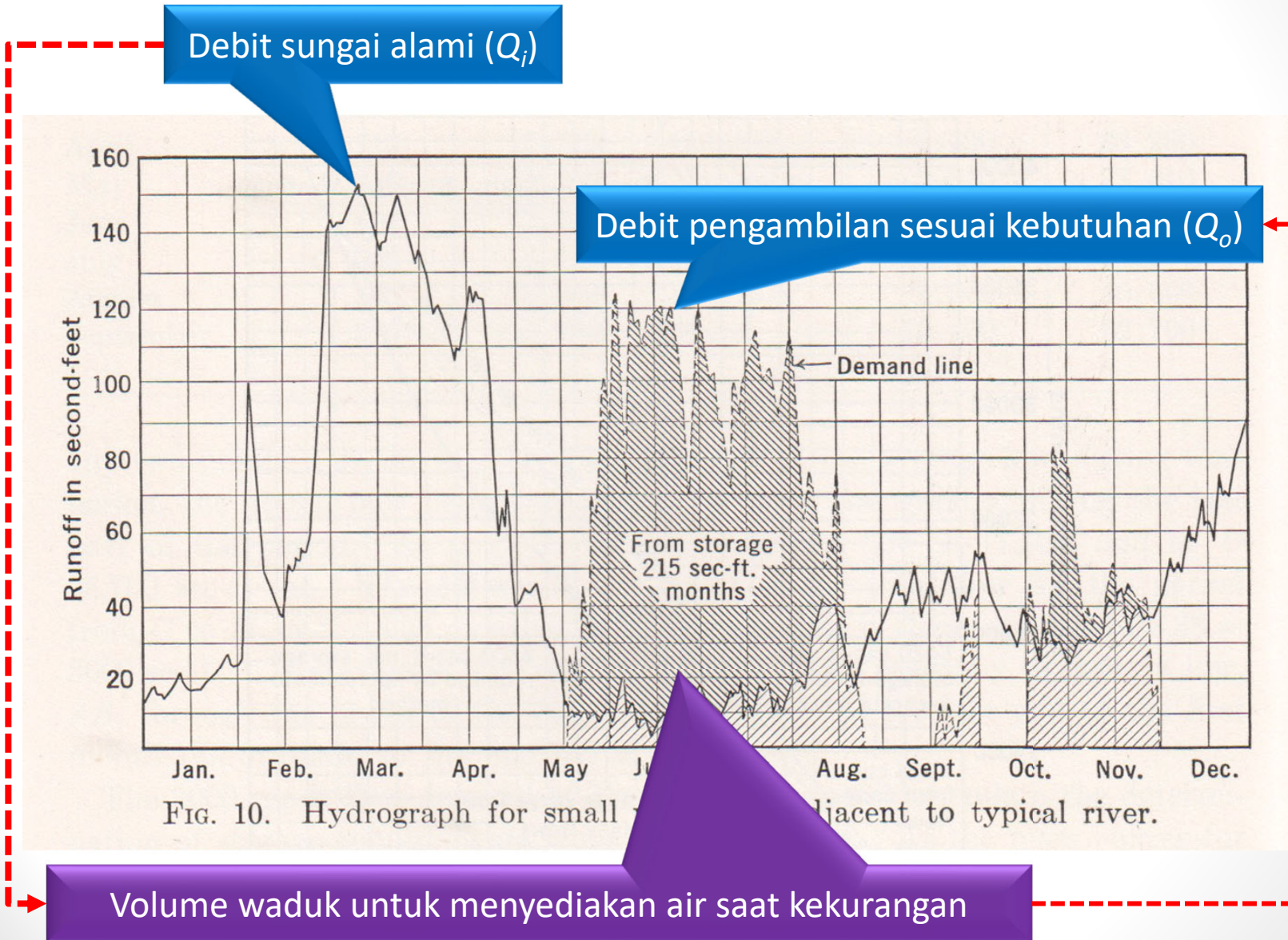


FIG. 9. Hydrograph for portion of the river above storage reservoir site.

Volume waduk untuk menyediakan air saat kekurangan

# Debit Sungai & Kebutuhan Listrik



# 3. Diagram Rippl (Kurva Massa)

## 3. Kurva Massa (Rippl diagram)

DE } volume tampungan  
CF }

▨ = melimpas

kebutuhan tak terpenuhi jika volume tampungan sebesar DE

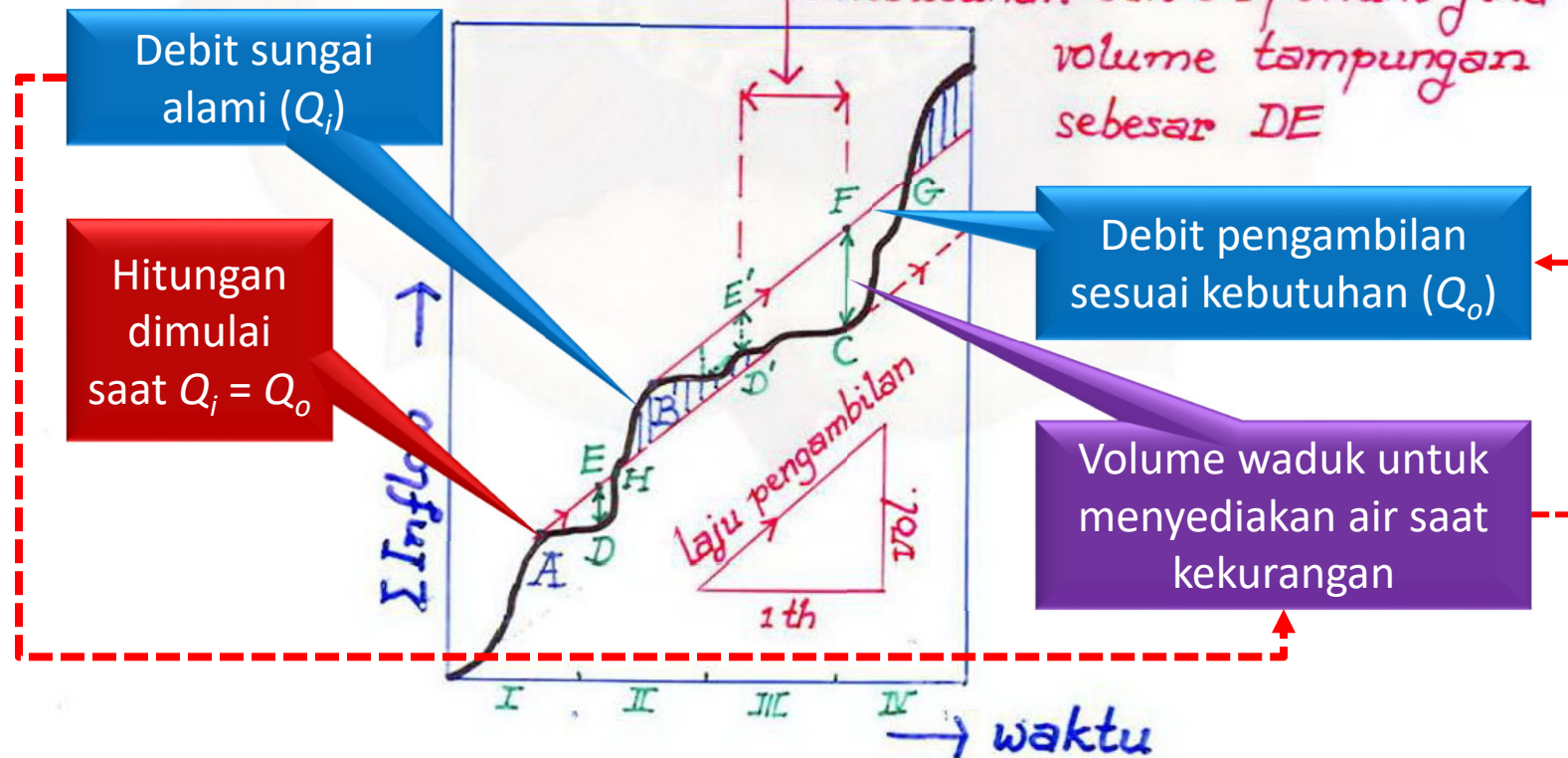


Diagram Rippl ini memisahkan antara kurva kumulatif: (1) *inflow* (pasok), dan (2) *outflow* (kebutuhan) → volume waduk adalah selisih maksimum kedua kurva ini

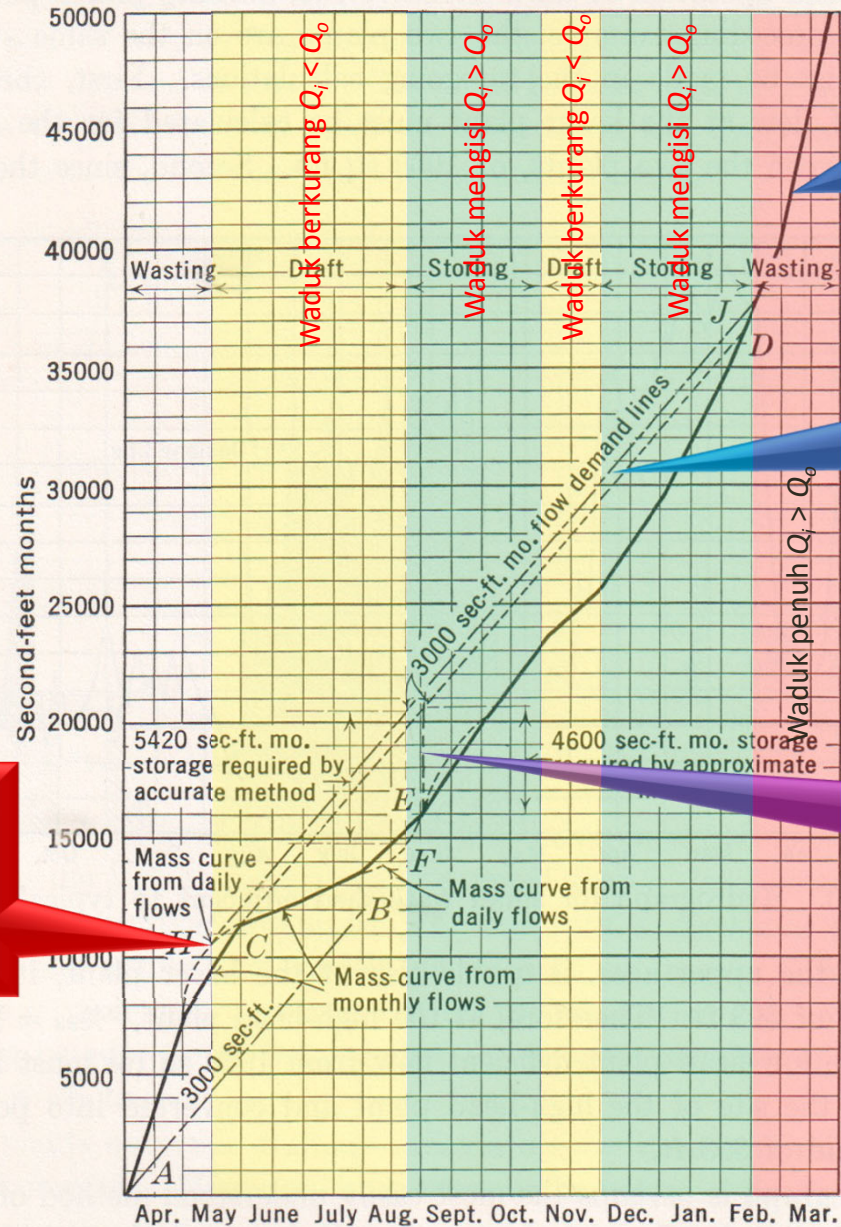
# Tabel 5. Debit Bulanan Sungai

Bulan	Q (ft <sup>3</sup> /s)	Kumulatif Q (ft <sup>3</sup> /s)	Bulan	Q (ft <sup>3</sup> /s)	Kumulatif Q (ft <sup>3</sup> /s)
April	7.710	7.710	Oktober	3.300	23.280
Mei	3.850	11.560	November	2.330	25.610
Juni	860	12.420	Desember	3.880	29.490
Juli	1.040	13.460	Januari	5.200	34.690
Agustus	2.500	15.960	Februari	6.000	40.690
September	4.020	19.980	Maret	12.100	52.790

Tabel debit sungai dan kumulatifnya di atas digunakan sebagai contoh untuk menghitung volume waduk yang dibutuhkan dapat memenuhi kebutuhan.

### 3. Diagram Rippl (Kurva Massa)

Hitungan dimulai saat  $Q_i = Q_o$



Debit sungai alami ( $Q_i$ )

Debit pengambilan ( $Q_o$ ) melalui KTH

Volume waduk untuk menyediakan air saat kekurangan

FIG. 11. Mass curve of typical river for the year 1941-1942, the lowest of record, plotted from Table 5.



# Hitungan Volume Waduk

Ketiga metoda hitungan volume waduk, dapat digunakan untuk menghitung KTT maupun KTH:

1. Metoda Kurang dan Lebih: menghitung volume penjumlahan maksimum saat air kurang ( $Q_{\text{sungai}} < Q_{\text{butuh}}$ ) pada perioda berturutan yang menerus.
2. Metoda Urutan Puncak (Sequent Peak Algorithm): menghitung selisih maksimum puncak dan lembah pada kurva kumulatif baik untuk  $Q_{\text{sungai}} - Q_{\text{butuh}}$ .
3. Metoda Diagram Rippl (Kurva Massa): menghitung selisih maksimum kurva kumulatif baik untuk  $Q_{\text{sungai}}$  dan  $Q_{\text{butuh}}$ .

## Catatan:

- a) Karena  $Q_{\text{sungai}}$  menggunakan data historis, sehingga diasumsikan kondisi di masa depan “tetap” seperti data historis. Jika dikehendaki  $Q_{\text{sungai}}$  dimasa depan dapat disimulasikan sesuai prediksi ke masa yang akan datang.
- b) Ketelitian hitungan tergantung data debit yang digunakan: harian, bulanan, atau tahunan.

# Contoh Hitungan KTH

## Jawaban Kolam Tando Harian

Diketahui:

$H_n$ =	4,00 m
$P_{puncak}$ =	150 DK
Efisiensi, $\eta$ =	0,98
$V_{pipapesat}$ =	1,00 m/detik
$\Delta t$ =	1,00 jam

Dihitung:

LF =	55,67 %
$Q_{puncak}$ =	2,87 m <sup>3</sup> /detik
$Q_{rerata}$ =	1,60 m <sup>3</sup> /detik
Vol. KTH =	2,59 • 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
Vol. KTT =	2,79 • 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>

Hasil  
hitungan  
KTH

### Hitungan Kolam Tando Harian

Data			Urutan Puncak		Rippl				Lebih-Kurang	
Pukul (jam)	% P <sub>puncak</sub>	Q <sub>butuh</sub> (m <sup>3</sup> /detik)	Q <sub>rerata</sub> -Q <sub>butuh</sub> (m <sup>3</sup> /detik)	$\Sigma(V_{rerata}-V_{butuh})$ (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	$\Sigma V_{butuh}$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	Lokasi titik singgung	$\Sigma V_{rerata}$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	Vol KTH (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	Vol <sub>lebih</sub> (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	Vol <sub>kurang</sub> (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
[1]	[2]	[3]=[2]*P <sub>puncak</sub>	[4]=Q <sub>rerata</sub> -[3]	[5]= $\Sigma$ [4]*3600	[6]= $\Sigma$ [3]		[7]= $\Sigma$ Q <sub>rerata</sub>	[8]=[6]-[7]	[9]=Pos[4]	[9]=Neg[4]
1	37	1,06	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	-
2	32	0,92	0,68	1,93	0,38	0,00	0,38	0,00	0,24	-
3	27	0,78	0,82	4,37	0,71	0,00	0,71	0,00	0,30	-
4	24	0,69	0,91	7,34	0,99	0,00	0,99	0,00	0,33	-
5	27	0,78	0,82	10,61	1,24	0,00	1,24	0,00	0,30	-
6	37	1,06	0,54	13,57	1,52	0,00	1,52	0,00	0,19	-
7	66	1,89	-0,30	15,50	1,90	0,00	1,90	0,00	-	-0,11
8	84	2,41	-0,81	14,43	2,58	1,00	2,48	0,11	-	-0,29
9	90	2,58	-0,99	11,51	3,45	1,00	3,05	0,40	-	-0,35
10	83	2,38	-0,78	7,96	4,38	1,00	3,63	0,75	-	-0,28
11	70	2,01	-0,41	5,13	5,24	1,00	4,20	1,04	-	-0,15
12	46	1,32	0,28	3,65	5,96	1,00	4,78	1,18	0,10	-
13	20	0,57	1,02	4,65	6,44	1,00	5,35	1,09	0,37	-
14	46	1,32	0,28	8,34	6,64	1,00	5,93	0,72	0,10	-
15	73	2,10	-0,50	9,34	7,12	1,00	6,50	0,62	-	-0,18
16	88	2,53	-0,93	7,54	7,87	1,00	7,08	0,80	-	-0,33
17	98	2,81	-1,22	4,20	8,78	1,00	7,65	1,13	-	-0,44
18	100	2,87	-1,27	-0,17	9,80	1,00	8,23	1,57	-	-0,46
19	93	2,67	-1,07	-4,75	10,83	1,00	8,80	2,03	-	-0,39
20	73	2,10	-0,50	-8,61	11,79	1,00	9,38	2,41	-	-0,18
21	34	0,98	0,62	-10,40	12,55	1,00	9,96	2,59	0,22	-
22	24	0,69	0,91	-8,16	12,90	1,00	10,53	2,37	0,33	-
23	27	0,78	0,82	-4,89	13,15	1,00	11,11	2,04	0,30	-
24	37	1,06	0,54	-1,93	13,42	1,00	11,68	1,74	0,19	-
	Jumlah 1.336	Rerata Butuh 1,60	Jumlah 0,00	(Max-Min)/10 2,59	◀ sama hasilnya ▶			Maximum 2,59	Jumlah 3,16	Jumlah -3,16

Data Kebutuhan Listrik

2. Urutan Puncak

3. Diagram Rippl (Kurva Massa)

1. Kurang-Lebih

▲ Tak berlaku ▲

... kuliah sebelumnya sampai di sini ...

# BANGUNAN TENAGA AIR