

Model Matematik Numeris Bendung Karet
Pencegah Intrusi Air Laut di Sungai
Wonokromo, Surabaya

disampaikan pada

SEMINAR PERAN MODEL MATEMATIK
DALAM MITIGASI BENCANA ALAM
Yogyakarta, 30 September 2002



oleh
Ir. Djoko Luknanto, M.Sc., Ph.D.
Dosen dan Peneliti

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA
2002

Model Matematik Numeris Bendung Karet Pencegah Intrusi Air Laut

Djoko Luknanto¹

INTISARI

Penggunaan bendung karet untuk pemanfaatan sumberdaya air secara optimum telah dilakukan di berbagai daerah baik di dalam maupun di luar negeri. Fungsi utama bendung karet adalah pemanfaatan alur sungai sebagai tandon air memanjang pada musim kemarau tanpa menyebabkan dampak banjir di musim hujan. Hal ini tercapai karena pada musim kemarau bendung karet dikembangkan dan pada musim hujan dikempiskan. Jika bendung karet tersebut terletak di daerah pesisir yang terpengaruh oleh intrusi air laut yang asin, maka fungsi bendung karet bertambah yaitu sebagai pencegah masuknya air asin ke hulu.

Dalam perancangan hidraulika bendung karet, salah satu aspek penting adalah penentuan elevasi kontrol yaitu elevasi maksimum muka air sungai saat bendung karet harus mulai dikempiskan dan elevasi minimum muka air sungai saat bendung karet harus mulai dikembangkan. Elevasi kontrol maksimum harus ditentukan dengan pertimbangan bahwa pada banjir rancangan, elevasi maksimum muka air banjir di sepanjang sungai tidak boleh limpas tanggul. Sedangkan elevasi kontrol minimum harus ditentukan dengan pertimbangan bahwa bendung karet tidak boleh dikembangkan terlalu dini agar tidak terjadi kembang-kempis terlalu sering karena dapat merusak bendung karet tersebut.

Model numerik yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang untuk mampu mensimulasikan penentuan elevasi kontrol. Model ini didasarkan pada prinsip aliran nir-tunak (unsteady flow) sehingga dapat mensimulasikan hidrodinamika aliran sepanjang sungai. Kondisi bendung karet di lapangan yang dapat disimulasikan oleh model antara lain: koefisien debit, elevasi mercu, lebar mercu saat kembang, elevasi mercu, lebar mercu saat kempis, kisaran-waktu kembang dan kisaran-waktu kempis. Kondisi batas hulu dan hilir dapat pula disesuaikan dengan kondisi alam misalkan debit banjir di hulu, elevasi muka air pasang surut di hilir. Simulasi dengan menggunakan model ini untuk berbagai nilai elevasi kontrol akan memberikan gambaran keadaan muka air selama bendung karet beroperasi, sehingga dapat ditentukan elevasi kontrol yang paling tepat. Model ini dapat pula mensimulasikan bangunan pengambilan berupa ambang bebas, pompa, dan pengambilan dengan debit konstan.

Model bendung karet ini mampu mensimulasikan bendung karet selama operasi baik dalam keadaan banjir maupun pada saat musim kemarau, sehingga berguna untuk memandu perancangan bendung karet baik dari aspek perancangan fisik maupun pada saat operasi.

¹ Ir. Djoko Luknanto, M.Sc., Ph.D., pengajar di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UGM

1. PENDAHULUAN

Di Indonesia banyak terdapat sumberdaya air, baik yang berupa air tanah, sungai maupun laut. Banyak tantangan yang harus dihadapi dalam pengelolaan sumber daya air di atas. Diantara tantangan tersebut adalah penyediaan air baku dan irigasi di musim kemarau. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah penggunaan bendung karet. Keuntungan dalam penggunaan bendung karet ini adalah (1) pada musim kemarau, bendung karet dapat dikembangkan, sehingga air yang masih berlebih di awal musim kemarau dapat ditampung sepanjang alur sungai di sebelah hulu bendung karet, (2) pada musim hujan, bendung karet dikempiskan untuk menghindari muka air banjir melimpas tanggul.

Melihat keuntungan-keuntungan bendung karet di atas, maka sangat menguntungkan bila dapat dibuat suatu model matematis yang mampu memodelkan karakteristik hidraulik bendung karet. Penelitian ini berusaha untuk memenuhi maksud tersebut, agar model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alat bantu perancangan dan operasi bendung karet di lapangan.

2. PERSAMAAN DASAR DAN PERSAMAAN KERJA

Memodelkan *bangunan hidraulika* di sepanjang sungai alami, dalam kerangka pemodelan matematik aliran nir-tunak satu dimensi, merupakan bagian kecil dari seluruh pemodelan. Walaupun merupakan bagian kecil, namun pada bendung karet, yang merupakan keluarga besar bangunan silang sungai, mempunyai tantangan tersendiri. Tantangan terjadi pada saat bangunan silang tersebut sama sekali tidak mengalirkan debit air dari hulu ke hilir bangunan silang terkait. Hal ini sangat umum terjadi di lapangan, sebagai contoh adalah pada saat musim kemarau. Pada saat air tandon di hulu bangunan mulai dimanfaatkan, sehingga tidak ada air yang melimpas melalui bangunan silang. Tantangan ini akan diselesaikan secara tepat dan dijelaskan pada subbab-subbab berikut.

2.1. Persamaan dasar aliran nir-tunak satu dimensi

Pada sungai alami, untuk pemodelan matematik aliran nir-tunak satu dimensi dapat digunakan hukum konservasi massa dan momentum (-----, 1975, Abbot, 1979, Cunge et al., 1980) yang disajikan urut dalam persamaan berikut.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_{lateral} \quad (1)$$

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{suku 1}} + \underbrace{2\alpha \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x}}_{\text{suku 2}} - \underbrace{\alpha \left[\frac{Q}{A} \right]^2 \frac{\partial A}{\partial x}}_{\text{suku 3}} + \underbrace{gA \frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{suku 4}} + \underbrace{gA S_f}_{\text{suku 5}} = 0 \quad (2)$$

dengan Q adalah debit aliran (m^3/detik), x adalah jarak memanjang sungai, A adalah luas tampang basah (m^2), t menunjukkan waktu dalam detik, dan q_{lateral} adalah debit lateral dari samping kiri dan kanan sungai ($\text{m}^3/\text{detik}/\text{m}$), α adalah koefisien koreksi kecepatan rerata tampang basah (= koefisien Coriolis), g adalah percepatan gravitasi (m/detik^2), S_f adalah kemiringan garis energi, y adalah elevasi muka air (m).

2.2. Metoda numerik yang digunakan

Metoda numerik yang akan digunakan adalah metoda beda hingga, karena telah terbukti berhasil dilaksanakan dalam dunia industri sumberdaya air untuk memodelkan hidrodinamika aliran tak tunak. Dengan alasan yang sama skema numerik yang digunakan adalah skema empat titik Preissmann (Usseglio-Polatera et al., 1988).

2.3. Skema empat titik Preissmann nir-iterasi

Prinsip-prinsip skema empat titik Preissmann tanpa iterasi akan diformulasikan dalam paragraf berikut ini. Definisi nir-iterasi transformasi suatu fungsi dirumuskan sebagai (Holly et al., 1977, Sauvaget, 1982):

$$f_i^{n+1} = f_i^n + \Delta f_i \quad \Rightarrow \quad \Delta f_i = f_i^{n+1} - f_i^n \quad (3)$$

dengan f mewakili sembarang variabel misalkan Q , y , A di titik-titik hitungan sepanjang sungai. Subskrip i menunjukkan lokasi titik-titik hitungan dan superskrip menunjukkan waktu dengan n untuk waktu yang telah lalu dan $n+1$ untuk waktu sekarang.

Dengan cara ini, maka variabel yang akan dihitung yaitu f_i^{n+1} ditransformasikan menjadi Δf , sedangkan f_i^n merupakan variabel yang telah diketahui dari hitungan sebelumnya.

Untuk menghitung nilai suatu variabel di titik-titik hitung sepanjang sungai, Preissmann menggunakan empat buah titik untuk menghitung setiap suku pembentuk persamaan dasar aliran tak tunak di sungai.

$$\begin{aligned}
f(x, t) &= \frac{\theta}{2}(f_i^{n+1} + f_{i+1}^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2}(f_i^n + f_{i+1}^n) \\
&= \frac{\theta}{2}(\Delta f_i + \Delta f_{i+1}) + \frac{1}{2}(f_i^n + f_{i+1}^n) \\
\frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{1}{2\Delta t}(f_{i+1}^{n+1} - f_{i+1}^n) + \frac{1}{2\Delta t}(f_i^{n+1} - f_i^n) \\
&= \frac{1}{2\Delta t} \Delta f_{i+1} + \frac{1}{2\Delta t} \Delta f_i \\
\frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{\theta}{\Delta x}(f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}) + \frac{1-\theta}{\Delta x}(f_{i+1}^n - f_i^n) \\
&= \frac{\theta}{\Delta x}(\Delta f_{i+1} - \Delta f_i) + \frac{1}{\Delta x}(f_{i+1}^n - f_i^n)
\end{aligned} \tag{4}$$

dengan $0 \leq \theta \leq 1$ disebut dengan faktor pemberat waktu ($\theta = 1$ untuk skema implisit, sedangkan $\theta = 0$ untuk skema eksplisit).

2.4. Persamaan kerja

Apabila skema empat titik Preissmann, Pers.(3) dan (4) di atas, di substitusikan kedalam kedua persamaan dasar, Pers.(1) dan (2), akan menghasilkan persamaan kerja berupa satu sistem persamaan linier berikut ini (Cunge et al., 1980, Djoko Luknanto, 1992a, 1992b, 1993a, 1993b).

$$A \Delta y_{i+1} + B \Delta Q_{i+1} = C \Delta y_i + D \Delta Q_i + G \tag{5}$$

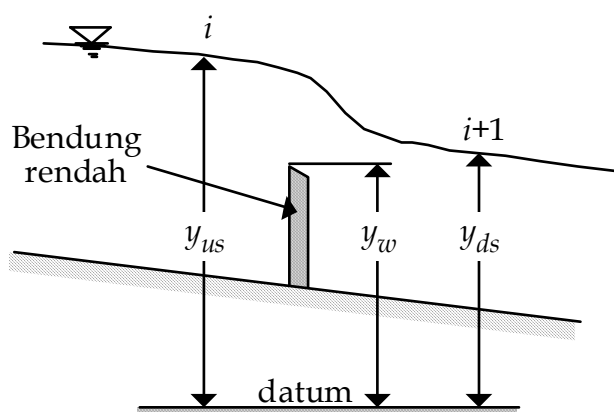
$$AA \Delta y_{i+1} + BB \Delta Q_{i+1} = CC \Delta y_i + DD \Delta Q_i + GG \tag{6}$$

dengan $i = 1, 2, \dots, N-1$, N adalah jumlah titik hitung. Nilai koefisien A, B, C, D, G dan AA, BB, CC, DD, GG diperoleh dari substitusi Pers.(3) dan (4) kedalam kedua persamaan dasar, Pers.(1) dan (2).

2.5. Persamaan dasar bendung karet

Persamaan dasar bendung karet secara konseptual tidak berbeda dengan persamaan dasar bendung tetap. Perbedaannya adalah pada bendung karet, parameter hidraulisnya (elevasi mercu, lebar mercu, koefisien debit) dapat berubah-ubah tergantung keadaan, sedangkan pada bendung tetap, parameter tersebut konstan.

Secara skematik bendung karet dapat dikonsepsualisasikan sebagai bendung rendah melintang sungai seperti dalam Gambar 1. Debit yang melalui bendung rendah ini dapat diformulasikan kedalam beberapa rumus debit, tergantung dari karakteristik hidraulis aliran yang terjadi di hilir bendung.



Gambar 1. Skema Bendung Rendah

2.5.1. Bendung dengan arus bebas

Arus bebas terjadi jika: $y_{ds} - y_w \leq \frac{2}{3} (y_{us} - y_w)$ (7)

$$Q = C_d B \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g} (y_{us} - y_w)^{1.5} \quad (8)$$

2.5.2. Bendung dengan arus menyelam

Arus menyelam terjadi jika: $y_{ds} - y_w > \frac{2}{3} (y_{us} - y_w)$ (9)

$$Q = C_d B \sqrt{2g} (y_{us} - y_{ds})^{0.5} (y_{ds} - y_w) \quad (10)$$

dengan Q adalah debit limpas mercu (m^3/detik), C_d adalah koefisien debit, B adalah lebar mercu (m), g adalah percepatan gravitasi (m/detik^2), y_{us} adalah elevasi muka air hulu mercu ($+\text{m}$), y_{ds} adalah elevasi muka air hilir mercu ($+\text{m}$), y_w adalah elevasi mercu bendung ($+\text{m}$).

Persamaan dasar lain yang dibutuhkan untuk melengkapi penyelesaian aliran air limpas mercu bendung adalah persamaan konservasi massa

$$Q_i^{n+1} = Q_{i+1}^{n+1} \text{ atau } Q_i^n + \Delta Q_i = Q_{i+1}^n + \Delta Q_{i+1} \quad (11)$$

2.6. Persamaan kerja pada bendung

Agar dapat diselesaikan secara numerik, maka persamaan bendung, Pers.(8) dan (10), harus ditransformasikan dengan deret Taylor sehingga menjadi

$$Q^n + \Delta Q = f(y_{us}^n, y_{ds}^n) + \left. \frac{\partial f}{\partial y_{us}} \right|^n \Delta y_{us} + \left. \frac{\partial f}{\partial y_{ds}} \right|^n \Delta y_{ds} \quad (12)$$

dengan sedikit manipulasi aljabar, Pers.(12) dapat ditransformasikan menjadi bentuk persamaan kerja umum, Pers.(5) dan (6).

2.7. Penyelesaian persamaan kerja

Persamaan kerja, Pers.(5) dan (6), berlaku untuk titik-titik hitung $i = 1, \dots, N-1$, sedangkan 'variabel tak diketahui' adalah Δy_i dan ΔQ_i untuk $i = 1, \dots, N$. Dengan demikian terdapat $2N$ variabel tak diketahui dengan $2(N-1) = 2N-2$ persamaan, sehingga untuk menyelesaikan sistem persamaan linier, Pers.(5) dan (6), masih dibutuhkan tambahan dua persamaan. Dua persamaan tambahan tersebut didapat dari dua kondisi batas hulu dan hilir.

Untuk memulai hitungan dibutuhkan pula kondisi awal berupa y_i dan Q_i untuk $i = 1, \dots, N$.

Sistem persamaan linier di atas dapat diselesaikan dengan sembarang 'linear solver' karena bentuknya secara umum dapat ditulis sebagai

$$[A]\{\Delta\} = \{B\} \quad (13)$$

Walaupun Pers.(13) dapat diselesaikan secara umum, namun karena bentuk khusus dari persamaan ini, maka digunakan algoritma sapuan ganda, yang telah terbukti efisien (Cunge, et al., 1980).

2.7.1. Algoritma Sapuan Ganda

Untuk menjelaskan secara rinci, algoritma sapuan ganda adalah tidak mungkin karena terbatasnya waktu. Dalam paragraf ini hanya akan disajikan fungsi-fungsi transformasi yang memungkinkan Pers.(13) dapat diselesaikan dengan algoritma sapuan ganda secara efisien.

Koreksi elevasi muka air (= Δy_i) diperoleh dari eliminasi ΔQ_i (= koreksi debit) dari Pers.(5) dan (6), sehingga diperoleh:

$$\Delta y_i = L_i \Delta y_{i+1} + M_i \Delta Q_{i+1} + N_i \quad (14)$$

kemudian diajukan suatu korelasi antara koreksi debit dan muka air sebagai berikut

$$\Delta Q_i = E_i \Delta y_i + F_i \quad (15)$$

substitusi Pers.(14) dan (15) kedalam Pers.(5) akan menghasilkan korelasi rekursif

$$\Delta Q_{i+1} = E_{i+1} \Delta y_{i+1} + F_{i+1} \quad (16)$$

dengan
$$E_{i+1} = \frac{L_i(C + D E_i) - A}{B - M_i(C + D E_i)} \quad (17)$$

$$F_{i+1} = \frac{N_i(C + D E_i) + D F_i + A}{B - M_i(C + D E_i)} \quad (18)$$

$$L_i = \frac{A(DD) - (AA)D}{C(DD) - (CC)D} \quad (19)$$

$$M_i = \frac{B(DD) - (BB)D}{C(DD) - (CC)D} \quad (20)$$

$$N_i = \frac{D(GG) - (DD)G}{C(DD) - (CC)D} \quad (21)$$

Pers.(14) s.d. (21) inilah yang digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan linier, Pers.(13). Untuk memudahkan acuan selanjutnya maka E , F , L , M , N disebut dengan koefisien pengaruh.

3. PEMBUATAN MODEL MATEMATIKA

Persamaan kerja, Pers.(5) dan (6), yang dinyatakan dalam sistem persamaan linier, Pers. (13), merupakan formulasi dasar untuk mengembangkan model aliran nir-tunak satu dimensi. Algoritma sapuan ganda yang digunakan untuk menyelesaikan Pers. (13), ditulis dengan menggunakan FORTRAN 90.

3.1. Masalah yang timbul

Masalah akan timbul dalam pemodelan bendung karet yaitu bila tidak terdapat debit yang melimpas mercu bendung. Hal ini wajar dalam model matematika, karena pada saat tersebut tidak terdapat persamaan matematika yang dapat digunakan sebagai "penghubung" antara titik di hulu dan hilir bendung.

Satu pemecahan masalah yang umum ditempuh adalah membagi domain hitungan menjadi dua yaitu (1) domain hitungan sebelah hulu dan (2) domain hitungan sebelah hilir bendung karet. Jika hal ini ditempuh, pada setiap saat debit yang limpas mercu bendung menjadi nol, maka akan terjadi pergantian topologi sungai. Hal ini akan menyebabkan kesulitan-kesulitan numerik dan manajemen data, yang menjadikan penyelesaian semacam ini menjadi tidak efisien.

3.2. Penyelesaian masalah

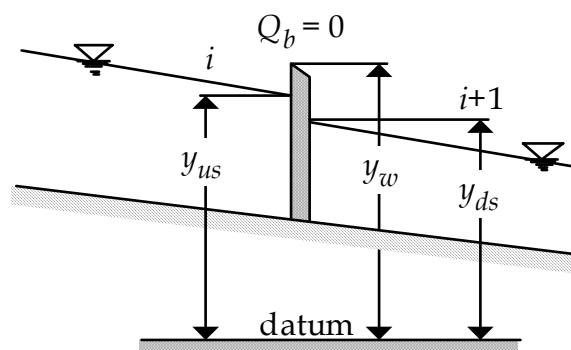
Agar penyelesaian masalah ini tetap efisien, maka topologi sungai tidak diubah, sehingga sistem persamaan linier, Pers.(13), yang digunakan semula tetap dapat diberlakukan pada setiap keadaan, baik pada saat air melimpas mercu bendung maupun tidak.

Kunci keberhasilan dari cara yang ditempuh ini adalah memperlakukan bendung karet sebagai kondisi batas hulu sekaligus hilir yang ditransformasikan secara tepat pada koreksi debit maupun elevasi muka air serta pada koefisien-koefisien pengaruh, Pers. (14) s.d. (21).

Agar lebih jelas, pemutusan topologi yang digunakan pada saat bendung tidak melimpaskan air disajikan dalam Gambar 2.

Dalam Gambar 2 tampak bahwa antara elevasi muka hulu (y_i) dan hilir (y_{i+1}) tidak mempunyai korelasi, demikian pula korelasi kedua elevasi muka air tersebut dengan debit bendung (Q_b). Oleh karena itu, korelasi yang terdapat antara muka air hulu dan hilir seperti tampak dalam Pers.(14) harus "diputus" diganti dengan persamaan "kondisi batas hilir semu." Cara ini akan menghasilkan persamaan yang sederhana, namun sangat tepat guna.

$$L_i = 0, M_i = 0 \text{ dan } N_i = \frac{-Q_i^n - F_i}{E_i} \quad (22)$$



Gambar 2. Pemutusan topologi pada bendung karet

Sedangkan untuk titik hilir bendung hanya diperlukan inialisasi nilai koefisien pengaruh, sebagaimana dilakukan untuk kondisi batas hulu. Inialisasi tersebut dilakukan pada Pers.(16), dengan cara ini memberikan nilai-nilai sebagai berikut:

$$E_{i+1} = 0 \text{ dan } F_{i+1} = -Q_{i+1}^n \quad (23)$$

Kedua persamaan, Pers.(22) dan (23) inilah yang menjadikan algoritma sapuan ganda tetap dapat diberlakukan, walaupun terdapat pemutusan topologi, tepat di lokasi bendung karet.

4. APLIKASI MODEL DI SUNGAI WONOKROMO, SURABAYA

Model yang dibangun ini, diaplikasikan di Sungai Wonokromo, disebelah hilir pintu air Jagir. Penggal Sungai Wonokromo yang dimodelkan adalah sepanjang 9.8 km sebelah hilir pintu air Jagir. Titik paling hulu adalah pintu air

Jagir dan titik paling hilir sekitar 2 km dari laut. Data yang dibutuhkan dalam simulasi hidraulika bendung karet adalah

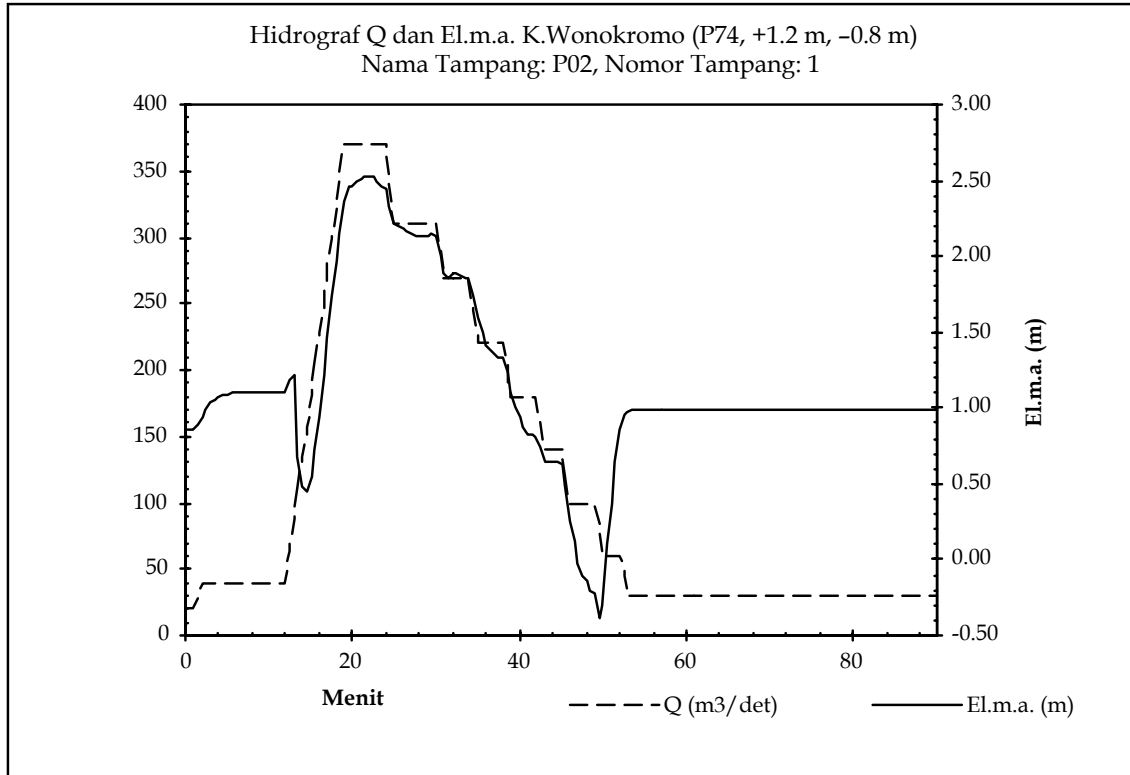
1. Debit rancangan yang keluar dari pintu air Jagir sebagai kondisi batas hulu,
2. Pasang surut rancangan di Selat Madura sebagai kondisi batas hilir,
3. Tampang lintang dan panjang Sungai Wonokromo sepanjang 9.8 km,
4. Kekasaran dasar sungai,
5. Karakteristik bendung karet yang dirancang: (a) data saat kembang: elevasi mercu +0.431 m, koefisien debit 0.8, lebar mercu 54.70 m, (b) data saat Kempis: elevasi mercu -3.169 m, koefisien debit 0.8, lebar mercu 44.11 m

Untuk dapat menentukan elevasi kontrol bendung karet yang optimum, dilakukan puluhan kali simulasi, baik untuk mencoba beberapa alternatif dari lokasi bendung karet maupun untuk melakukan simulasi terhadap elevasi kontrol itu sendiri. Tidak setiap alternatif akan disajikan dalam makalah ini, hanya beberapa saja akan disajikan sebagai gambaran keberhasilan model bendung karet yang dibangun ini.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada subbab ini disajikan hasil simulasi bendung karet di Sungai Wonokromo, untuk alternatif akhir yaitu sumbu bendung karet terletak 7.2 km dari pintu air Jagir. Tampang lintang Sungai Wonokromo pada lokasi tersebut di beri kode P74. Setelah dilakukan simulasi sampai puluhan kali, maka diperoleh bahwa (1) elevasi kontrol maksimum (yaitu elevasi muka air maksimum di hulu mercu bendung karet pada saat bendung karet harus dikempiskan) adalah +1.2 m, dan (2) elevasi kontrol minimum (yaitu elevasi muka air minimum di hulu mercu bendung karet pada saat bendung karet harus dikembangkan) adalah -0.8 m. Dalam Gambar 3, disajikan hasil simulasi aliran air di pintu air Jagir atau tepatnya 50 m di hilir pintu Jagir.

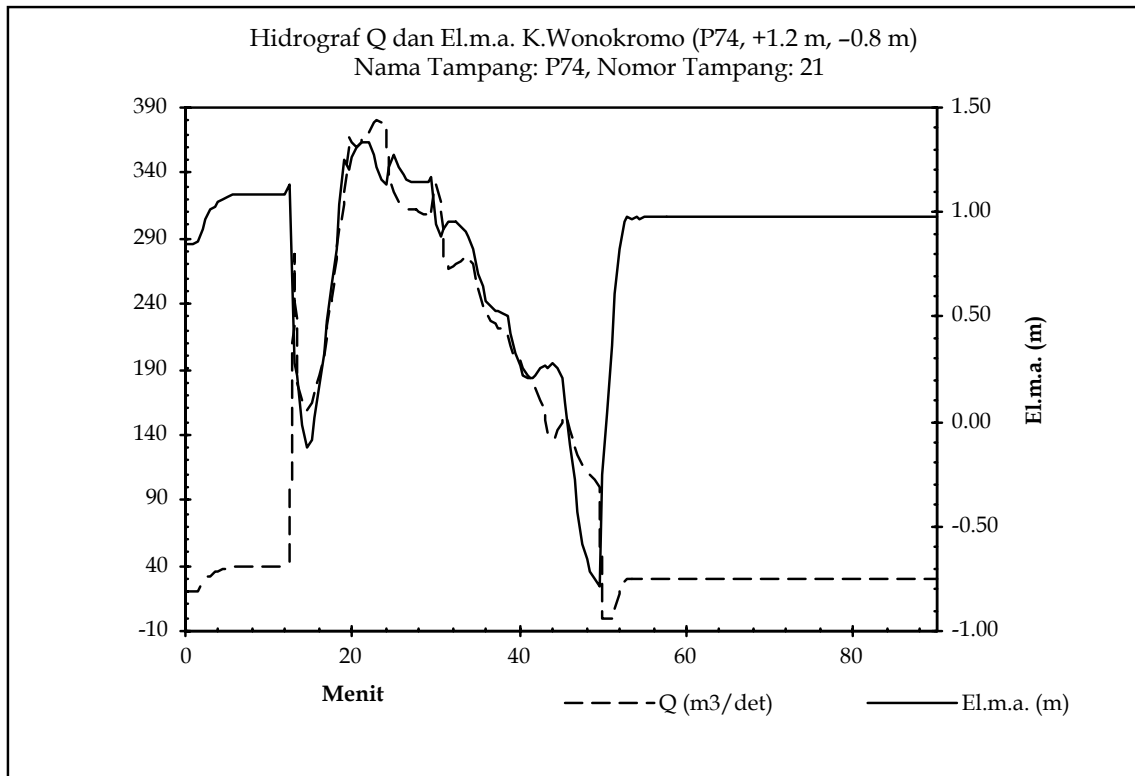
Dalam Gambar 3, debit air (yang digambarkan dengan garis putus) adalah merupakan data masukan yang disebut dengan kondisi batas hulu. Debit maksimum keluar pintu Jagir diasumsikan sebesar 370 m³/detik. Muka air sungai, yang digambarkan sebagai garis penuh, merupakan hasil hitungan. Perlu diperhatikan disini, bahwa karena debit yang keluar dari pintu Jagir pada akhir ditahan sama dengan 20 m³/detik, maka muka air pada tampang P02 menjadi konstan.



Gambar 3. Hidrodinamika aliran di batas hulu (yaitu di pintu air Jagir)

Dalam Gambar 4, disajikan hidrodinamika aliran tepat di hulu bendung karet. Tampak bahwa pada saat banjir datang, muka air sungai dengan cepat naik, sehingga melebihi elevasi kontrol maksimum yaitu +1.2 m. Hal ini mengakibatkan bendung karet Kempis secara otomatis, kemudian diikuti dengan penurunan muka air secara tiba-tiba. Selanjutnya karena debit terus membesar, maka muka air sungai naik. Begitu puncak banjir lewat, maka muka air sungai juga ikut menurun. Pada saat muka air sungai mencapai elevasi kontrol minimum, bendung karet secara otomatis kembang, yang diikuti dengan kenaikan muka air. Kondisi akhir tercapai yaitu pada debit sungai konstan sebesar $20 \text{ m}^3/\text{detik}$, muka air sungai juga konstan.

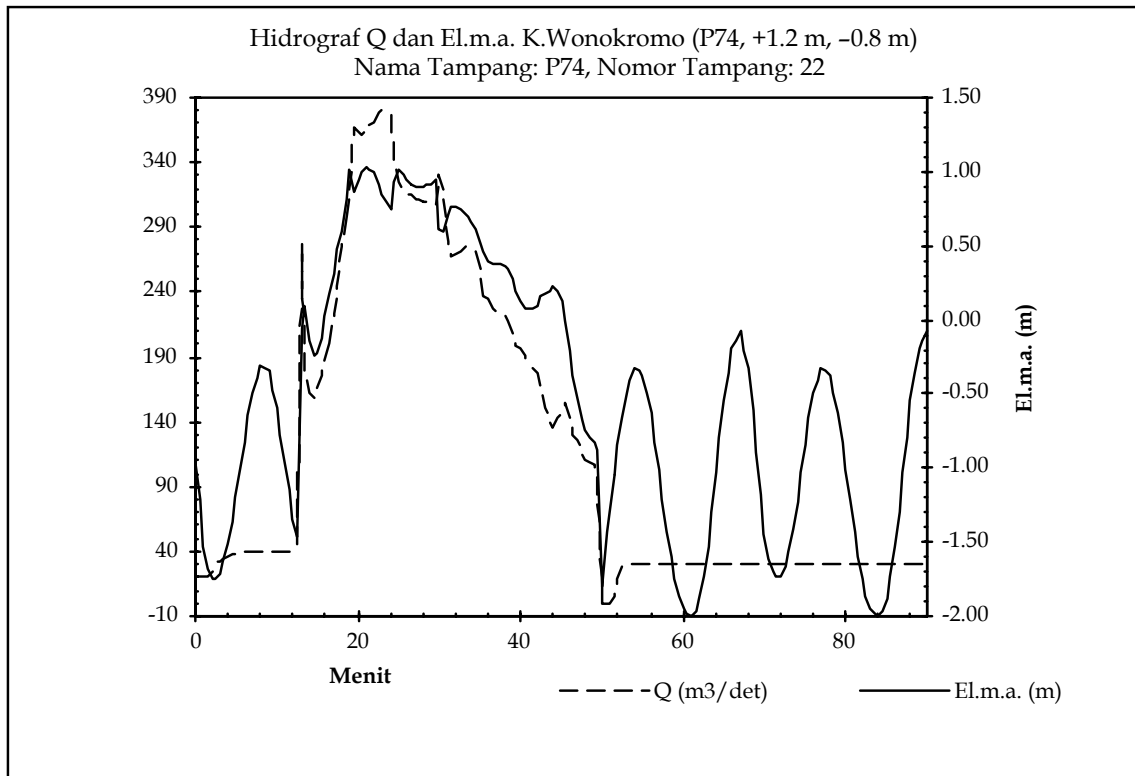
Hidrodinamika aliran tepat di hilir bendung disajikan dalam Gambar 5, tampak bahwa pada saat debit konstan $20 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan bendung karet masih kembang, muka air di hilir bendung sangat dipengaruhi oleh gerakan pasang surut air laut. Namun pada saat banjir datang, gerakan muka air pasang surut agak terganggu oleh adanya banjir tersebut. Setelah banjir lewat, kembali pengaruh pasang surut air laut menjadi dominan.



Gambar 4. Hidrodinamika aliran tepat di hulu bendung

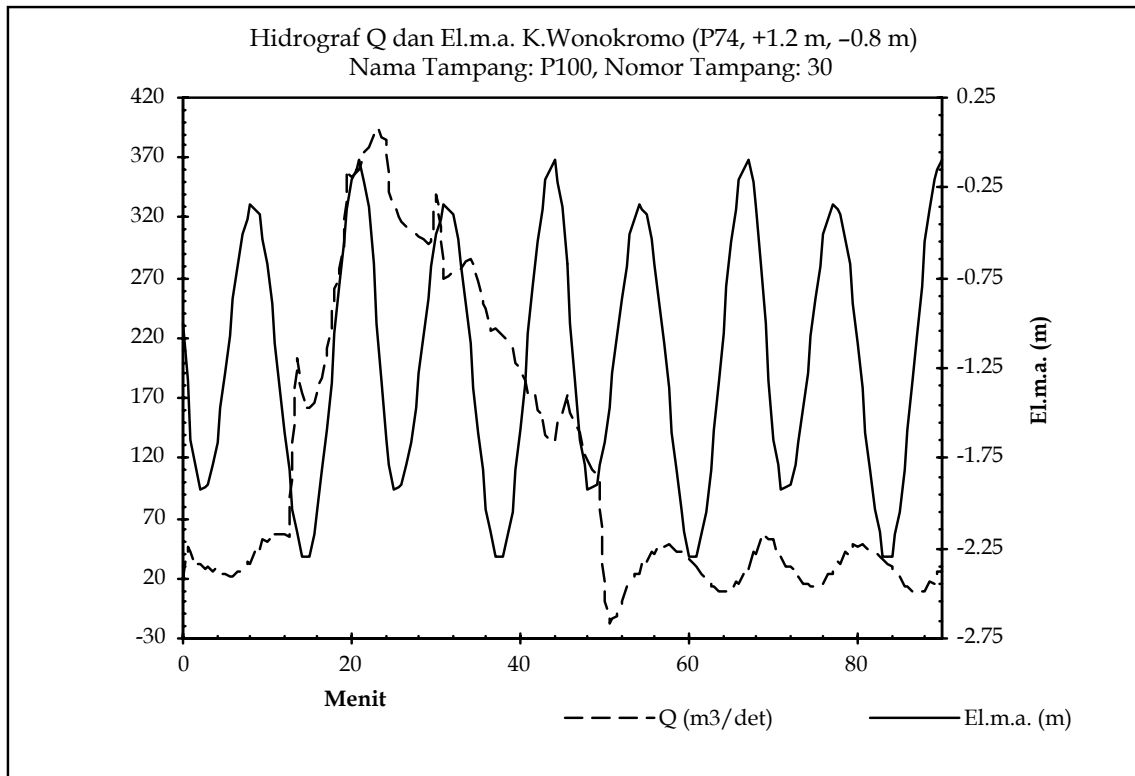
Menarik sekali jika kejadian ini dibandingkan dengan kejadian yang terjadi pada Gambar 4. Pada Gambar 4 yaitu tepat di hulu bendung karet, pengaruh pasang surut air laut sama sekali tidak tampak pada saat bendung karet kembang. Namun pada saat bendung karet Kempis, walaupun banjir sedang berlangsung, pengaruh pasang surut air laut masih tetap terasa. Hal ini ditunjukkan dengan adanya muka air naik turun pada saat banjir berlangsung (lihat Gambar 4).

Dari hasil ini tampak bahwa fungsi bendung karet sebagai peredam atau pencegah masuknya pengaruh pasang surut air laut ke arah hulu dapat disimulasikan secara baik oleh model. Dalam penelitian ini dilakukan pula simulasi pengaruh pasang surut air laut pada saat debit-debit rendah sungai, untuk meneliti seberapa besar kemungkinan adanya intrusi air laut ke arah hulu. Hasil rinci tidak ditayangkan dalam makalah ini, karena diluar tujuan dari penulisan makalah ini. Dengan demikian bendung karet, jika dirancang secara tepat memang bermanfaat ganda untuk daerah-daerah muara. Pertama sebagai penahan intrusi air laut, dan kedua sebagai penahan air segar terbuang percuma kelaut.



Gambar 5. Hidrodinamika aliran tepat di hilir bendung

Pada Gambar 6 disajikan kondisi batas hilir berupa pasang surut air laut di Selat Madura. Dalam Gambar 6, garis penuh merupakan data pasang surut rancangan yang merupakan data masukan bagi model. Sedangkan garis putus adalah garis debit yang merupakan hasil dari model. Menarik untuk diperhatikan bahwa pada saat debit sungai konstan sebesar $20 \text{ m}^3/\text{detik}$, debit di muara membesar dan mengecil disekitar nilai $20 \text{ m}^3/\text{detik}$. Debit akan mencapai puncak pada saat muka air di tengah-tengah proses menyurut. Hal ini sesuai dengan pengamatan debit di lapangan pada setiap muara sungai.



Gambar 6. Kondisi batas hilir berupa pasang surut di Selat Madura

6. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan akan dikemukakan disini untuk menggaris bawahi unjuk kerja model bendung karet yang dikembangkan dalam penelitian ini.

1. Dengan adanya model numerik bendung karet ini, maka simulasi perancangan elevasi kontrol dapat dilakukan lebih cepat dengan puluhan simulasi, tanpa membutuhkan waktu simulasi yang lama. Dalam hal ini model numerik akan lebih menguntungkan dibandingkan model fisik, karena kemudahan mengganti parameter elevasi kontrol.
2. Model yang dihasilkan mampu menggambarkan hidraudinamika aliran sepanjang sungai baik pada saat bendung karet kembang, Kempis, serta pada saat tidak ada debit yang limpas mercu bendung karet.
3. Penanganan pemutusan topologi pada saat bendung karet tidak melimpaskan air, dengan cara mereformulasikan kondisi batas hulu dan hilir pada lokasi bendung karet (pada saat tidak melimpaskan air), kedalam formulasi asli "sapuan ganda" menghasilkan suatu penyelesaian yang sangat sederhana namun sangat efisien.

KATA AKHIR

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Perum Jasa Tirta Malang atas kerja samanya sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- , 1975, "Unsteady Flow in Open Channels," Volume 1, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, Editor: K. Mahmood and V. Yevjevich.
- Abbot, M.B., 1979, "Computational Hydraulics – Elements of the Theory of Free Surface Flows," Pitman Publishing Limited.
- Cunge, J. A., Holly Jr., F. M., and Verwey, A., 1980, Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman Advanced Publishing Program, Boston • London • Melbourne.
- Djoko Luknanto, 1993, "Model Matematika," Universitas Gadjah Mada, Pusat Antar Universitas, Ilmu Teknik, Bahan Kuliah.
- Djoko Luknanto, 1993a, "Model Matematika Aliran 1-D di Sungai," Universitas Gadjah Mada, Pusat Antar Universitas, Ilmu Teknik, Bahan Kuliah.
- Djoko Luknanto, 1992a, "Penelitian Perbedaan Biaya Tanggul Berdasar Hitungan Aliran Permanen dan Tak Permanen," Laporan Penelitian, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Djoko Luknanto, 1992b, "Kesalahan Hitungan Aliran Permanen dalam Penjataan Air Satu Sekunder dari Sebuah Saluran Primer," Laporan Penelitian, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Holly Jr., Forrest M. and Preissmann, Alexandre, (1977), Accurate Calculation of Transport in Two Dimensions, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 103, No. HY11, pages 1259–1276.
- Sauvaget, Patrick, (1982), Dispersion in Rivers and Coastal Waters — 2. Numerical Computation of Dispersion, Developments in Hydraulic Engineering – 3, Chapter 2, Elsevier Applied Science, London and New York.
- Usseglio-Polatera, J.M. and Chenin-Mordojovich, M.I., (1988), Fractional Steps and Process Splitting Methods for Industrial Codes, Developments in Water Science 36, Computational Methods in Water Resources, Vol. 2 Numerical Methods for Transport and Hydrologic Processes, Editors: Celia, M.A., et. al., pages 167–172