

EKONOMI REHABILITASI DAERAH TANGKAPAN WADUK

(Rehabilitation Economic of Dam Catchment Area)

SUDARSONO SOEDOMO

Pengajar Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan IPB Bogor

ABSTRACT

Dynamic optimization approach is employed in this paper. Moreover, in this paper it is indicated that not all critical lands in the catchment areas of a dam need to be rehabilitated even though opportunity for the critical lands up to the end life of the dam is available. Budget allocation for rehabilitating catchment areas need to consider this factor to avoid inefficiency. Too large catchment areas can create an inefficiency. Location selection for developing a dam needs to take into account the costs of conservation and/or rehabilitation of catchment areas.

Keywords : catchment area, dam, critical land, rehabilitation, conservation

PENDAHULUAN

Wilayah tangkapan (*catchment area*) adalah suatu daerah yang mengumpulkan dan melepaskan aliran di bawah dan di atas permukaan. Sebagian besar air yang terkumpul dalam wilayah tangkapan dialirkan melalui saluran air atau sistem bawah tanah menuju ke titik yang lebih rendah seperti bendungan, lahan basah, mulut sungai dan lautan. Tulisan ini akan mendiskusikan wilayah tangkapan air yang terletak di atas bendungan, khususnya bendungan yang ditujukan untuk memproduksi tenaga listrik. Dalam tulisan ini, istilah waduk dan bendungan akan digunakan secara bergantian dengan makna yang sama.

Banyak bendungan air di Indonesia mengalami pendangkalan yang terlalu cepat dibandingkan dengan rencana. Penyebabnya adalah laju sedimentasi yang jauh di atas laju sedimentasi yang diperkirakan dalam perencanaan. Beberapa bendungan harus beroperasi jauh di bawah kapasitas yang direncanakan dengan akibat lanjutan pemadaman listrik secara bergantian. Peristiwa seperti ini semakin sering timbul dengan sebaran yang juga semakin meluas.

Fenomena pendangkalan bendungan yang terlalu cepat serta kebutuhan untuk mengendalikannya menunjukkan bahwa konservasi wilayah tangkapan sebenarnya mempunyai nilai yang selama ini diabaikan. Rehabilitasi wilayah tangkapan bendungan merupakan kebutuhan mendesak, khususnya untuk bendungan yang berskala besar. Namun masih timbul pertanyaan, berapa luas dari wilayah tersebut yang perlu direhabilitasi. Perlukah seluruh wilayah tangkapan direhabilitasi demi memperpanjang umur waduk?

Tulisan ini mendiskusikan rehabilitasi wilayah tangkapan bendungan untuk menjawab pertanyaan pokok apakah seluruh wilayah tangkapan harus direhabilitasi? Pertanyaan ini dapat dinyatakan dengan cara lain, kapan kita

harus menghentikan upaya rehabilitasi wilayah tangkapan yang ditujukan untuk menyelamatkan waduk? Jawaban terhadap pertanyaan ini dapat digunakan dalam merancang pembangunan bendungan di masa yang akan datang sehingga terjadi optimalisasi antara kapasitas waduk dan luas wilayah tangkapannya.

Luas wilayah tangkapan akan berpengaruh pada biaya perawatan atau konservasi wilayah tangkapan tersebut. Wilayah tangkapan yang berlebihan akan menghasilkan sedimentasi tambahan yang sebenarnya tidak perlu. Kelebihan air karena terlalu luasnya wilayah tangkapan dapat dibuang dengan mudah. Tidak demikian halnya dengan kelebihan sedimen. Barangkali, perbandingan antara luas wilayah tangkapan dan kapasitas waduk perlu dijadikan kriteria pemilihan lokasi pembangunan bendungan melengkapi kriteria waduk baik dan buruk yang dikemukakan oleh Ledec dan Quintero (2003).

Tulisan ini akan diorganisasi sebagai berikut. Setelah pendahuluan, seksi berikutnya adalah model rehabilitasi wilayah tangkapan. Seksi 3 mendiskusikan implikasi dari model. Seksi 4 membahas implikasi dari analisis model terhadap kebijakan publik. Seksi terakhir merupakan kesimpulan.

MODEL REHABILITASI WILAYAH TANGKAPAN

Pada waktu ke- t volume bendungan efektif adalah $v(t)$, tenaga listrik yang dihasilkan merupakan fungsi dari volume bendungan $w(v)$ ¹, harga listrik per unit adalah p , biaya konservasi per satuan luas daerah tangkapan adalah c , luas daerah tangkapan adalah $a(t)$ dan dianggap seluruhnya merupakan lahan kritis pada awal proyek. Biaya rehabilitasi dan harga listrik dianggap konstan dari waktu ke waktu. Laju rehabilitasi adalah $k(t)$ per unit waktu dan luas lahan yang

telah terehabilitasi adalah $b(t)$. Laju sedimentasi dianggap kombinasi linear kontribusi dari lahan yang terehabilitasi ($e_1 b(t)$) dan kontribusi dari lahan yang rusak ($e_2(a(t) - b(t))$), dimana e_1 dan e_2 masing-masing adalah laju sedimentasi dari lahan terehabilitasi dan lahan yang rusak dalam m^3 per hektar per tahun.

Tanpa program rehabilitasi, waduk akan terisi penuh dengan sedimen pada waktu T_0 :

$$T_0 = \frac{v}{e_2 a} \quad (1)$$

Net present value dari waduk tanpa rehabilitasi (π_0) adalah:

$$\pi_0 = \int_0^{T_0} e^{-rt} p w(v) dt \quad (2)$$

Apabila pengelola waduk mempertimbangkan apakah perlu merehabilitasi lahan wilayah tangkapan atau membiarkan lahan yang rusak apa adanya, maka pertimbangannya adalah apakah rehabilitasi lebih menguntungkan dibanding tanpa rehabilitasi wilayah tangkapan. Rehabilitasi lahan kritis wilayah tangkapan bertujuan untuk memaksimalkan *net present value* dari aliran keuntungan yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\max_{\{k(t)\}} \pi_1 = \int_0^T e^{-rt} [p w(v) - ck] dt \quad (3)$$

dengan kendala sebagai berikut:

$$v' = -e_1 b - e_2(a - b) \quad (4)$$

$$b = k \quad (5)$$

$$b(0) = 0, b(T) \leq a, v(T) = 0, T \text{ bebas}, k(t) \in [0, k] \quad (6)$$

Hamiltonian dari problem ini adalah :

$$H = [p w(v) - ck][e_1 b + e_2(a - b)] + \psi k \quad (7)$$

Syarat yang harus dipenuhi bagi maksimisasi *Hamiltonian* adalah :

$$-\frac{\partial H}{\partial v} + r\lambda = pgh + r\lambda = \dot{\lambda} \quad (8)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial b} + r\psi = \lambda[e_1 - e_2] + r\psi = \dot{\psi} \quad (9)$$

$$\lambda(t) = C_0 e^{rt} + \frac{pgh}{r} \quad (10)$$

¹ Dalam tulisan ini akan digunakan bentuk spesifik $w = vgh$, dimana g adalah gravitasi dan h adalah jarak dari muka air waduk ke turbin pembangkit tenaga. Bentuk ini adalah formula energi potensial dengan asumsi berat jenis air adalah 1.

Transversality condition $H(T) = 0$ (Chiang 1992). Demikian juga, pada titik terminal dimana volume waduk telah mencapai nol ($v(T) = 0$) tidak ada gunanya melakukan rehabilitasi lahan demi mempertahankan waduk. Dengan kata lain $k(T) = 0$. Karena $[e_1 b + e_2(a - b)] > 0$, maka $\lambda(T) = 0$. Oleh karena itu, nilai definitif bagi C_0 adalah:

$$C_0 = -e^{-rT} \left[\frac{pgh}{r} \right] \quad (11)$$

Untuk sembarang nilai t persamaan 10 menjadi

$$\lambda(t) = (1 - e^{r(t-T)}) \left[\frac{pgh}{r} \right] \quad (12)$$

Nilai T akan ditentukan kemudian (lihat persamaan 22). Karena kontribusi $k(t)$ terhadap *Hamiltonian* bersifat linear, maka untuk $t < T$ nilai $k(t)$ optimal adalah $k(t)^* = k$ jika $\psi(t) - c > 0$. Dengan diketahuinya $\lambda(t)$, maka $\psi(t)$ dapat ditentukan dengan hasil sebagai berikut :

$$\psi(t) = \frac{(e_2 - e_1)pgh}{r^2} + \frac{e^{r(t-T)}(e_2 - e_1)pgh}{r} + C_1 e^{rt} \quad (13)$$

Nilai definitif bagi C_1 ditentukan dengan menggunakan *transversality condition* serta kondisikondisi lainnya. Dengan $H(T) = 0$ sebagai *transversality condition* serta $k(T) = 0$, $v(T) = 0$ dan $\lambda(T) = 0$, maka dari *Hamiltonian* akan diperoleh :

$$\psi(T) = c \quad (14)$$

Dengan demikian nilai C_1 diperoleh sebesar :

$$C_1 = e^{-rT} \left[c - \frac{(e_2 - e_1)pgh}{r^2} - \frac{(e_2 - e_1)pghT}{r} \right] \quad (15)$$

Substitusi persamaan 15 ke dalam persamaan 13 diperoleh :

$$\psi(t) = c e^{r(t-T)} + (1 - e^{r(t-T)}) \frac{(e_2 - e_1)pgh}{r^2} + e^{r(t-T)} \frac{(e_2 - e_1)pgh(t-T)}{r} \quad (16)$$

Sama dengan persamaan 12, nilai T ditentukan kemudian seperti terlihat pada persamaan 22. Persamaan 16 hanya menjamin bahwa pada waktu T nilai $\psi(T)$ sama dengan c . Namun persamaan ini tidak menjamin bahwa sebelum waktu T nilai $\psi(t)$ tidak pernah mencapai c . Kapanpun $\psi(t) = c$ tercapai maka rehabilitasi wilayah tangkapan harus dihentikan. Hal ini mempunyai implikasi yang penting dalam menyusun program rehabilitasi wilayah tangkapan.

Mengingat laju luas rehabilitasi optimal adalah konstan pada k , maka dengan menggunakan persamaan 5 luas kumulatif areal yang direhabilitasi adalah :

$$b = kt \tag{17}$$

Jangka waktu rehabilitasi T_1 adalah luas lahan yang membutuhkan rehabilitasi dibagi dengan laju rehabilitasi yang konstant pada k :

$$T_1 = \frac{a}{k} \tag{18}$$

Dengan substitusi persamaan 17 dan penyusunan ulang, persamaan 4 menjadi

$$v' = [e_2 - e_1]kt - e_2a \tag{19}$$

Integrasi persamaan ini akan diperoleh:

$$v(t) = \frac{1}{2} [e_2 - e_1]kt^2 - e_2at + v_0 \tag{20}$$

Jangka waktu hingga waduk penuh, T , dapat diperoleh dengan setting $v(T) = 0$ dan mencari solusi bagi T sebagai berikut :

$$T = [k(e_2 - e_1)]^{-1} (ae_2 \pm \sqrt{a^2e_2^2 - 2(e_2 - e_1)kv_0}) \tag{21}$$

Di antara dua pilihan nilai T , tanda yang mana yang harus dipilih. Untuk memilih satu di antara dua kemungkinan tersebut, kita perlu melihat bila waduk sejak awal sudah penuh dengan sedimen, artinya $v_0 = 0$. Bila keadaan ini terjadi, maka tidak ada tindakan rehabilitasi yang perlu dilakukan. Dengan kata lain, T haruslah bernilai nol, yang berarti masa operasi waduk adalah nol. Hal ini hanya mungkin bila kita memilih :

$$T = [k(e_2 - e_1)]^{-1} \sqrt{ae_2 - \frac{2}{k} a^2 e_2 - 2(e_2 - e_1)kv_0} \tag{22}$$

Jangka waktu rehabilitasi lebih pendek dari jangka waktu penuhnya waduk dengan sedimentasi jika:

$$\frac{(e_1 + e_2)}{2k} a^2 \leq v_0 \tag{23}$$

Apabila persamaan 23 ini tidak terpenuhi, maka tidak seluruh daerah tangkapan waduk perlu direhabilitasi. Sebaliknya, apabila persamaan 23 ini terpenuhi, belum berarti bahwa seluruh wilayah tangkapan perlu direhabilitasi. Hal ini akan didiskusikan lebih lanjut pada bagian diskusi.

Volume waduk yang tersisa sesaat setelah seluruh daerah tangkapan terehabilitasi adalah :

$$v(t_1) = v_0 - e_2aT^{**} + \frac{1}{2} [e_2 + e_1] k(T^{**})^2 \tag{24}$$

Sisa umur waduk t_2 hingga seluruh volume waduk terisi endapan adalah :

$$t_2 = \frac{v(T^{**})}{e_2a - (e_2 - e_1)kT^{**}} \tag{25}$$

Dengan mendefinisikan bahwa $T_1 = T^{**}$ dan $T_2 = T_1 + t_2$, maka *net present value* (π_1) dari bendungan dengan program

rehabilitasi adalah:

$$\pi_1 = \int_0^{T_1} e^{-rt} [pw(v) - ck] dt + \int_{T_1}^{T_2} e^{-rt} [pw(v)] dt \tag{26}$$

Rehabilitasi layak dilakukan hanya bila:

$$\int_0^{T_0} e^{-rt} pw(v) dt \leq \int_0^{T_1} e^{-rt} [pw(v) - ck] dt + \int_{T_1}^{T_2} e^{-rt} [pw(v)] dt \tag{27}$$

Sebaliknya, bila persamaan ini tidak terpenuhi, rehabilitasi wilayah tangkapan bendungan tidak layak dilakukan.

DISKUSI

Bagian ini mendiskusikan implikasi dari model yang telah dibahas di muka, khususnya dalam menjawab pertanyaan apakah seluruh wilayah tangkapan harus direhabilitasi. Ada tiga peubah yang digunakan untuk menjawab pertanyaan ini, yaitu jangka waktu penuhnya waduk dengan bahan sedimen, jangka waktu rehabilitasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan seluruh wilayah tangkapan, dan jangka waktu tercapainya $\psi(t) = c$.

Seperti telah disinggung sebelumnya, bahwa rehabilitasi lahan sebesar k layak dilakukan jika $\psi(t) \geq c$. Jangka waktu hingga tercapainya $\psi(t) = c$, dicatat dengan T^{**} , dapat lebih pendek daripada jangka waktu penuhnya waduk dengan sedimentasi ataupun jangka waktu merehabilitasi seluruh wilayah tangkapan dengan laju k per tahun. Jadi ada dua kemungkinan dimana rehabilitasi tidak perlu dilakukan pada seluruh wilayah tangkapan, yakni bila $T^{**} < T_1$ atau bila persamaan 23 tidak terpenuhi. Diskusi selanjutnya akan dibatasi hanya pada kasus pertama, karena masih sulit dimengerti oleh kebanyakan orang.

Apabila $T^{**} < T_1$ rehabilitasi lebih lanjut tidak akan meningkatkan Hamiltonian, meskipun masih tersedia lahan di wilayah tangkapan yang belum terehabilitasi dan umur waduk masih cukup panjang. Artinya, melanjutkan rehabilitasi wilayah tangkapan tidak akan meningkatkan *net present value* keuntungan yang diterima oleh pengelola bendungan. Hal ini tidak berarti bahwa rehabilitasi lanjutan terhadap wilayah tangkapan yang belum terehabilitasi tidak bermanfaat bagi pengelola bendungan dan lingkungan secara umum.

Rehabilitasi lanjutan dapat saja dilanjutkan dan berdampak positif pada keuntungan bendungan selama $\psi(t)$ lebih besar dari biaya rehabilitasi yang harus ditanggung oleh pengelola bendungan, c . Bila rehabilitasi lanjutan tersebut dibiayai, sebagian atau seluruhnya, dengan anggaran pemerintah maka rehabilitasi lanjutan akan meningkatkan *net present value* keuntungan pengelola bendungan. Apabila rehabilitasi lanjutan ini dilakukan dengan bantuan anggaran

pemerintah, maka inefisiensi terjadi pada penggunaan anggaran pemerintah tersebut. Publik harus menyadari bahwa rehabilitasi akan memperbaiki lingkungan, tetapi rehabilitasi juga membutuhkan biaya.

IMPLIKASI BAGI KEBIJAKAN PUBLIK

Beberapa implikasi bagi kebijakan publik perlu diangkat. Pertama, pengelola bendungan perlu ikut menanggung biaya konservasi dan/atau rehabilitasi wilayah tangkapan. Kedua, bila rehabilitasi perlu dan layak dilakukan, maka hendaknya rehabilitasi dilakukan dengan laju yang tinggi. Hal ini berimplikasi pada atau ditentukan oleh anggaran yang tersedia. Ketiga, untuk menekan biaya konservasi dan/atau rehabilitasi, luas wilayah tangkapan hendaknya tidak berlebihan diukur dari kebutuhan untuk mencapai kapasitas waduk yang direncanakan. Hal ini berimplikasi pada pemilihan lokasi pembangunan bendungan.

Apabila wilayah tangkapan masih dalam keadaan baik, pengelola bendungan tidak perlu mengeluarkan biaya rehabilitasi. Jasa konservasi yang disediakan oleh wilayah tangkapan ini menjadi kurang disadari. Jasa wilayah tangkapan ini perlu mendapat penghargaan yang sepadan atas jasa konservasi yang telah dilakukan. Jasa ini harus dibayar oleh pengelola bendungan sebagai pihak yang telah menikmati jasa tersebut. Hal ini menjadi lebih jelas bila wilayah tangkapan tersebut dalam keadaan rusak atau kritis sehingga memberikan tingkat sedimentasi yang sangat tinggi. Dalam keadaan seperti ini, pengelola bendungan lebih mudah melihat dan merasakan perlunya wilayah tangkapan yang baik.

Rehabilitasi hendaknya dilakukan secepat mungkin. Hal ini implikasi dari penurunan nilai $\psi(t)$ dengan waktu sebelum akhirnya menyamai biaya satuan rehabilitasi sebesar c . Apabila dana dan sumberdaya lain tersedia, rehabilitasi hendaknya dapat dituntaskan dalam jangka waktu T^{**} , yakni pada saat $\psi(t) = c$. Rehabilitasi wilayah tangkapan setelah T^{**} hingga waduk berhenti beroperasi

akan menimbulkan inefisiensi, yakni manfaat rehabilitasi lebih kecil dari biayanya.

Pemilihan lokasi pembangunan bendungan perlu mempertimbangkan optimisasi luas wilayah tangkapan dan kapasitas bendungan. Wilayah tangkapan yang terlalu luas akan menyebabkan biaya konservasi dan/atau rehabilitasi menjadi sangat tinggi. Sedimentasi dari wilayah yang sebenarnya tidak memberikan kontribusi apapun terhadap supply air ke dalam waduk akan ikut memperpendek umur waduk tanpa memberi sumbangan pada terjadinya tenaga listrik.

KESIMPULAN DAN SARAN

Model rehabilitasi wilayah tangkapan yang dikembangkan dalam tulisan ini menunjukkan bahwa rehabilitasi tidak harus dilakukan di seluruh wilayah tangkapan. Rehabilitasi yang berlebihan dapat menimbulkan inefisiensi. Publik harus menyadari bahwa rehabilitasi dapat memperpanjang umur waduk. Tetapi rehabilitasi juga menimbulkan biaya yang belum tentu lebih kecil dari manfaat yang diperoleh.

Jasa konservasi wilayah tangkapan masih kurang disadari. Dalam membangun bendungan di masa mendatang perlu dibandingkan dua pilihan. Pertama, rehabilitasi wilayah tangkapan dahulu baru membangun bendungan. Kedua, rehabilitasi wilayah tangkapan dilakukan bersamaan dengan beroperasinya bendungan.

PUSTAKA

- Chiang, Alpha C., *Elements of Dynamic Optimization*, McGraw Hill, Inc, New York, NY, 1992.
- Ledec, George dan Jaun David Quintero. 2004. "Good Dams and Bad Dams: Environmental Criteria for Site Selection of Hydroelectric Projects," World Bank Working Paper (16): 20pp.