การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ
Reservoir Operations

รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
1 มีนาคม 2553

1

Reservoir operations

- คือการปฏิบัติการที่เกี่ยวกับการปล่อยน้ำและการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำ โดยคำนึงถึงผลประโยชน์ที่จะได้รับทั้งในปัจจุบันและในอนาคต และรวมถึงผลกระทบและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นด้วย
- การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ มีปัจจัยที่มีความไม่แน่นอนสูงคือปริมาณน้ำที่จะไหลเข้าอ่างในอนาคต และการตัดสินใจผิดพลาดอาจก่อให้เกิดผลเสียหายอย่างร้ายแรงได้ ทำให้ยากต่อการตัดสินใจในการปฏิบัติการดังกล่าว
- ผู้ที่รับผิดชอบในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ จำเป็นต้องมีประสบการณ์และมีเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจที่เหมาะสม จึงจะสามารถบริหารอ่างเก็บน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้

2

เนื้อหาที่จะนำเสนอ

- Principles
- Reservoir operating rules แบบต่างๆ
- Development of reservoir operating rules
  - Risk based reservoir operating rules (Vudhivanich and Rittima, 2003)
  - Vacancy-Minimum storage requirements (Satoh *et al.* 2003)

3

หน้าที่ของอ่างเก็บน้ำ(Function)

- เก็บกักน้ำไว้ใช้ในอนาคต ซึ่งปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างอาจน้อยกว่าความต้องการ
- ระบายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการใช้น้ำด้านต่างๆ เช่น
  - การชลประทาน
  - อุปโภคบริโภค
  - อุตสาหกรรม
  - การผลิตกระแสไฟฟ้า
  - การควบคุมคุณภาพน้ำ และการรักษาระบบนิเวศน์ด้านท้ายน้ำ
- มีปริมาตรว่างสำหรับรองรับ **Flood** ที่จะเคลื่อนตัวเข้าสู่อ่างในช่วงฤดูน้ำหลาก เพื่อการบรรเทาภาวะน้ำท่วมด้านท้ายน้ำ

4

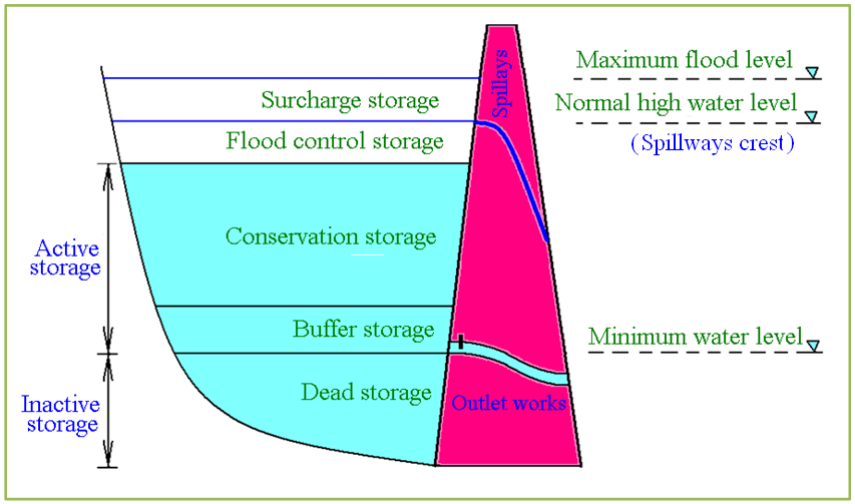
หลักในการบริหารงานอ่างเก็บน้ำ

- จะเก็บกักไว้เท่าไร ?
- จะระบายมากน้อยเท่าไร ?
- จะเผื่อปริมาตรว่างไว้มากน้อยเท่าใด ?

- ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจ
  - ความไม่แน่นอนของ **Inflow**
  - **Economic benefit function** ของการเก็บกัก และ การระบายไม่เป็นเส้นตรงและยากต่อการ **Derive**
  - การตัดสินใจต้องมีการพิจารณาถึงผลประโยชน์ที่ได้จากการระบายในปัจจุบันเปรียบกับการเก็บกักไว้ใช้ในอนาคต
- จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ **(Reservoir Operation Study)** และพัฒนาเกณฑ์การบริหารอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสม

5

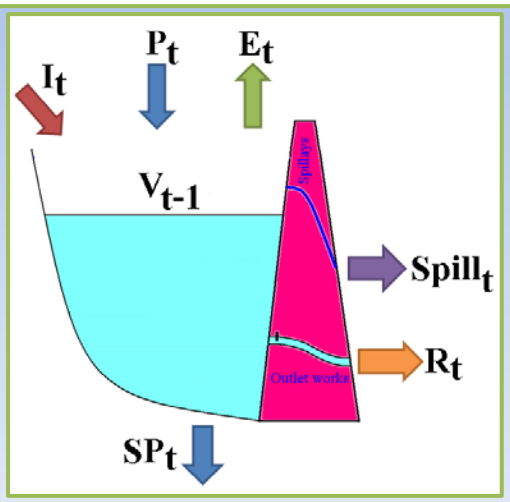
นิยาม Reservoir Storage Zone



(US Army Corps of Engineer, 1998)

สมดุลน้ำในอ่างเก็บน้ำ

$$V_t = V_{t-1} + I_t + P_t - R_t - E_t - Spill_t - SP_t$$



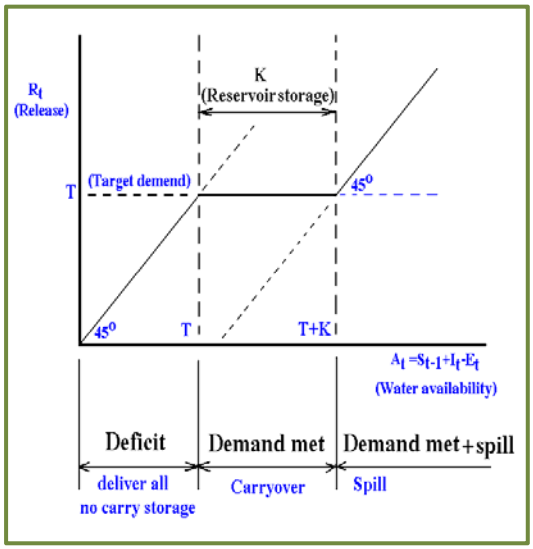
7

Reservoir operating rules

1. Standard Operating Policy, SOP
2. Hedging rules
3. Rule curves
4. Probability based rule curves
5. Vacancy-minimum storage requirements

8

1. Standard Operating Policy, SOP



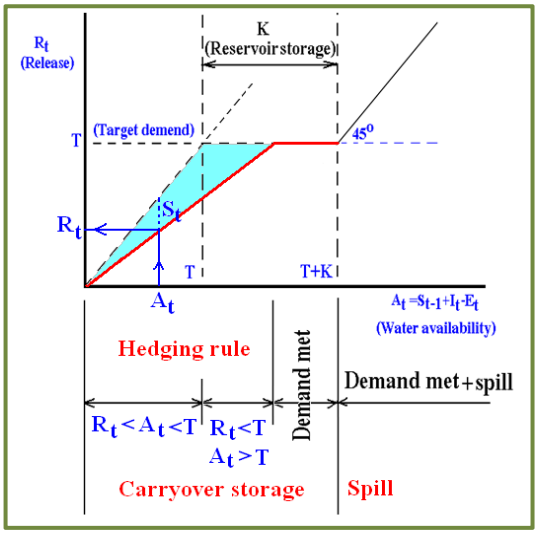
SOP=simplest reservoir operating rule

Minimize total deficit

สภาวะ	เกณฑ์	สภานภาพ
$A_t < T$	$R_t = A_t$	deficit
$T < A_t < T+K$	$R_t = T$	carryover
$A_t > T+K$	$R_t = T$	spill

9

2. Hedging rule

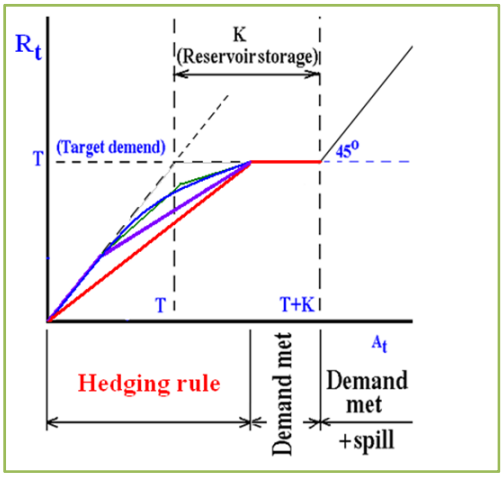


Hedging rule
(Bower et at., 1962)

- หลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่าจะระบายน้ำจากอ่างมากน้อยเท่าใด จึงจะเกิดประโยชน์สูงสุด
- Release VS. Retain

10

2. Hedging rules



Max $Z=B(R_t)+C(S_t)$
ST.
$R_t+S_t=A_t$
$o \leq S_t \leq K$
$o \leq R_t \leq T$

Where
B(Rt)=benefit function of release
C(St)=expected future benefit of carryover storage

11

ที่ Optimal hedging rule

Max $Z=B(R_t)+C(S_t)$
ST.
$R_t+S_t=A_t$
$o \leq S_t \leq K$
$o \leq R_t \leq T$

Lagrangian with constraints

$$L=B(R_t)+C(S_t)+\lambda(A_t-S_t-R_t)$$

$$\frac{\partial L}{\partial R_t}=\frac{\partial B(R_t)}{\partial R_t}-\lambda=0 \quad -(1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial S_t}=\frac{\partial C(S_t)}{\partial S_t}-\lambda=0 \quad -(2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda}=(A_t-S_t-R_t)=0 \quad -(3)$$

$$S_t+R_t=A_t$$

$$\frac{\partial B(R_t)}{\partial R_t}=\frac{\partial C(S_t)}{\partial S_t}$$

12

Benefit Use and Carryover Storage Value Function

- **Quadratic:** $B(R_t) = a_r + b_r R_t + c_r R_t^2$

  $C(S_t) = a_s + b_s S_t + c_s S_t^2$

- **Cubic:** $B(R_t) = a_r + b_r R_t + c_r R_t^2 + d_r R_t^3$

  $C(S_t) = a_s + b_s S_t + c_s S_t^2 + d_s S_t^3$

- **Power** $B(R_t) = q_r R_t^{p_r}$

  $C(S_t) = q_s S_t^{p_s}$

13

$$\text{Quadratic}: R_t^* = \frac{b_s - b_r + 2c_s A_t}{2(c_s + c_r)}$$

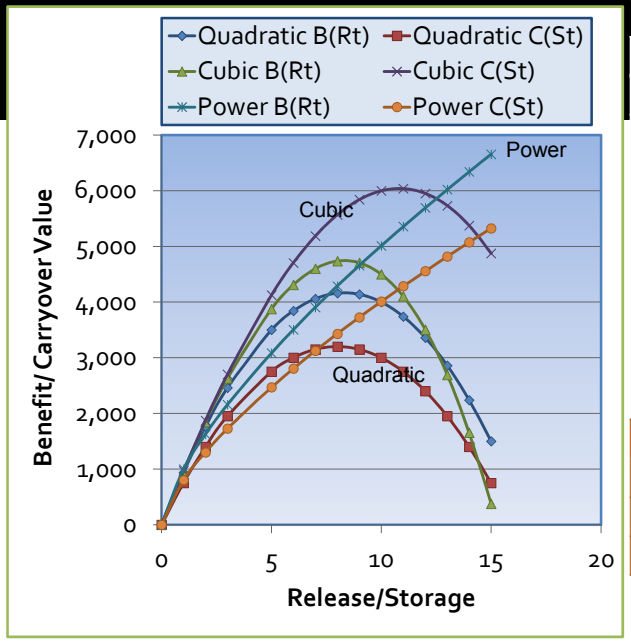
Cubic:

$$R_t^* = \frac{(c_s + c_r) + 3d_s A_t \pm \sqrt{(c_s + c_r)^2 + 3(d_r - d_s)(b_s - b_r) + 6(c_r d_s + c_s d_r) A_t + 9 d_s d_r A_t^2}}{3(d_s - d_r)}$$

14

$$\text{Power}: At = R_t^* + \frac{R_t^{*\left(\frac{p_r - 1}{p_s - 1}\right)}}{\left(\frac{q_s p_s}{q_r p_r}\right)^{\left(\frac{1}{p_s - 1}\right)}}$$

15



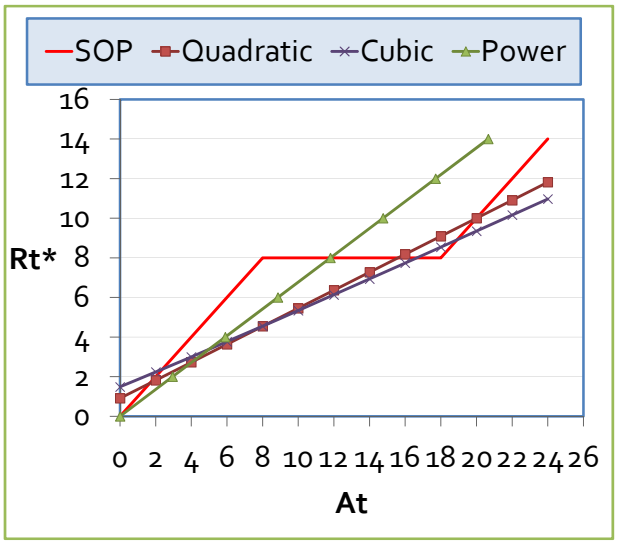
Quadratic function			
	a	b	c
B(Rt)	0	1000	-60
C(St)	0	800	-50

Cubic function				
	a	b	c	D
B(Rt)	0	1000	-35	-2
C(St)	0	800	-30	-1

Power function		
	p	q
B(Rt)	0.7	1000
C(St)	0.7	800

16

Optimal hedging rule for different benefit and carryover value functions



17

Kasetsart J. (Nat. Sci.) 43 : 833 - 842 (2009)

Hedging Policy for Reservoir System Operation: A Case Study of Mun Bon and Lam Chae Reservoirs

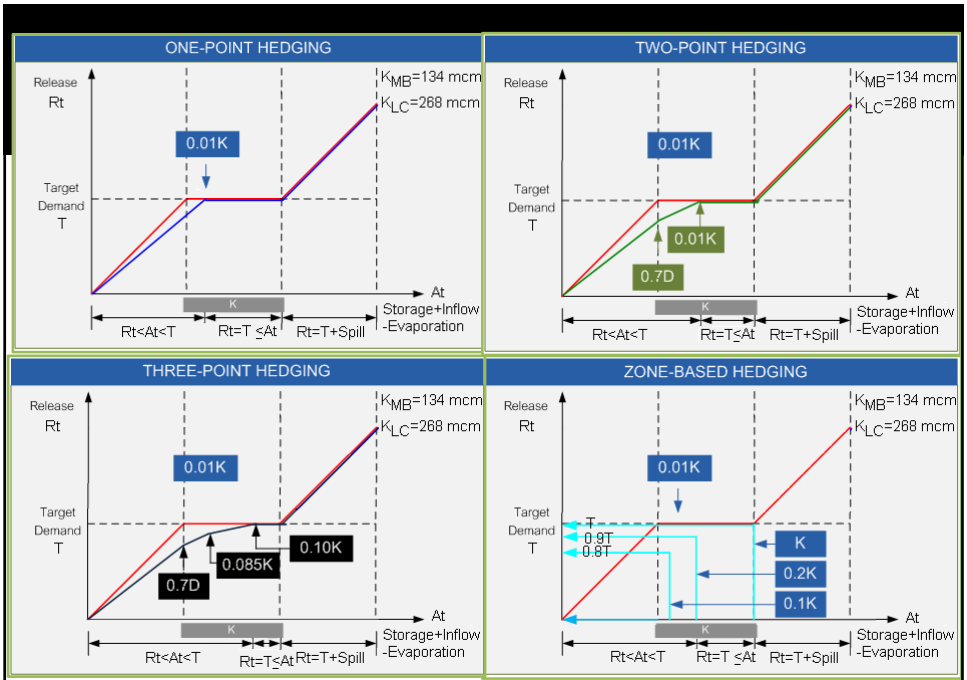
Areeya Rittima

ABSTRACT

A reservoir operation model of Mun Bon and Lam Chae reservoirs was developed to simulate reservoir operation using a hedging policy. A variety of common hedging forms was specified, including one-point hedging, two-point hedging and zone-based hedging. The simulated results were compared with the standard operating policy and probability based rule curve. The percentage of failure frequency, average annual shortage and end water availability were explored. Additionally, three reservoir performance indices, in terms of time-based reliability, vulnerability and resiliency were evaluated. The results indicated that two-point and three-point hedging performed well for all components of reservoir behavior compared with the standard operating policy and other hedging policies. The main outcome was that the risk of a water shortage during the simulation period could be reduced and some water could be retained for use in later periods.

Key words: hedging policy, reservoir system operation, Mun Bon and Lam Chae reservoirs

18



19

Table 3 Reservoir simulation results (mcm = million cubic meters).

Reservoir operating policy	Mun Bon reservoir			Reservoir operating policy	Lam Chae reservoir		
	Failure frequency (%)	Average shortage (mcm/yr)	End-water availability (%K)		Failure frequency (%)	Average shortage (mcm/yr)	End-water availability (%K)
SOP	24.13	14.42	12.50	SOP	25.39	36.38	6.48
0.05-PBRC	0.95	0.06	29.55	0.05-PBRC	1.23	0.98	6.48
1-point hedging				1-point hedging			
0.05K	24.92	14.82	17.25	0.01K	25.87	37.00	7.45
0.10K	25.55	15.31	22.00	0.02K	27.69	38.68	6.75
0.20K	28.86	16.58	31.50	0.03K	28.23	40.16	9.40
2-point hedging				2-point hedging			
0.70D-0.10K	8.99	0.77	13.81	0.70D-0.02K	6.62	2.79	6.48
0.80D-0.10K	9.31	0.54	13.37	0.80D-0.02K	6.62	2.12	6.48
0.90D-0.10K	14.67	0.55	13.18	0.90D-0.02K	6.62	1.45	6.48
3-point hedging				3-point hedging			
0.70D-0.085K-0.10K	14.98	2.48	7.42	0.70D-0.005K-0.02K	6.47	1.49	6.48
0.80D-0.090K-0.10K	14.04	1.59	7.30	0.80D-0.010K-0.02K	6.47	0.99	6.48
0.90D-0.095K-0.10K	12.62	0.75	6.91	0.90D-0.015K-0.02K	6.47	0.50	6.48
Zone-based hedging				Zone-based hedging			
0.10K:0.80D/0.20K:0.90D/K:D	48.26	26.43	15.58	0.010K:0.80D/0.02K:0.90D/K:D	31.86	61.25	6.48
0.10K:0.80D/0.25K:0.90D/K:D	55.21	27.09	15.58	0.015K:0.80D/0.03K:0.90D/K:D	34.07	62.20	6.48

20

3. Rule curves กราฟแสดงเกณฑ์การจัดการอ่างเก็บน้ำ

คือกราฟระดับน้ำ(หรือปริมาตรน้ำ)ในอ่างเก็บน้ำที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำในแต่ละเดือน โดยมีวัตถุประสงค์ในระยะยาวเพื่อลดปริมาณการขาดน้ำหรือปริมาณการระบายน้ำทิ้งให้น้อยที่สุด

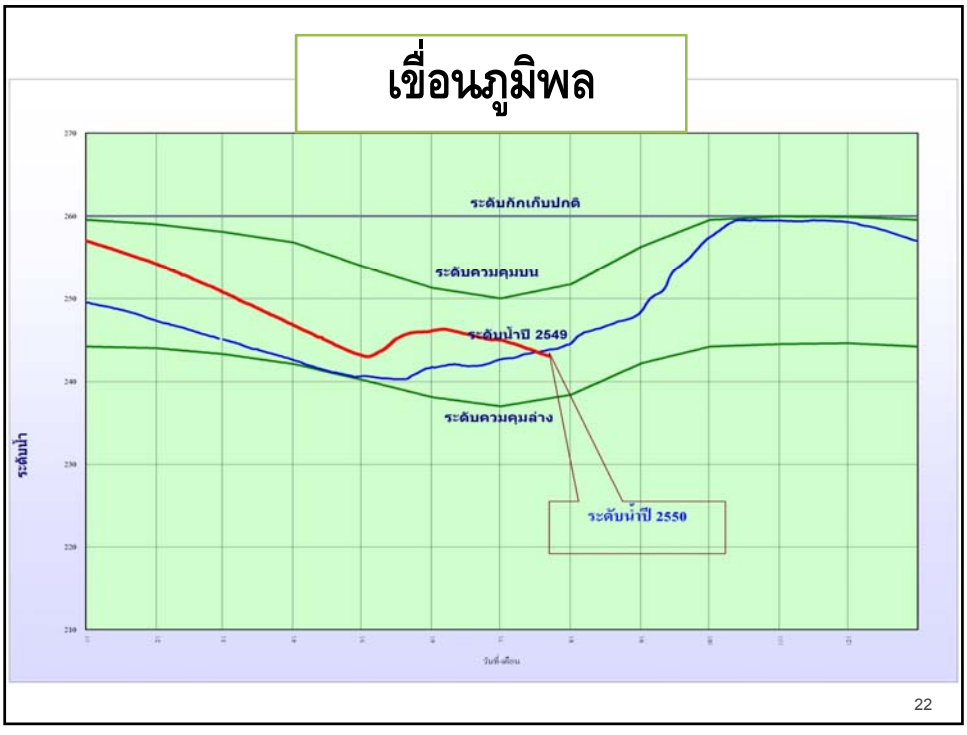
Rule Curves ปกติประกอบด้วย Upper Rule Curve และ Lower Rule Curve

ถ้าระดับน้ำในอ่างอยู่ระหว่าง URC และ LRC (น้ำปกติ) จะสามารถระบายน้ำได้ตามความต้องการต่างๆ

ถ้าระดับน้ำอยู่ต่ำกว่า LRC (น้ำน้อย) จะลดการระบายน้ำลง ระบายเฉพาะกรณีที่จำเป็นเท่านั้น เพื่อให้มีน้ำสำรองไว้สำหรับอนาคตที่อาจไม่มีน้ำไหลเข้าอ่าง

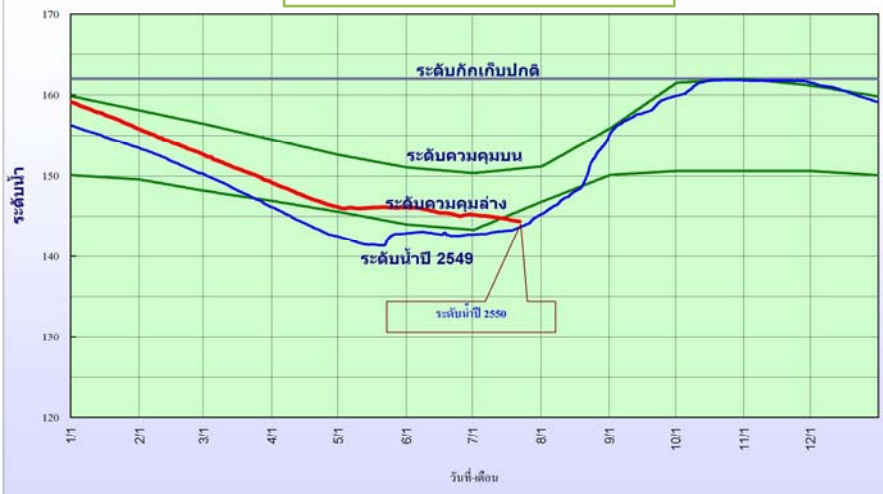
ถ้าระดับน้ำอยู่สูงกว่า URC (น้ำมาก) จะเพิ่มการระบายน้ำในอัตราสูงสุด เพื่อให้อ่างเก็บน้ำมีปริมาตรว่างพอที่จะรองรับน้ำหลากที่อาจไหลเข้าอ่างในอนาคตอันใกล้

21

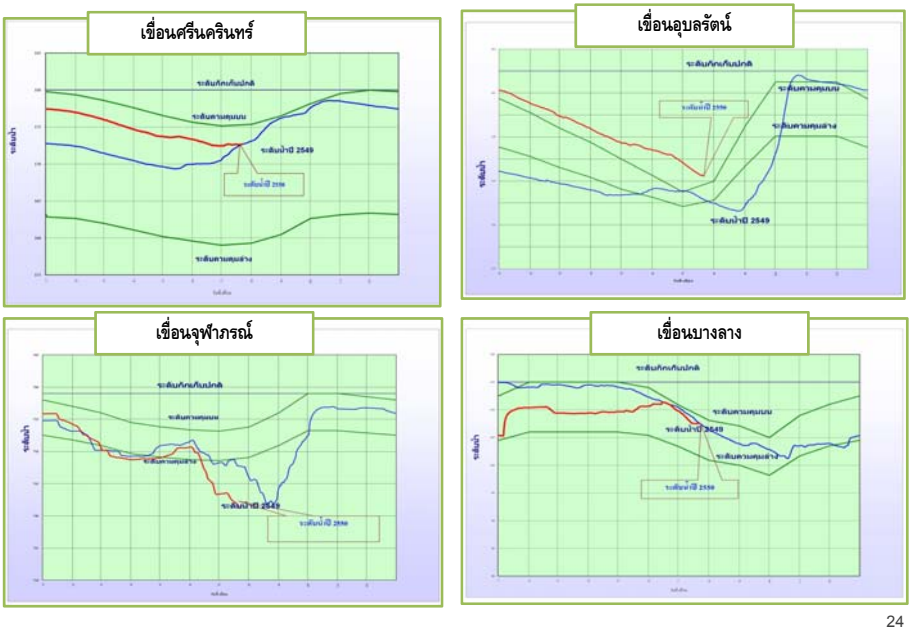


22

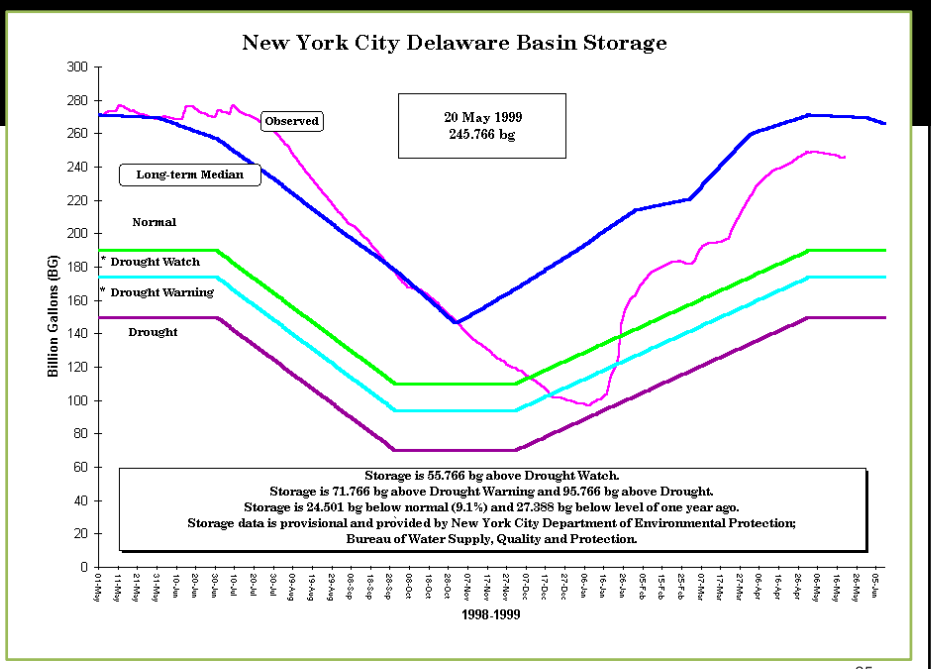
เขื่อนสิริกิติ์



23



24



25

การสร้าง Rule Curves

•การจำลองระบบ (Simulation)

Trial&Error

•กำหนด Upper และ Lower Rule curves

•กำหนดเกณฑ์การปล่อยน้ำ

•กำหนดเกณฑ์การเลือก

•จำลองการปฏิบัติการ จนได้ Rule Curves ที่เป็นไปตามเกณฑ์ HEC-3

•การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

กำหนด Objective Function+ Constraints

Solve โดยใช้ Nonlinear optimization

•DP
•GA
•Others

26

DYNAMIC PROGRAMMING BASED APPROACH FOR SEARCHING RULE CURVES ACROSS MULTI-RESERVOIR SYSTEMS

Chavalit Chaleeraktrakoon and Anongrit Kangrang

Department of Civil Engineering, Thammasat University,
Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

E-mail of Corresponding author: cchava@engr.tu.ac.th

ABSTRACT

This paper formulates the staged problem of rule curve searching using dynamic programming (DP), and proposes the principle of progressive optimality (PPO) to find the optimal solution of the formulated DP problem. When dealing with multiple reservoirs, the DP based approach will manage available capital water across the reservoirs considered. The proposed DP/PPO approach has been applied to determine the optimal rule curves of the Bhumibol and Sirikit Reservoirs (the Chao Phraya River Basin, Thailand). It is shown that the approach uses appreciably small computing resources, as compared with the DP technique does. It is also concluded that the DP/PPO approach is more effective than the existing accepted practice (i.e., reservoir simulation study) because it usually yields the optimal rule curves.

27

reservoir release ($R_{m,n}$)

$$R_{m,n}=\begin{cases} W_{m,n}-FS_n, \text{ for } W_{m,n}\geq FS_n \text{ and } W_{m,n}-FS_n\geq D_{m,n} \\ D_{m,n}, \text{ for } W_{m,n}\geq FS_n \text{ and } W_{m,n}-FS_n< D_{m,n} \\ D_{m,n}, \text{ for } x_{m,n}\leq W_{m,n}< FS_n \\ D_{m,n}+W_{m,n}-x_{m,n}, \text{ for } W_{m,n}< x_{m,n} \end{cases}$$

water balance

$$W_{m,n}=S_{m+1,n}+Q_{m,n}+P_{\tau,n}-E_{\tau,n}-DS_n$$

water demand

$$D_{m,n}=\frac{W_{m,n}}{\sum_{n=1}^{k}W_{m,n}}\times D_\tau$$

water deficit

$$c\left(m,x_{m,n},R_{m,n}\right)=D_{m,n}-R_{m,n} \quad \text{for } D_{m,n}>R_{m,n}\text{ ; otherwise=0}$$

recursive relation

$$f(m,x_{m,n})=Min_{R_{m,n}\in A}[f(m+1,x_{m,n},R_{m,n})+c(m,x_{m,n},R_{m,n})]$$

$$S_{m-1,n}=W_{m,n}-R_{m,n}$$

$$DS_n\leq x_{m,n}<FS_n$$

$$x_{m,n}<y_{m,n}\leq FS_n$$

DP formulation of lower rule curve
Minimize total deficit

$R_{m,n}$ release
FS_n = conservative reservoir capacity
$W_{m,n}$ = available water
$D_{m,n}$ = water demand
$S_{m+1,n}$ = stored water at the starting of period $m+1$
$Q_{m,n}$ = total amount of reservoir inflow
$P_{\tau,n}$ = average of precipitation during month τ
$E_{\tau,n}$ = average of reservoir evaporation loss
DS_n = dead storage
D_τ = total water requirement
$c\left(m,x_{m,n},R_{m,n}\right)$ = monthly water deficit
$x_{m,n}$ = lower rule curve
$y_{m,n}$ = upper rule-curve
A = set of feasible releases associated with $x_{m,n}$

28

reservoir release ($R_{m,n}$)

$$R_{m,n}=\begin{cases} W_{m,n}-FS_n, \text{ for } W_{m,n}\geq FS_n \text{ and } W_{m,n}-FS_n\geq D_{m,n} \\ D_{m,n}, \text{ for } W_{m,n}\geq FS_n \text{ and } W_{m,n}-FS_n< D_{m,n} \\ D_{m,n}, \text{ for } x_{m,n}\leq W_{m,n}< y_{m,n}< FS_n \\ D_{m,n}+W_{m,n}-x_{m,n}, \text{ for } W_{m,n}< x_{m,n} \end{cases}$$

water balance

$$W_{m,n}=S_{m+1,n}+Q_{m,n}+P_{\tau,n}-E_{\tau,n}-DS_n$$

water demand

$$D_{m,n}=\frac{W_{m,n}}{\sum_{n=1}^{k}W_{m,n}}\times D_\tau$$

excess water

$$c\left(m,x_{m,n},R_{m,n}\right)=D_{m,n}-R_{m,n} \quad \text{for Dm,n < Rm,n; otherwise=0}$$

recursive relation

$$f(m,x_{m,n})=Min_{R_{m,n}\in A}[f(m+1,x_{m,n},R_{m,n})+c(m,x_{m,n},R_{m,n})]$$

$$S_{m-1,n}=W_{m,n}-R_{m,n}$$

$$DS_n\leq x_{m,n}<FS_n$$

$$x_{m,n}<y_{m,n}\leq FS_n$$

DP formulation of upper rule curve
Minimize total excess

$R_{m,n}$ release
FS_n = conservative reservoir capacity
$W_{m,n}$ = available water
$D_{m,n}$ = water demand
$S_{m+1,n}$ = stored water at the starting of period $m+1$
$Q_{m,n}$ = total amount of reservoir inflow
$P_{\tau,n}$ = average of precipitation during month τ
$E_{\tau,n}$ = average of reservoir evaporation loss
DS_n = dead storage
D_τ = total water requirement
$c\left(m,x_{m,n},R_{m,n}\right)$ = monthly water deficit
$x_{m,n}$ = lower rule curve
$y_{m,n}$ = upper rule-curve
A = set of feasible releases associated with $x_{m,n}$

29

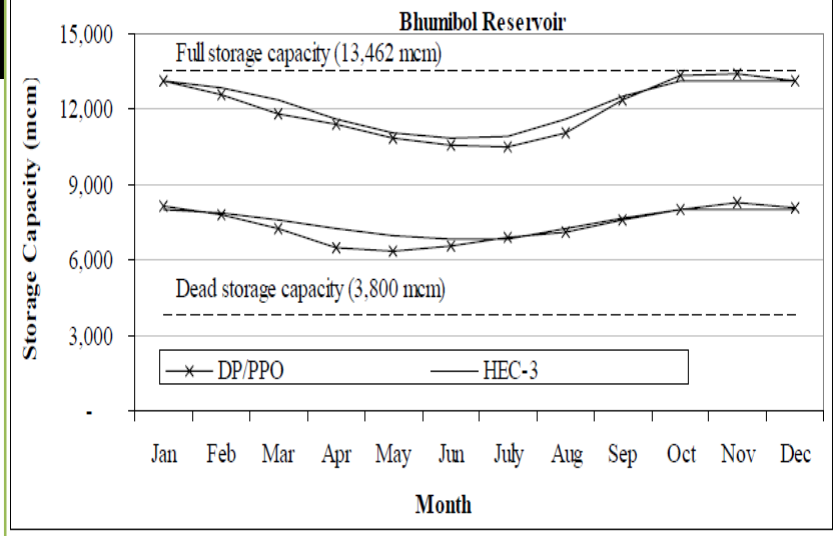


Fig. 4: Optimal rule curves of the DP/PPO algorithm and the HEC-3 simulation approach (the Bhumibol Reservoir)

30

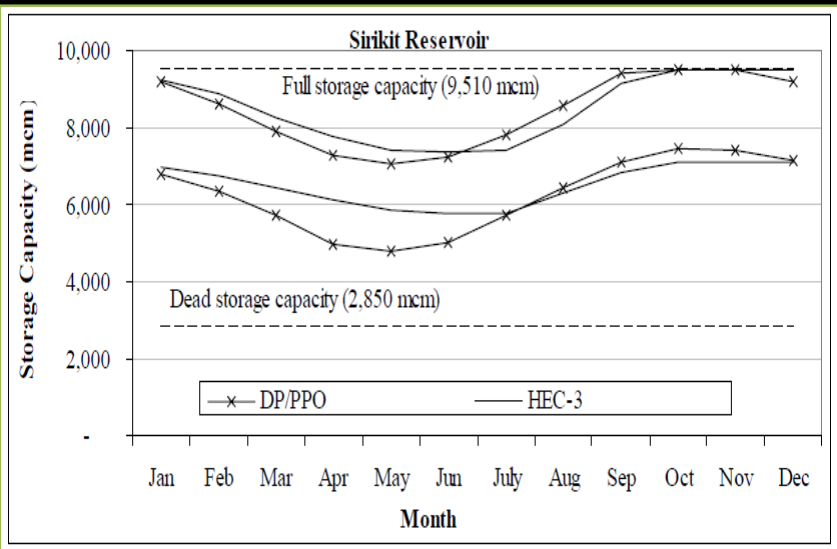


Fig. 5: Optimal rule curves of the DP/PPO algorithm and the HEC-3 simulation approach (the Sirikit Reservoir)

31

Rule curve assessment

- Monte Carlo simulation with 500 generated inflow sequences
- Assessing criteria
  - Frequency
  - Magitude
  - Duration
- Result = Mean± 1 Standard deviation

32

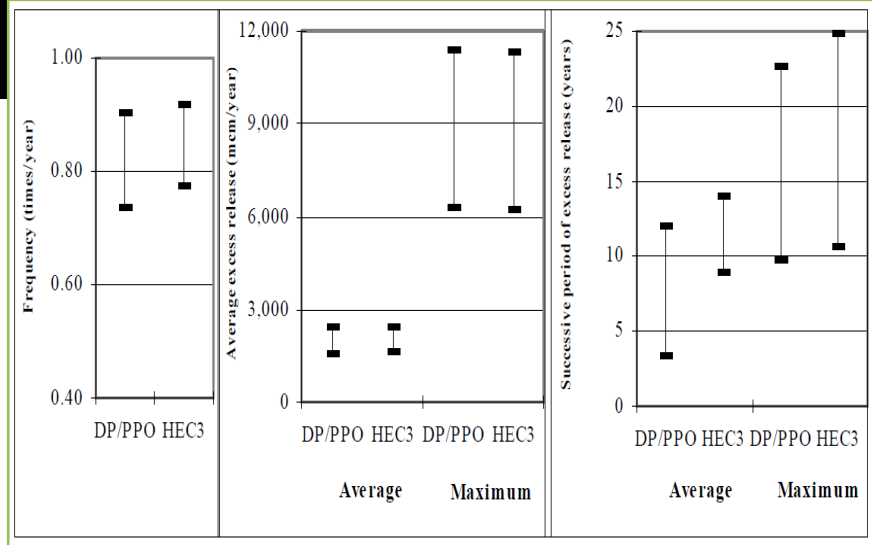


Fig. 7: Frequency, magnitude and successive period of excess release for the DP/PPO algorithm and theHEC-3 simulation approach

33

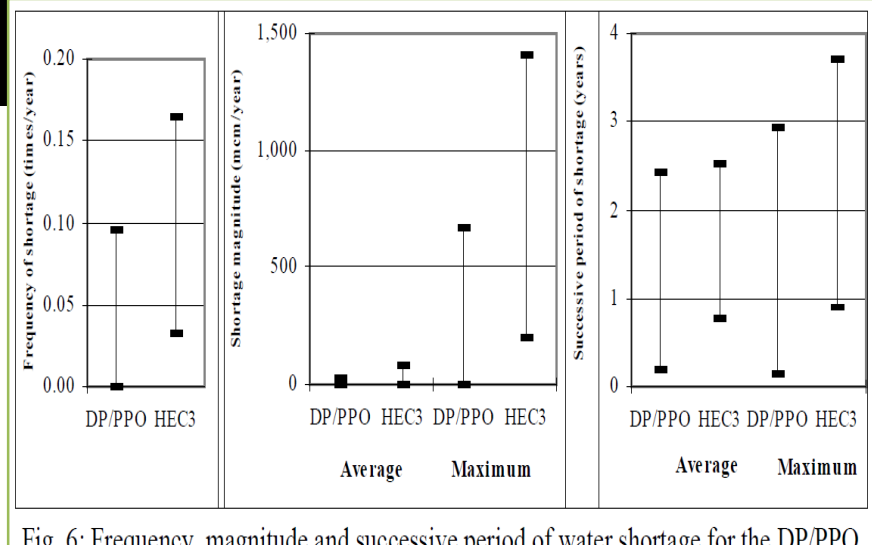


Fig. 6: Frequency, magnitude and successive period of water shortage for the DP/PPO algorithm and theHEC-3 simulation approach

34

ANNs Paper#1

Deriving A General Operating Policy for Reservoirs Using ANNs

by H.Raman and V. Chandramouli

(ASCE Wat.Res.Plnng.&Mngt. Vol.122)

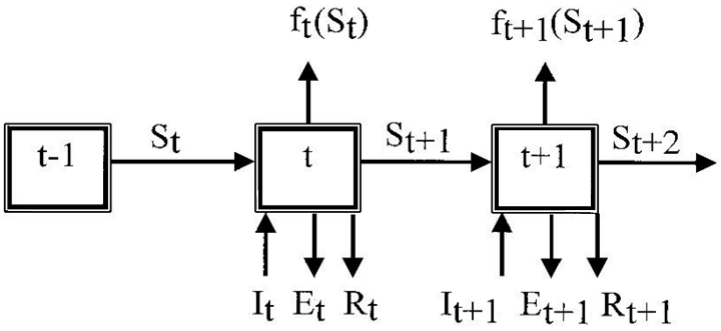
Research Methodology

(1) Calculate Daily Dt

(2) Run DP at 2 week interval for 20 years of historical data to determine the optimal release (min.SSD). Using 10, 5, 3 and 2 mcm. Discretization levels.

DP Algorithm

$$S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - R_t$$



R_t = Decision Variable

S_t = State Variable

Dynamic Programming Model

DP Objective Function

$$Z_t = \sum_{t=1}^{T} (D_t - R_t)^2 \qquad (1)$$

where T = number of fortnights;
R_t = release during time period t;
and D_t = irrigation demand during time period t.
The recursive equation for any time period t is

$$f_t^n(S_t) = \min[Z_t + f_{t+1}^{n-1}(S_t + I_t - R_t)] \qquad (2)$$

Subject to

$$0.0 \leq R_t \leq R_{t\max}$$

$$R_t \leq S_t + I_t - E_t$$

$$R_t \geq S_t + I_t - K - E_t$$

$$S_{t\min} \leq S_t \leq S_{t\max}$$

$$E_t = f(S_t, S_{t-1}, e_t)$$

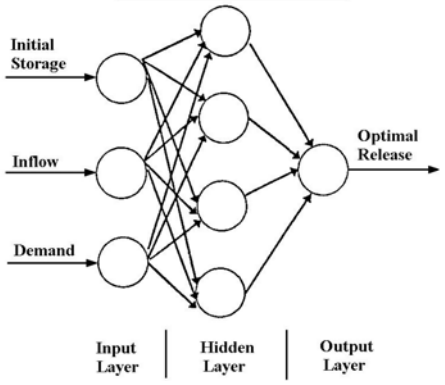
(3) Develop operating policy by

(3.1) Multiple Regression Model

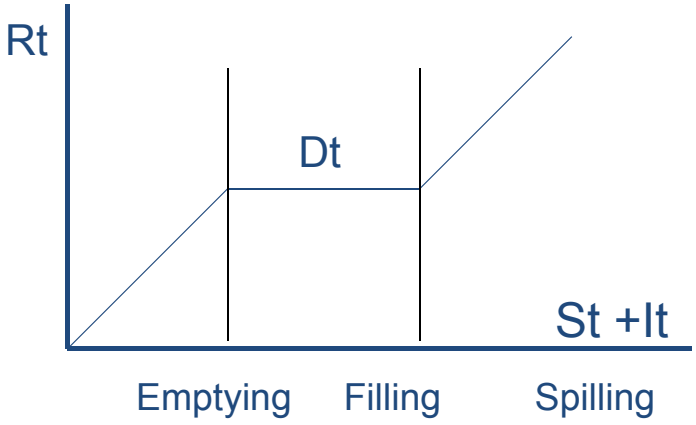
Rt=a*St+b*It+c*Dt+d

(3.2) ANNs

$$y_j = f\left(\sum w_{ji} x_i\right) = \frac{1}{1 + e^{-net_j}}$$



(4)Standard Operating Policy(SOP)



(5) Compare the performance of derived policy DPR, DPN, SOP and SDP by simulating the reservoir operations for 3 years period and using SSD performance index as indicator

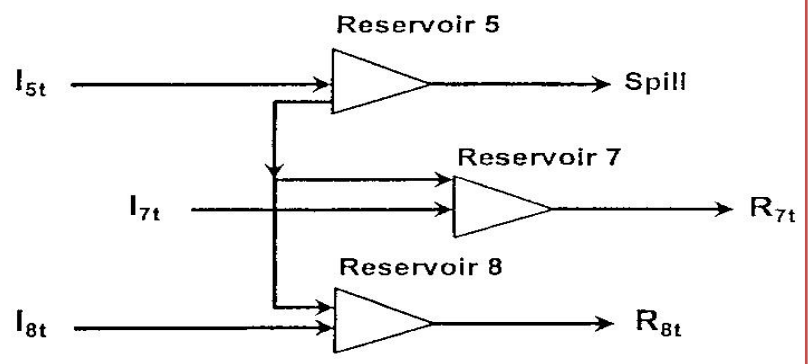
Sum of Fortnightly Squared Deficit and Total Spill for Three Years of Historical Data

Discretization step (Mm^3) (1)	DPR Model		DPN Model		SDP Model		SOP model (8)
	Total squared deficit (2)	Total spill (Mm^3) (3)	Total squared deficit (4)	Total spill (Mm^3) (5)	Total squared deficit (6)	Total spill (Mm^3) (7)	
10	6,086.56	28.05	5,953.81	13.72	11,707.9	—	16,616.98
5	5,919.75	25.29	5,626.43	0.0	7,259.76	—	—
3	5,869.66	20.79	5,700.09	10.0	8,381.52	—	—
2	5,875.16	22.88	5,586.59	0.52	8,847.36	—	—

ANNs Paper #2

Multireservoir Modeling with Dynamic Programming and ANN

by V.Chandramouli and H.Ramman.



3-Reservoir System in Parambikulam Aliyar Project

DP Model

$$\text{minimize } Z = \sum_{t=1}^{T} ((D_{7t} - R_{7t})^2 + (D_{8t} - R_{8t})^2) \qquad (2)$$

where T = number of 2-week periods (here $T = 24$ since year-by-year optimization is considered for the three-reservoir operation model); R_{7t} and R_{8t} = release during time period t from Reservoirs 7 and 8, respectively; and D_{7t} and D_{8t} = irrigation demand during time period t in Reservoirs 7 and 8, respectively.

The recursive equation for the three-reservoir problem for a given time period t is

$$f_t^n(S_{5t}, S_{7t}, S_{8t}) = \underset{R_{5t}, R_{7t}, R_{8t}}{\text{minimize}} [Z_t + f_{t+1}^{n-1}(S_{5t+1}, S_{7t+1}, S_{8t+1})]$$

$$0.0 \le R_{5t} \le R_{5t\max}; \quad R_{5t} \le S_{5t} + I_{5t} - E_{5t}$$

$$R_{5t} \ge S_{5t} + I_{5t} - E_{5t} - k_5; \quad S_{5t\min} \le S_{5t} \le S_{5t\max}$$

$$E_{5t} = f(S_{5t}, S_{5t-1}, e_{5t}); \quad 0.0 \le R_{7t} \le R_{7t\max}$$

$$R_{7t} \le S_{7t} + I_{7t} - E_{7t} + 0.25R_{5t}$$

$$R_{7t} \ge S_{7t} + I_{7t} - E_{7t} - k_7 + 0.25R_{5t}$$

$$S_{7t\min} \le S_{7t} \le S_{7t\max}; \quad E_{7t} = f(S_{7t}, S_{7t-1}, e_{7t})$$

$$0.0 \le R_{8t} \le R_{8t\max}; \quad R_{8t} \le S_{8t} + I_{8t} - E_{8t} + 0.75R_{5t}$$

$$R_{8t} \ge S_{8t} + I_{8t} - E_{8t} - k_8 + 0.75R_{5t}$$

$$S_{8t\min} \le S_{8t} \le S_{8t\max}; \quad E_{8t} = f(S_{8t}, S_{8t-1}, e_{8t})$$

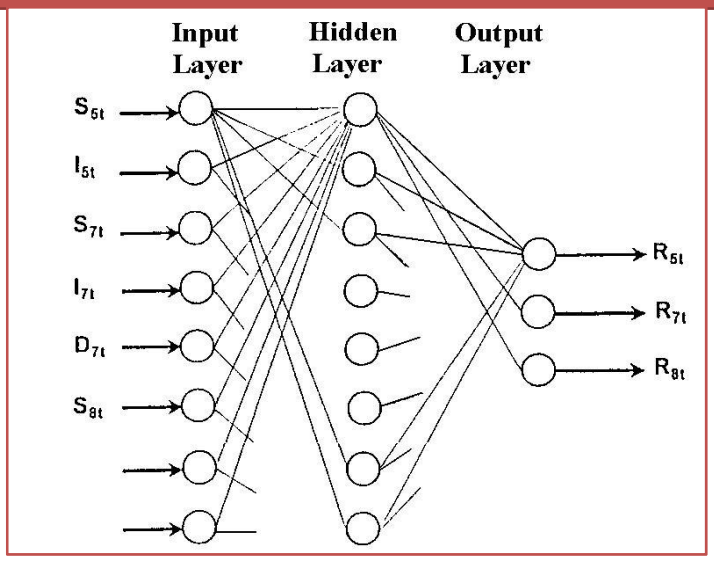
Multiple Linear Regression Model (DPR3)

$$R_{5t} = a_1S_{5t} + a_2I_{5t} + a_3S_{7t} + a_4I_{7t} + a_5D_{7t} + a_6S_{8t} + a_7I_{8t} + a_8D_{8t} \qquad (6)$$

$$R_{7t} = b_1S_{5t} + b_2I_{5t} + b_3S_{7t} + b_4I_{7t} + b_5D_{7t} + b_6S_{8t} + b_7I_{8t} + b_8D_{8t} \qquad (7)$$

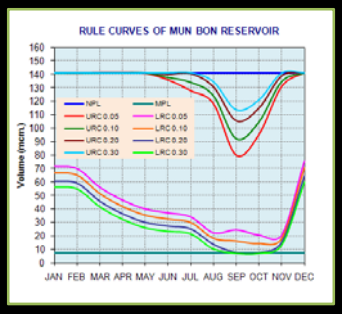
$$R_{8t} = c_1S_{5t} + c_2I_{5t} + c_3S_{7t} + c_4I_{7t} + c_5D_{7t} + c_6S_{8t} + c_7I_{8t} + c_8D_{8t} \qquad (8)$$

Neural Network Model (DPN3)



Performance of DPN3 and DPR3

Reservoir Node	Objective Function Value for 19 Years of Data	
	DPN3	DPR3
7	201933.1	240599.9
8	13070.7	16372.6



Probability Based Rule Curves

Uncertain future inflow

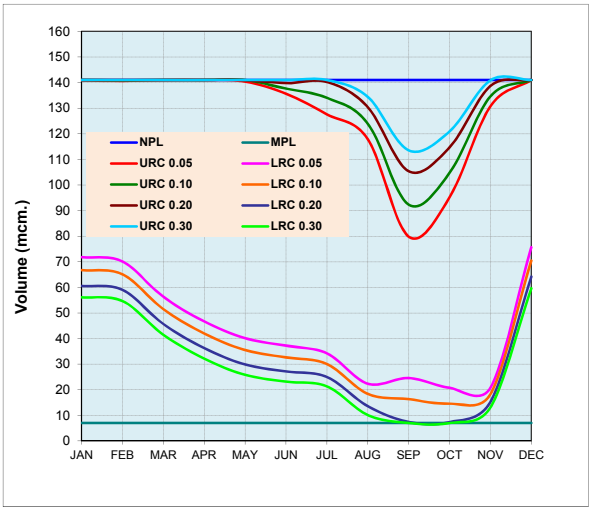
47

หลักการ Probability Based Rule Curve

- คือ rule curves (upper และ lower) ซึ่งมีข้อมูลบอกระดับความเสี่ยงต่างๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานได้มีโอกาสพิจารณาว่าในสถานการณ์ต่างๆ นั้นๆ ควรเลือกที่จะ operate อ่างเก็บน้ำที่ความเสี่ยงมากน้อยเท่าใด เช่น
  - เสี่ยงน้อย (small risk) คือการหลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดในอนาคต โดยยอมให้มีการใช้ประโยชน์จากอ่างในระดับต่ำในปัจจุบัน
  - หรือเสี่ยงมาก (high risk) เพื่อใช้ประโยชน์จากอ่างเก็บน้ำในปัจจุบันในระดับสูง โดยยอมรับว่าในอนาคตจะมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายมากขึ้น

48

Probability Based Rule Curve of Mun Bon Reservoir



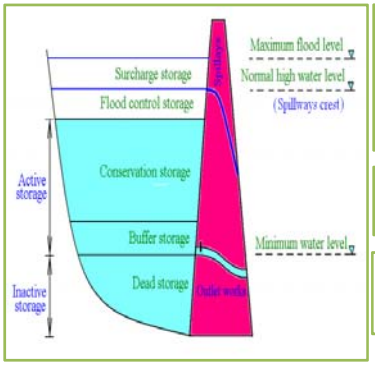
Developed from 30 generated series of 53 years data (1952-2004)

49

PBRC-Upper Rule Curve

-ระดับน้ำสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้น ในการ operate อ่างเก็บน้ำ ที่ความเสี่ยงที่กำหนด เพื่อให้อ่างมีปริมาตรเพียงพอที่จะรับ Flood โดยระดับน้ำสูงสุดนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

-URC จะเกี่ยวข้องกับการกำหนดปริมาตรสำรองเพื่อการป้องกันน้ำท่วม (VFC_t)



$VFC_t = VNPL - VURC_t$

Flood Control Reserve (VFC_t) จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสุทธิ (NRI_t)

$NRI_t = Inflow_t - Outflow_t$

$$P(NRI_t > VFC_t) = Risk$$

50

PBRC-Upper Rule Curve

ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสุทธิ (Net Reservoir Inflow, NRI) คำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากอ่าง

Net Reservoir Inflow Volume (NRI)
= Reservoir Inflow-Reservoir Outflow

- Rainfall
- Inflow

- Evaporation
- Percolation
- Demand

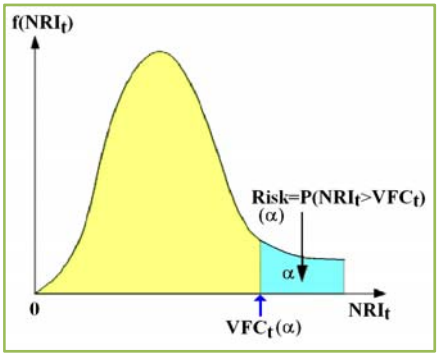
51

PBRC-Upper Rule Curve

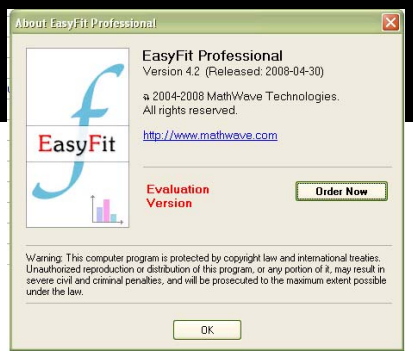
1) เลือกชุดข้อมูลอย่างน้อย 30 ปี นำมาคำนวณหา NRI_t

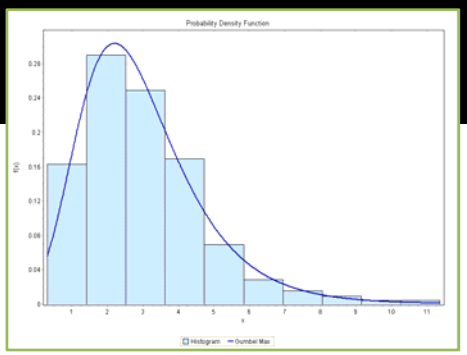
ถ้าช่วงเวลา t ใดๆ $NRI_t \leq 0$ แสดงว่า $VFC_t=0$ Upper Rule curve จะอยู่ที่ Normal Pool

2) วิเคราะห์การแจกแจงความน่าจะเป็นของ NRI_t สำหรับ t ใดๆ ที่ $NRI_t>0$



52





Goodness of Fit - Summary

#	Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
		Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
1	Beta	0.02082	2	0.5303	2	7.6328	6
2	Gamma	0.01994	1	0.3951	1	5.3668	2
3	Gamma (3P)	0.02157	3	0.53815	3	7.5896	5
4	Gen. Extreme Value	0.02331	4	0.6456	4	7.4104	3
5	Gumbel Max	0.02351	5	0.8182	6	4.7437	1
6	Lognormal	0.05314	10	4.3453	10	30.807	11
7	Lognormal (3P)	0.02371	6	0.74259	5	14.544	9
8	Rayleigh	0.03663	9	2.9638	8	9.1855	7
9	Rayleigh (2P)	0.05564	11	6.0004	11	14.65	10
10	Weibull	0.03565	8	3.1702	9	7.5589	4
11	Weibull (3P)	0.0263	7	0.96369	7	9.8099	8
12	Johnson SU	No fit					

Fitting Results

#	Distribution	Parameters
1	Beta	α_1=2.4963 α_2=68.911 a=0.18313 b=79.921
2	Gamma	α=2.9841 β=0.9955
3	Gamma (3P)	α=2.652 β=1.0616 γ=0.15514
4	Gen. Extreme Value	k=0.034 σ=1.2887 μ=2.182
5	Gumbel Max	σ=1.3408 μ=2.1967
6	Lognormal	σ=0.61553 μ=0.91684
7	Lognormal (3P)	σ=0.45 μ=1.2132 γ=-0.74766
8	Rayleigh	σ=2.3702
9	Rayleigh (2P)	σ=2.4047 γ=0.03622
10	Weibull	α=2.0488 β=3.306
11	Weibull (3P)	α=1.6204 β=2.9981 γ=0.28826
12	Johnson SU	No fit

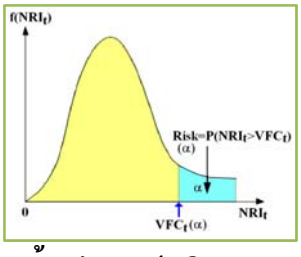
53

PBRC-Upper Rule Curve

3) กำหนดค่าความเสี่ยง (Risk) เช่น α=0.05, 0.10, 0.20, 0.30 เพื่อคำนวณค่า $VFC_t(\alpha)$

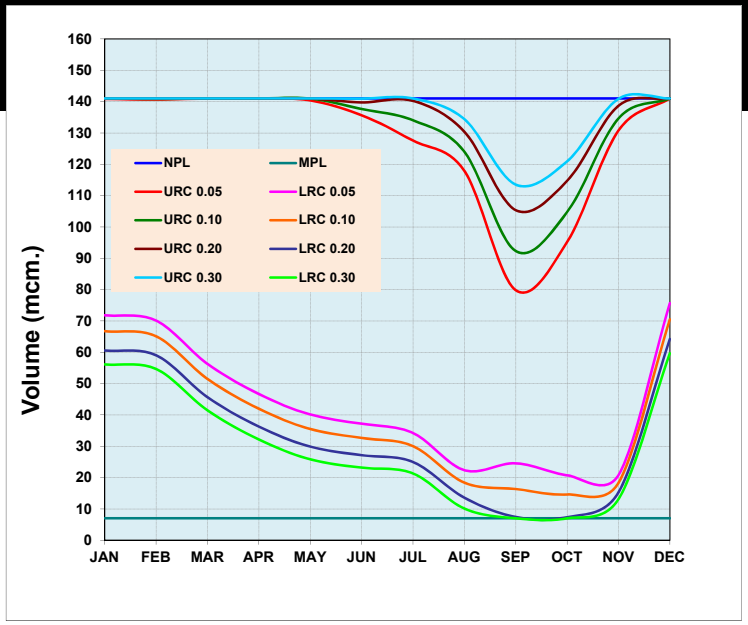
ค่าความเสี่ยงจะเป็นส่วนกลับของรอบปีการเกิดซ้ำ

$$Risk = \frac{1}{Tr} = P(X \geq X_{Tr})$$



4) พล๊อตค่า $VFC_t(\alpha)$ โดยอ้างอิงกับระดับน้ำเก็บกักปกติของอ่างเก็บน้ำจะได้เส้น Upper Rule Curve ที่ค่าความเสี่ยงต่าง ๆ

54

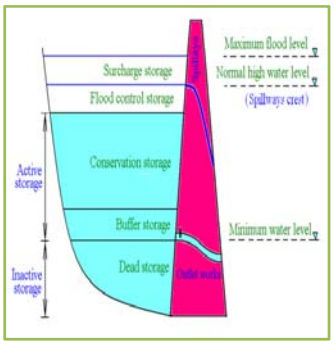


55

PBRC-Lower Rule Curve

-ระดับน้ำต่ำสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในการ operate อ่างเก็บ ที่ความเสี่ยงที่กำหนด เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดแคลนน้ำในอนาคต โดยระดับน้ำต่ำสุดนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

-LRC เกี่ยวข้องกับการกำหนดปริมาตรน้ำสำรองเพื่อการป้องการขาดแคลนน้ำในอนาคต (VBUFt) ในแต่ช่วงเวลา



$$VBUF_t = VLRC_t - VMIN$$

Buffer storage ($VBUF_t$) จะเปลี่ยนแปลงไปตาม ผลรวมของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสุทธิสะสม (ΣNRI_t)

จะวิเคราะห์หา $VBUF_t$ และ $VLRC_t$ ในช่วงเวลาที่ $NRI_t < 0$ หรือช่วงที่น้ำไหลเข้าน้อยกว่าไหลออก หรือช่วงฤดูแล้ง

$$P(-\sum_{i=t}^{D} NRI_i > VBUF_t) = Risk$$

เมื่อ D คือช่วงเวลาที่ $NRI_t < 0$

56

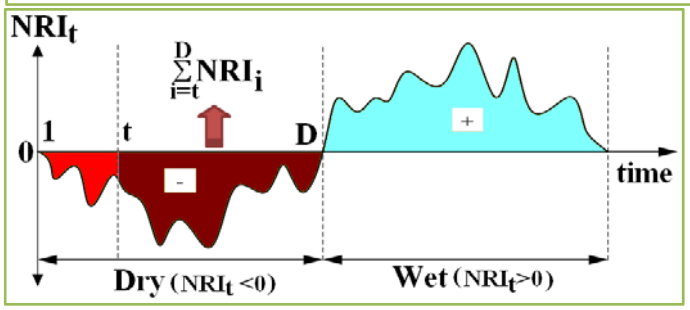
PBRC-Lower Rule Curve

1) เลือกชุดข้อมูลอย่างน้อย 30 ปี นำมาคำนวณหา NRI_t

ถ้าช่วงเวลา t ใดๆ $NRI_t > 0$ แสดงว่า $VBUF_t=0$

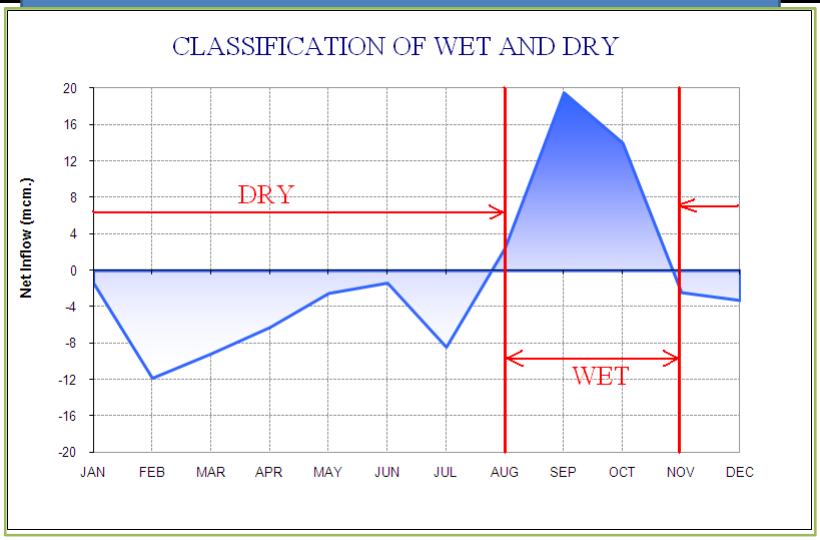
Lower Rule curve จะอยู่ที่ Minimum Pool

2) วิเคราะห์หาช่วงน้ำเกิน (Wet) และช่วงขาดน้ำ (Dry) จาก NRI_t

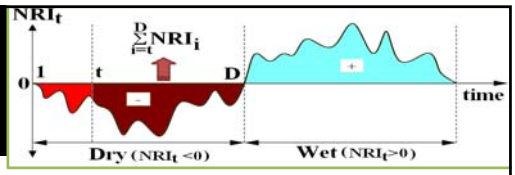


57

Example of Mun Bon Reservoir (1952-2004)
Dry season=Dec-Jul
Wet season=Aug-Nov



58



3) คำนวณหา $\sum_{i=t}^{D} NRI_i$ เมื่อ **t = 1, 2, 3,..., D-1, D**

4) วิเคราะห์การแจกแจงความน่าจะเป็นของ $-\sum_{i=t}^{D} NRI_i$ เมื่อ t = 1, 2, 3,..., D-1, D จะได้ $f\left(-\sum_{i=t}^{D} NRI_i\right)$

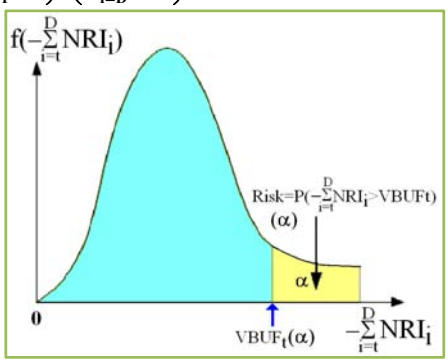
$$f\left(-\sum_{i=1}^{D} NRI_i\right), f\left(-\sum_{i=2}^{D} NRI_i\right), \ldots\ldots, f\left(-\sum_{i=D-1}^{D} NRI_i\right), f\left(-\sum_{i=D}^{D} NRI_i\right)$$

5) กำหนดค่าความเสี่ยง เช่น

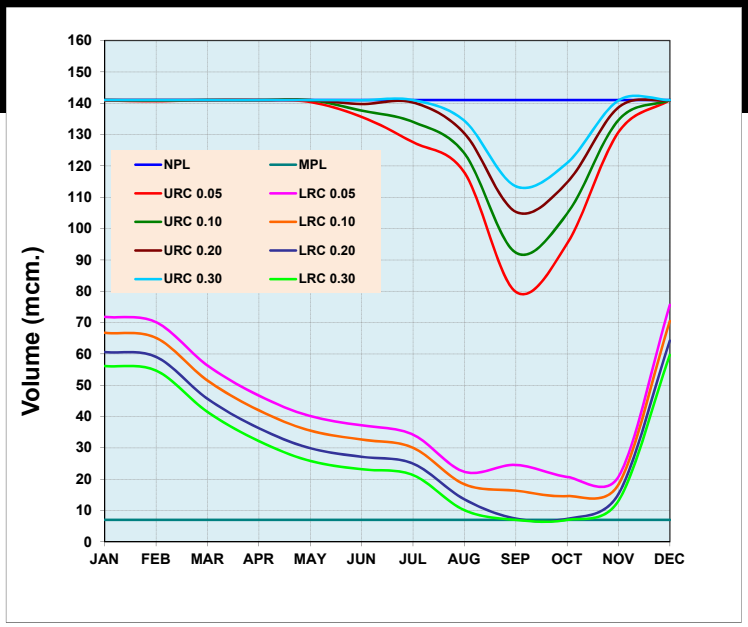
α=0.05, 0.10, 0.20, 0.30

เพื่อคำนวณค่า $VBUF_t(\alpha)$

6) พล็อตค่า $VBUF_t(\alpha)$ โดยอ้างอิงกับระดับเก็บกักต่ำสุดจะได้ **Lower Rule Curve** ที่ความเสี่ยงต่างๆ

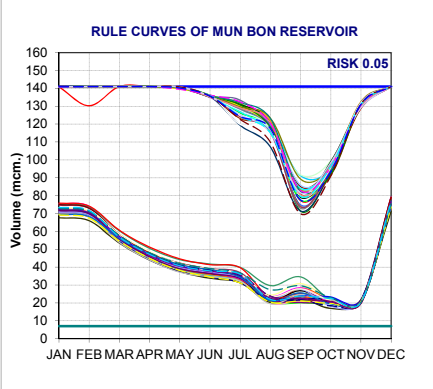


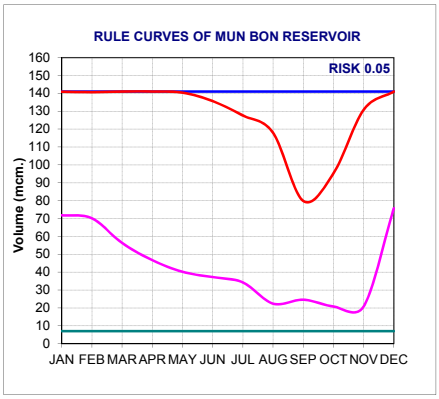
59



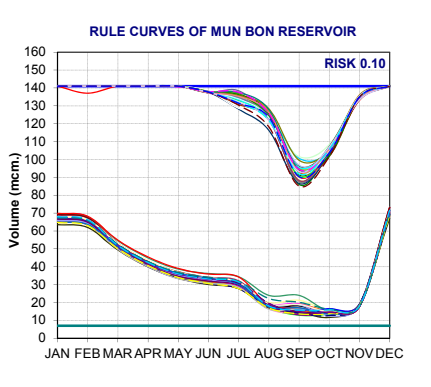
60

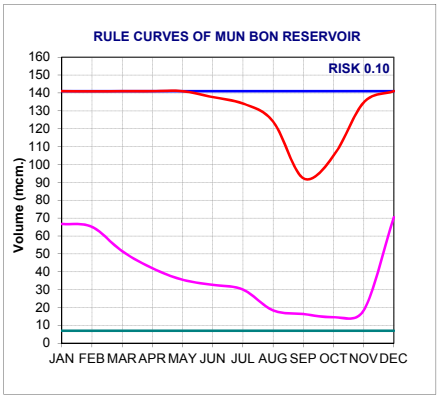
PBRC-from generated data



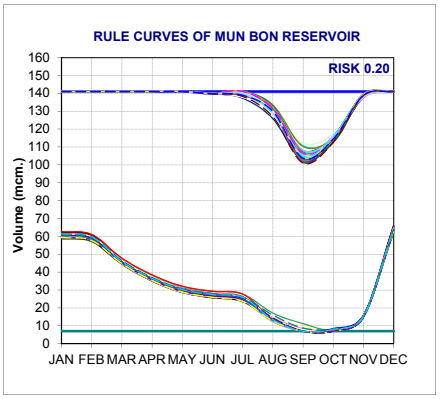


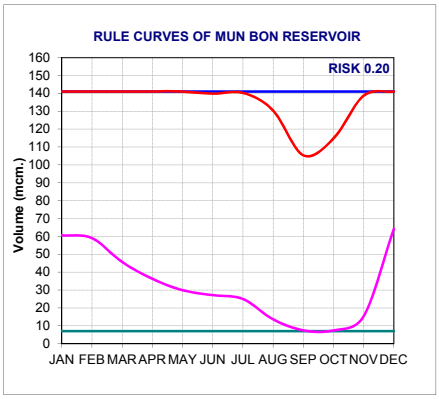
61



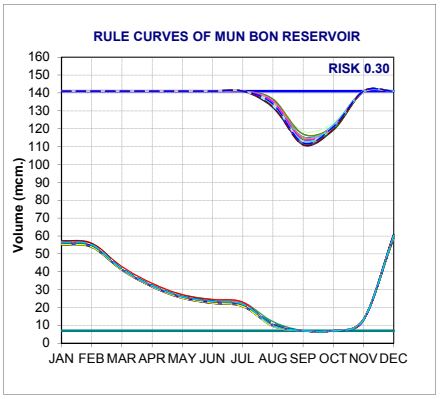


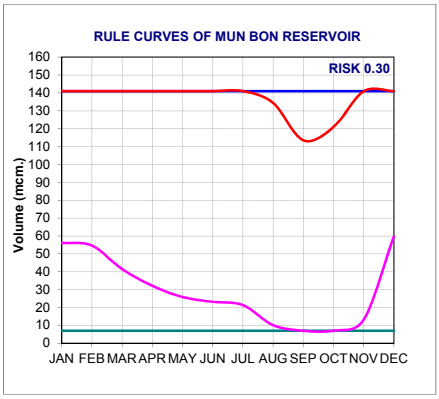
62


RULE CURVES OF MUN BON RESERVOIR
RISK 0.20
Volume (mcm.)
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC


RULE CURVES OF MUN BON RESERVOIR
RISK 0.20
Volume (mcm.)
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC

63


RULE CURVES OF MUN BON RESERVOIR
RISK 0.30
Volume (mcm.)
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC


RULE CURVES OF MUN BON RESERVOIR
RISK 0.30
Volume (mcm.)
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC

64

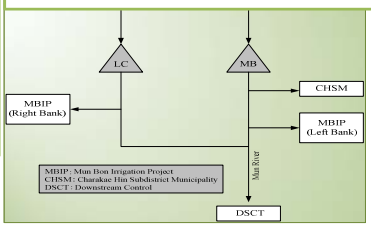
Development of Probability Based Rule Curves for Mun Bon and Lam Chae Reservoirs

อ่างเก็บน้ำมูลบนและลำแชะอยู่ในลุ่มน้ำมูลตอนบน

มีวัตถุประสงค์ในการเก็บกักน้ำเพื่อการชลประทาน อุปโภคบริโภค อุตสาหรรม บรรเทาน้ำท่วมและการรักษาระบบนิเวศวิทยาท้ายน้ำ

มูลบนมีขนาดความจุ = 141 mcm

ลำแชะมีขนาดความจุ = 275 mcm



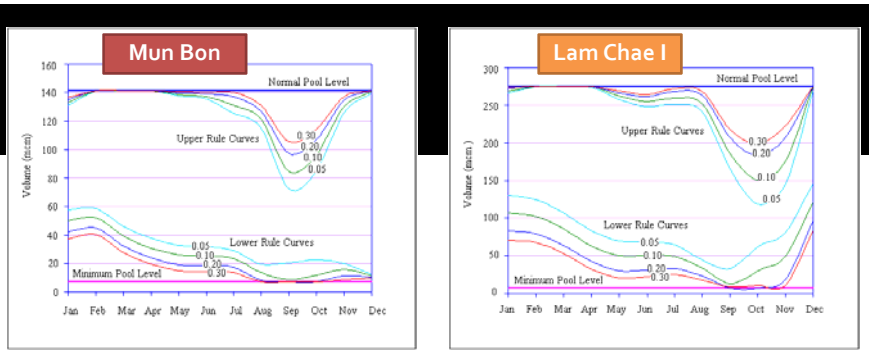
65

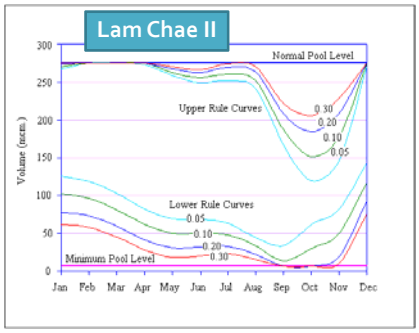
General information of Mun Bon and Lam Chae

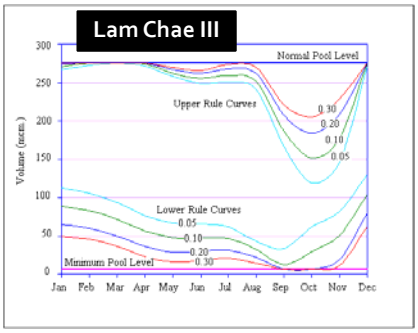
	Mun Bon reservoir	Lam Chae reservoir
1. Catchment area (km.^{2})	454	601
2. Capacity at the normal pool level (mcm.)	141	275
3. Capacity at the minimum pool level (mcm.)	7	7
4. Annual rainfall (mcm.)	9.98	18.29
5. Annual inflow (mcm.)	93.88	229.29

Reservoirs	Total irrigation area (rai)			
	Wet season		Dry season	
	Rice	Upland crop	Rice	Upland crop
1. Mun Bon reservoir	44,801	335	17,545	388
2. Lam Chae reservoir				
-Scenario 1(100%)	81,893	34,125	-	64,260
-Scenario 2(75%)	81,893	25,594	-	48,195
-Scenario 3(50%)	81,893	17,063	-	32,130

66







67

Proposed reservoir operating rules

Case 1 : If $V_{t+1} > V_{max}$

$SP_t = V_{t+1} - V_{max}$

$R_t = D_t + SP_t$

Case 2 : If $V_{URC} < V_{t+1} < V_{max}$

$$R_t = \frac{[V_{t+1} - V_{min}]}{[V_{URC} - V_{min}]} D_t$$

$$SUR_t = \{\frac{[V_{t+1} - V_{min}]}{[V_{URC} - V_{min}]} - 1\} D_t$$

Case 3 : If $V_{LRC} < V_{t+1} < V_{URC}$

$R_t = D_t$

Case 4 : If $V_{min} < V_{t+1} < V_{LRC}$

$$R_t = \frac{[V_{t+1} - V_{min}]}{[V_{LRC} - V_{min}]} D_t$$

$$DEF_t = \{1 - \frac{[V_{t+1} - V_{min}]}{[V_{LRC} - V_{min}]}\} D_t$$

Case 5 : If $V_{t+1} < V_{min}$

$R_t = 0$

$DEF_t = D_t$

68

Reservoir simulation result

(a) Mun Bon Reservoir

Operating Rules	Shortage (Months)	Spill (Months)	Σ(Shortage) (mcm.)	Σ(Shortage)²	Σ(Spill) (mcm.)	Σ(Spill)²
1. Probability Based Rule Curves						
-risk 0.05	29	56	172	1,851	1,307	45,358
-risk 0.10	25	68	169	1,899	1,393	48,875
-risk 0.20	23	69	167	1,914	1,454	51,649
-risk 0.30	23	73	166	1,914	1,486	53,185
2. Standard Operating Policy	16	74	163	1,971	1,528	55,442

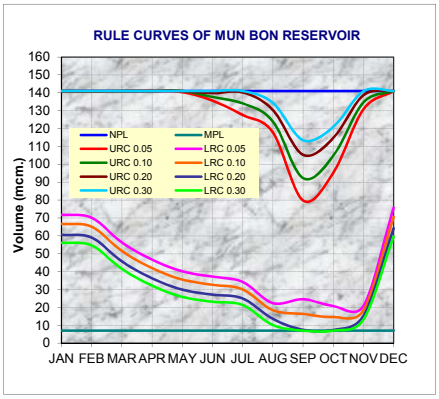
69

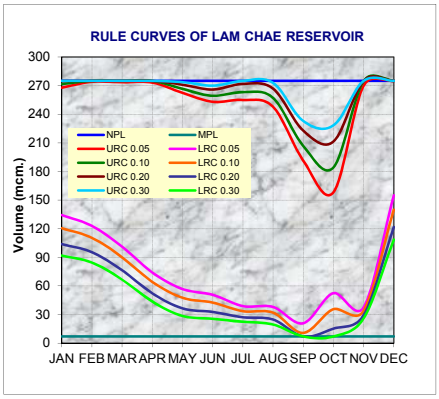
(b) Lam Chae Reservoir (Scenario 1)

Operating Rules	Shortage (Months)	Spill (Months)	Σ(Shortage) (mcm.)	Σ(Shortage)²	Σ(Spill) (mcm.)	Σ(Spill)²
1. Probability Based Rule Curves						
-risk 0.05	51	41	572	10,814	1,888	152,314
-risk 0.10	40	50	531	11,127	2,366	190,626
-risk 0.20	33	58	513	11,433	2,692	218,903
-risk 0.30	29	61	512	11,554	2,794	229,156
2. Standard Operating Policy	25	65	510	11,812	2,975	249,040

70

Revised study in 2005 using data 1952-2004 (53 years)





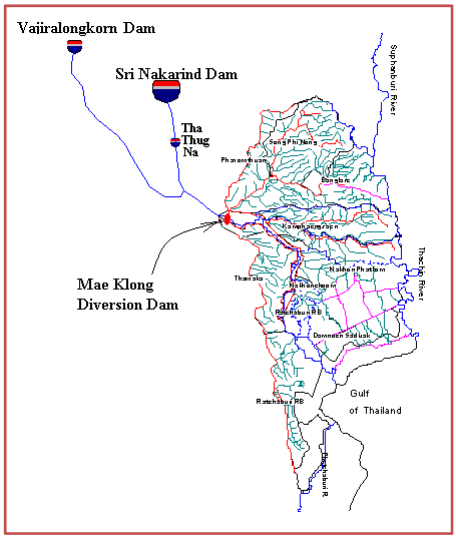
71

Vacancy-Minimum storage Requirements

Development of operation rule for multipurpose reservoirs to secure water supply in the Mae Klong river basin, Thailand (Satoh *et al*., 2003, Trans.of JSIDRE 228, p17-24)

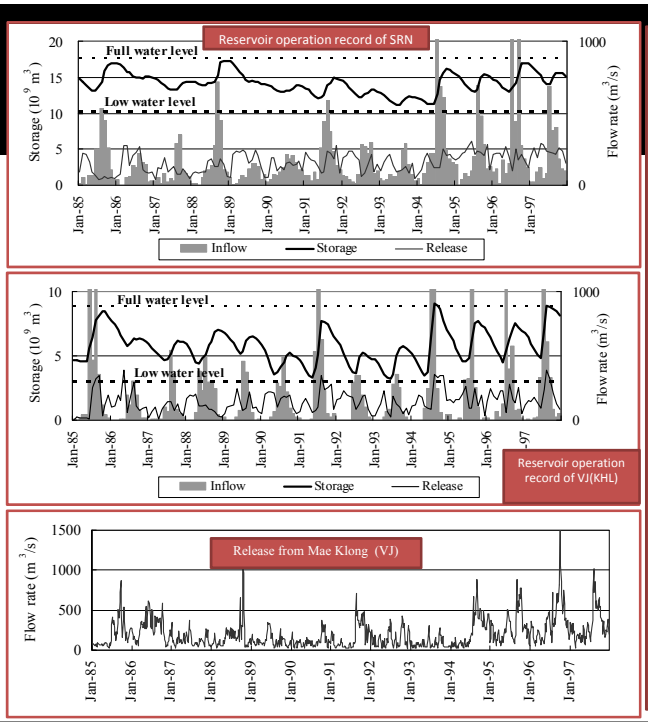
72

Development of operation rule for multipurpose reservoirs to secure water supply in the Mae Klong river basin, Thailand (Satoh *et al.*, 2003, Trans.of JSIDRE 228, p17-24)



	SRN	VJ(KHL)
Year completion	1980	1984
Catchment area(km³)	10,880	3,720
Normal high water level (m,MSL)	180	155
Storage at NHWL (mcm)	17,745	8,860
Effective srtorage (mcm)	7,4781	5,848
Annual average inflow (mcm)	4,457	5,161

73



ผลการศึกษาข้อมูลช่วง 1985-1997

- Inflow ในฤดูฝนมีความแปรปรวนสูงในแต่ละปี
- Flood ที่เขื่อนศรีนครินทร์และเขื่อนวชิราลงกรณ์มักเกิดในปีเดียวกัน แต่ไม่เสมอไป เนื่องจากพายุฝนสาเหตุมีความแตกต่างกัน
- ปริมาณน้ำในอ่างลดลงอย่างมาก ถ้าเกิดฝนน้อยสองปีติดต่อกัน
- ปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนแม่กลอง โดยทั่วไปมัก >50 cms ซึ่งเป็น minimum requirement เพื่อการป้องกันการลุกตัวน้ำเค็ม

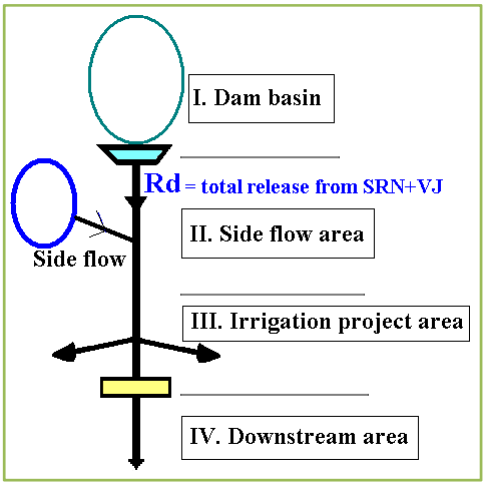
74

Savable Water(SW)

- ปริมาณการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำส่วนที่สามารถลดลงได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำด้านท้ายน้ำ
- มีความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคที่จะ Save ปริมาณน้ำส่วนนี้ไว้ ถ้าอ่างเก็บน้ำมีปริมาตรเพียงพอที่จะรองรับน้ำส่วนนี้

75

Modeling of Mae Klong river basin



Identification of savable water

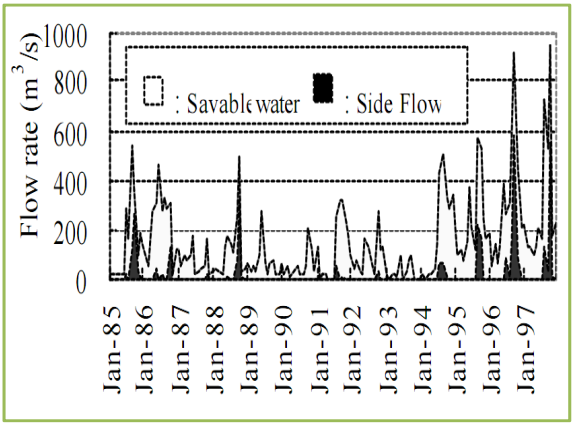
Svj=Rvj-50

SW=Min(Svj,Rd)

Where
Svj=surplus release from MK am(VJ)
Rvj=release from Mkdam(VJ)
Rd=total release from SKN+VJ(KHL)
SW=savable water
50= d/s minimum requirement
Note
Rd-SW=necessary release from reservoirs for water use sectors

76

Savable water and side flow in surplus release from MK dam(VJ)



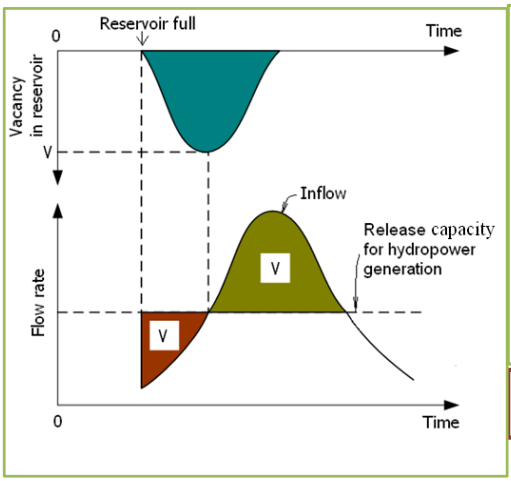
Origin of savable water (mcm)

Origin	Volume (mcm)	%
Side flow	8.9	14
Reservoir release	54.4	86
Total	63.6	100

77

Vacancy requirement

Upper storage line



ในช่วงฤดูน้ำหลาก Inflow > Release ปริมาตรน้ำส่วนเกิน (V=Inflow-Release)

ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้สูญเสียน้ำดังกล่าวโดยเปล่าประโยชน์ (Spillage) และอาจก่อให้เกิดน้ำท่วมพื้นที่ท้ายน้ำ จึงจำเป็นต้องระบายน้ำออกจากอ่างให้มีปริมาตรว่าง (Vacancy) เพื่อรองรับปริมาตรน้ำส่วนเกินดังกล่าว

Upper line = Normal pool level – Vacancy requirement

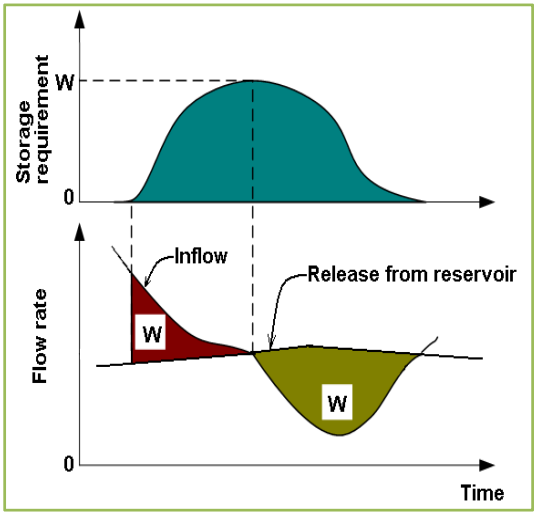
78

Vacancy requirement
Upper storage line

1) นำข้อมูลที่ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางสถิติแล้วมาคำนวณหาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำส่วนเกิน (Surplus Inflow) ซึ่งหาได้จากปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างทั้งหมด (Total Inflow) ลบด้วยปริมาณน้ำที่ปล่อยออกจากอ่างทั้งหมด (Total Release) โดยคำนวณเป็นค่ารายเดือน
2) คำนวณหาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างส่วนเกินสะสม (V)
3) คำนวณหาปริมาตรของอ่างที่จะต้องสำรองไว้ใช้เก็บกักน้ำที่ไหลเข้าอ่างส่วนเกิน โดยนำค่าจาก 2) ลบด้วยปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกักปกติของอ่างเก็บน้ำ
4) พล็อตค่าที่ได้จาก 3) จะได้ Upper storage line

79

Seasonal storage requirement
Lower storage line



ในช่วงฤดูแล้ง

Inflow < Release

W=Release-Inflow

เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดน้ำจึงจำเป็นต้องเก็บกักน้ำในอ่างอย่างน้อยเท่ากับ W ก่อนเข้าสู่ฤดูแล้ง

Lower line=Normal pool level +W

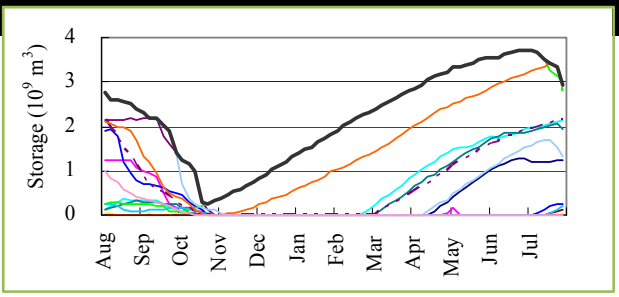
80

Seasonal storage requirement
Lower storage line

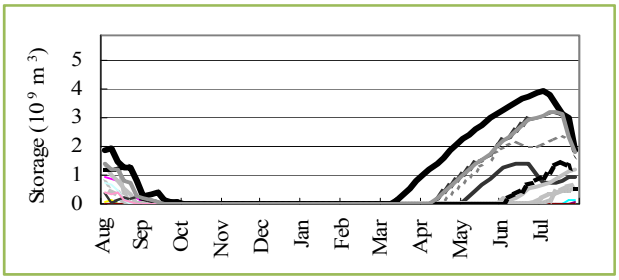
1) นำข้อมูลที่ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางสถิติแล้วมาคำนวณหาปริมาณน้ำที่ขาดโดยคิดจากปริมาณน้ำที่จำเป็นต้องปล่อยทั้งหมดลบด้วยปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างทั้งหมด โดยคำนวณเป็นค่ารายเดือนเช่นเดียวกับ Upper storage line
2) คำนวณหาปริมาณน้ำที่ขาดแคลนสะสม (W)
3) คำนวณหาปริมาณน้ำที่จำเป็นต้องสำรองก่อนเข้าช่วงฤดูแล้ง โดยนำค่าที่ได้จาก 2) บวกด้วยปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกักต่ำสุดของอ่างเก็บน้ำ
4) พล็อตค่าที่ได้จาก 3) จะได้ Lower storage line

81

Vacancy requirement



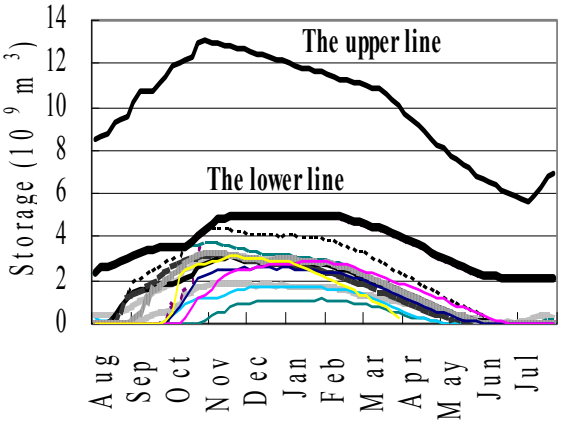
SRN



VJ(KHL)

82

Upper and lower lines for Mae Klong river system



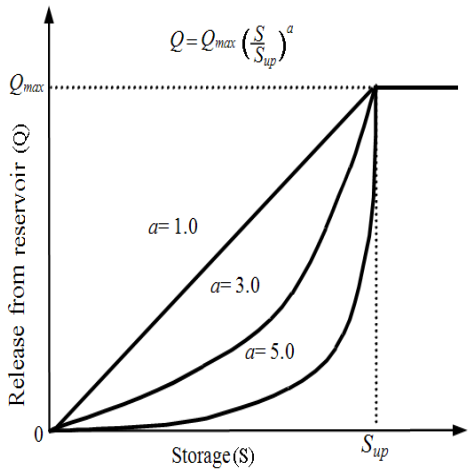
Release decision rule

1. St > Upper line
   - Max release
2. St < Lower line
   - Necessary release (NR) (minimum requirement for water use sectors)
3. LL<St<UL
   -Standard release

$$Q = Q_{max}\left(\frac{S}{S_{up}}\right)^{a}$$

83

Standard release rule

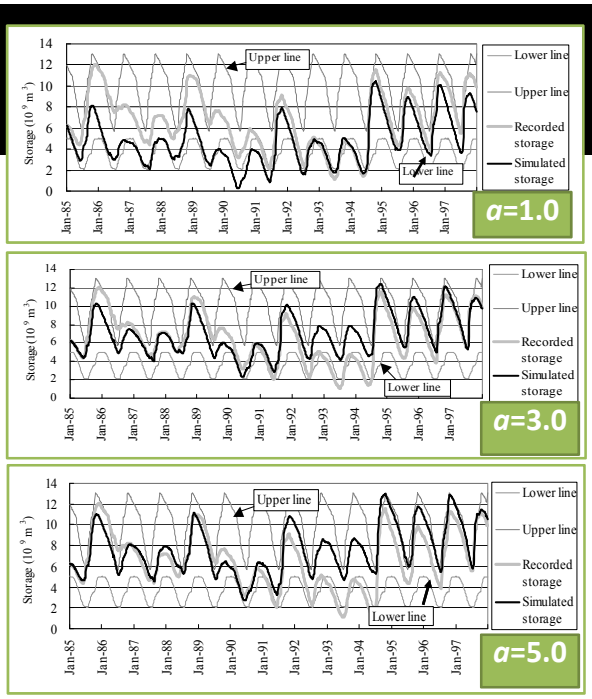


a=1.0, 3.0 and 5.0

เกณฑ์การปรับค่า Q

1. 2. ถ้า St<Lower line, ต้องลด Q=NR โดย Q ที่ระบายจาก SNR และ VJ ต้องลดลงด้วยอัตราส่วน (NR/Q)
2. ถ้า Q < NR, ให้เพิ่ม Q=NR โดย SNR และ VJ(KHL) ต้องจัดสรรน้ำเพิ่มตามสัดส่วนของ Qที่คำนวณได้

84



Simulation result
(Jan. 1985-Dec. 1997)

85

Table 3 Comparison of potential energy

	Recorded	Simulated		
		α=1.0	α=3.0	α=5.0
SRN	22.51	22.24	22.44	22.46
KHL	10.5	10.39	10.77	10.79
Total	33.01 (100.0)	32.63 (98.9)	33.21 (100.6)	33.25 (100.7)

Unit: 10^6 MWh,
Period: Jan. 1985 to Sep. 1997

$$\text{Potential energy (kWh)} = \frac{\text{Head(m) x Released volume(m3) x 9.81}}{3.6 \times 10^{-6}}$$

86

The End

87