

BAB 2. KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Mekanisme proses sedimentasi di dalam waduk cukup kompleks (lihat Gambar 2-1).

Proses sedimentasi di waduk ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

- 1) Hidrologi dan klimatologi, yang meliputi besarnya debit air dan sedimen yang masuk ke dalam waduk, curah hujan, evaporasi, suhu dan kecepatan angin.
- 2) Kondisi fisik waduk, yang meliputi bentuk dan ukuran, kapasitas tampungan dan bathimetri
- 3) Hidrolika, yang meliputi kecepatan aliran, fluktuasi muka air waduk, stratifikasi
- 4) Aktifitas manusia, yang meliputi pengoperasian waduk, rekreasi, perikanan dan pengeluaran sedimen dari waduk dengan *dredging*, *siphoning*, *flushing* maupun *sluicing*
- 5) Sifat sedimen, yang meliputi ukuran butiran, bentuk, berat jenis dan kecepatan endap partikel sedimen

Pengaruh dari faktor - faktor ini akan menyebabkan terjadinya proses sebagai berikut :

- 1) Pengendapan sedimen kasar (pembentukan delta)
- 2) Pengendapan sedimen halus
- 3) *Density current*
- 4) Pergerakan sedimen dasar (*bedload*) dan sedimen layang (*suspended load*)
- 5) Pemadatan endapan sedimen
- 6) *Resuspension*

Pengendapan sedimen kasar (pembentukan delta) terjadi karena perubahan penampang dari bagian sungai ke bagian waduk yang semakin melebar menyebabkan kecepatan aliran semakin menurun. Sehingga material sedimen berbutir kasar akan mengendap dan membentuk delta. Endapan ini terbentuk ke arah hulu sampai batas akhir aliran balik dan ke arah hilir sampai batas akhir angkutan sedimen dasar.

Dasar bagian atas

Dasar bagian peralihan

Dasar bagian bawah



Gambar 2-1. Skema Proses Fisik yang Mempengaruhi Proses Sedimentasi di Waduk (Simoes and Yang, 2008)

Material sedimen dengan butiran yang lebih halus akan dibawa masuk lebih jauh ke kolam waduk dan dapat dibawa oleh *density currents*. Sebagian material dengan butiran halus ini akan mengendap dan sebagian lagi akan ikut terbawa aliran keluar waduk lewat pelimpah, pintu pengambilan dan pintu penguras bawah. Ketika muka air waduk turun sebagian endapan delta tererosi dan terangkut lebih jauh ke dalam waduk, pengendapan berlanjut ke arah hilir. Endapan ini akan diperbaharui lagi sewaktu muka air tinggi ke arah hulu. Sedimen yang mengendap belakangan akan membebani, memadatkan dan mengubah berat jenis endapan yang ditimbuninya. Pengendapan ini juga tergantung dari kecepatan endap partikel berdasarkan kerapatan cairan, viskositas dinamik, ukuran partikel, bentuk partikel, berat jenis partikel dan kekasaran permukaan partikel yang jatuh (Simon and Senturk, 1992; Mulyanto, 2008; Jain and Singh, 2003; Simoes and Yang, 2008; Morris and Fan, 1997).

Sirkulasi di waduk dipengaruhi oleh kondisi hidrologi dari waduk dan DTA, klimatologi, fisiografi, morfologi waduk dan operasi waduk. Stratifikasi kerapatan cairan biasanya ditimbulkan oleh suhu, kadar garam, kekeruhan dan kerapatan massa air. Semua efek ini memberikan dampak langsung pada proses pengendapan di waduk, efisiensi tangkapan sedimen dan distribusi endapan sedimen di waduk. Adanya perbedaan kerapatan massa antara air di kolam waduk dan aliran air masuk waduk menyebabkan terjadinya *density current*. *Density current* bisa terjadi karena adanya perbedaan suhu ($\Delta\rho \approx 2\text{kg}/\text{m}^3$), kadar garam ($\Delta\rho \approx 20\text{kg}/\text{m}^3$), kekeruhan ($\Delta\rho \approx 20 - 200\text{kg}/\text{m}^3$) atau kombinasi dari faktor – faktor ini. *Turbidity current* adalah *density current* yang disebabkan oleh kekeruhan yang mengalir dibawah air waduk. *Turbidity current* sangat penting karena mempengaruhi distribusi sedimen di waduk. *Turbidity current* terjadi karena air dengan kandungan sedimen tinggi masuk ke waduk ketika bertemu air waduk akan terjun mengalir ke bawah air waduk yang jernih mengikuti dasar sungai asli. Titik dimana air sungai dengan kandungan sedimen tinggi mulai terjun kebawah aliran waduk dinamakan titik terjun (*plunge point*) (Simoes and Yang, 2008).

Energi angin di atas permukaan waduk akan menimbulkan gelombang. Semakin besar kecepatan angin dan *fetch* maka semakin besar pula tinggi dan periode gelombang yang dihasilkan. Dibawah permukaan air bergerak melingkar membentuk pusaran.

Makin ke dalam diameter pusaran akan semakin mengecil. Kecepatan mengitari lingkaran pusaran (*orbit*) akan menimbulkan tegangan geser pada dasar waduk. Gerusan atau *resuspension* sedimen dapat terjadi, tergantung besarnya tekanan dan tipe dari sedimen dasar (Chapra, 1997).

Salah satu faktor yang mempengaruhi proses sedimentasi waduk adalah operasi waduk. Pengaruh operasi waduk pada pengendapan sedimen di waduk terjadi pada hal-hal sebagai berikut :

1) Efisiensi Tangkapan Sedimen

Efisiensi tangkapan sedimen adalah ratio antara sedimen yang mengendap dalam waduk dengan jumlah sedimen yang masuk waduk. Efisiensi tangkapan sedimen digunakan untuk mengestimasi jumlah endapan sedimen dalam waduk. Nilai efisiensi tangkapan sedimen tergantung pada kecepatan endap partikel yang dipengaruhi oleh berat jenis, besar butir dan bentuk sedimen, kekentalan dan komposisi kimiawi air, tingkat pengaliran melewati waduk, bentuk waduk, operasi waduk dan umur waduk. Churchill (1948) dan Brune (1953) dalam Morris and Fan (1997) mengembangkan metode empiris untuk menentukan efisiensi tangkapan sedimen. Efek dari operasi waduk ditunjukkan pada kapasitas tampungan yang digunakan dalam perhitungan.

2) Berat Jenis Sedimen

Lara and Pemberton (1963) dalam Morris and Fan (1997) mengembangkan metode empiris untuk mengestimasi berat jenis awal dari endapan sedimen berdasarkan analisis dari 1.300 sampel sedimen dari waduk dan sungai. Metode ini menggabungkan dua faktor utama yang mempengaruhi berat jenis dan koefisien untuk perhitungan berat jenis sesudah konsolidasi yaitu distribusi ukuran butiran dan operasi waduk. Operasi waduk dikategorikan menjadi 3 yaitu waduk selalu tenggelam, waduk mengalami penurunan secara periodik dan waduk kosong normal.

3) Distribusi Sedimen

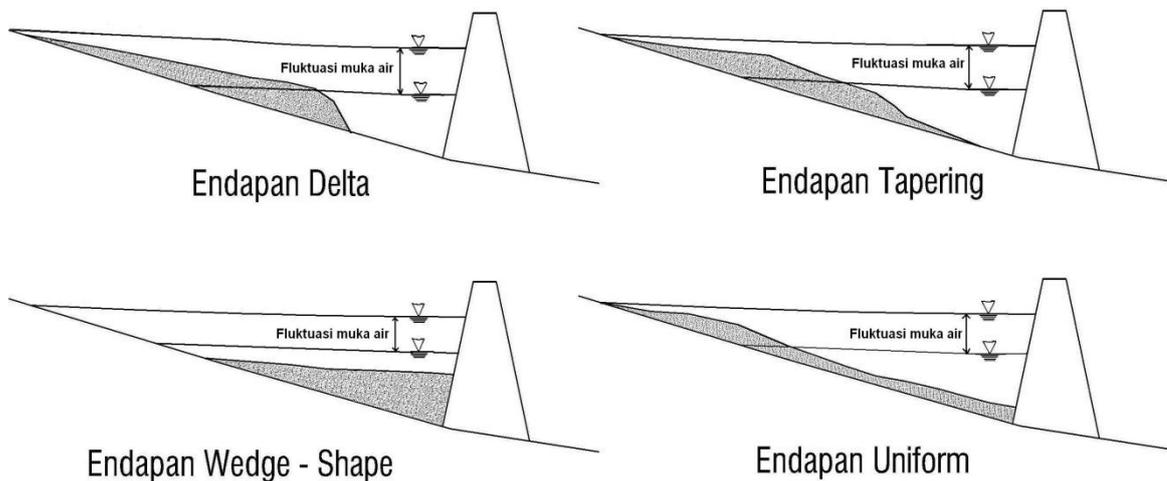
Distribusi sedimentasi waduk adalah penyebaran partikel sedimen di seluruh permukaan dasar waduk dalam periode tertentu. Antara waduk yang satu dengan

yang lainnya mempunyai pola distribusi sedimen yang berbeda karena masing – masing mempunyai karakteristik dan sistem yang berbeda. Distribusi sedimentasi waduk dalam periode tertentu diperlukan untuk memprediksi/ mengetahui akumulasi sedimen pada tiap – tiap elevasi waduk. Metode yang sering digunakan untuk menghitung distribusi sedimentasi waduk yaitu metode empiris pengurangan luas dan penambahan luas. Metode empiris ini dikembangkan oleh Biro Reklamasi Amerika Serikat (USBR). Metode penambahan luas digunakan berdasarkan anggapan bahwa volume sedimen yang mengendap di dalam waduk sebanding dengan setiap penambahannya. Dari pengamatan ulang terhadap beberapa waduk, Biro Reklamasi Amerika Serikat menemukan bahwa pola pengendapan sedimen bervariasi dari satu tempat ketempat lainnya. Bentuk waduk, sistem operasi waduk dan ukuran butiran sedimen secara keseluruhan mempengaruhi distribusi sedimen di waduk. Empat kurva empiris yang berbeda dari metode pengurangan luas dikembangkan berdasarkan dari karakteristik ini. Dengan menggunakan tipe kurva yang sesuai dapat menghasilkan distribusi sedimen yang lebih mendekati kenyataan daripada hasil perhitungan yang didapat dengan metode penambahan luas. Empat kurva metode pengurangan luas ini dikembangkan dari pengamatan ulang data waduk bersama dengan kurva metode penambahan luas. Operasi waduk diklasifikasikan menjadi 4 yaitu sedimen tenggelam di waduk (muka air waduk selalu tinggi), surutan muka air waduk sedang, surutan muka air waduk cukup besar dan waduk kosong normal. Berdasarkan sistem operasi waduknya dapat ditentukan tipe kurvanya. Strand and Pemberton (1987) dalam Morris and Fan (1997) menyatakan bahwa tipe waduk tidak berubah sejalan dengan bertambahnya endapan sedimen, jika sistem operasi waduk tetap.

4) Pola Pengendapan Sedimen

Menurut Morris and Fan (1997) pola pengendapan sedimen antara waduk yang satu dengan yang lainnya berbeda dan secara alami sangat kompleks karena perbedaan kondisi hidrologi, karakteristik sedimen, geometri waduk dan operasi waduk. Berdasarkan karakteristik sedimen dan operasi waduk, pola pengendapan sedimen membujur (longitudinal) dibedakan menjadi 4 tipe (lihat Gambar 2-2). Endapan delta terbentuk di muara oleh sedimen berbutir kasar atau fraksi besar dan sedimen berbutir halus seperti *silt*. Endapan *wedge shape* terbentuk oleh sedimen halus yang

diangkut ke muka bendungan oleh *turbidity current*. Bentuk ini terjadi pada waduk kecil dengan inflow sedimen halus yang besar atau waduk besar yang dioperasikan pada muka air rendah selama banjir sehingga menyebabkan sedimen terbawa ke muka bendungan. Endapan *tapering* terjadi bila waduk panjang secara normal berada pada muka air tinggi. Dan endapan *uniform* terjadi pada waduk sempit dimana sering mengalami fluktuasi muka air dan muatan sedimen halusnya kecil.



Gambar 2-2. Pola Pengendapan Membujur (*Longitudinal*) Sedimen di Waduk (Morris and Fan, 1997)

Sedangkan pada arah melintang (*lateral*) sedimen pada awalnya mengendap pada bagian terdalam dari tiap penampang melintang. Tiga proses yang menyebabkan sedimen terpusat di bagian terdalam dari tiap penampang melintang :

- 1) Transpor *turbid density current* dan pengendapan sedimen sepanjang *thalweg*
- 2) Logaritma profil vertikal konsentrasi sedimen dalam air akan memusatkan sedimen layang ke bagian terdalam dari penampang melintang
- 3) Jika sedimen layang terdistribusi seragam pada penampang melintang dan mengendap secara tegak lurus, pengendapan sedimen akan langsung sebanding dengan kedalaman air

Penanganan sedimentasi waduk antara lain dapat dilakukan dengan mengeluarkan sedimen yang sudah mengendap di dalam waduk atau meminimalisasi terjadinya pengendapan sedimen di dalam waduk. *Flushing* adalah salah satu cara untuk mengeluarkan sedimen yang telah mengendap di dalam waduk. Ada dua tipe *flushing* yaitu : *free flow* dan *pressure flushing*. Pada *free flow, flushing* dilakukan dengan

menurunkan muka air waduk/mengosongkan waduk, sedangkan pada *pressure flushing* muka air waduk tidak perlu diturunkan (pada kondisi muka air tetap tinggi). *Pressure flushing* hasilnya kurang efektif dibanding dengan *free flow*, tetapi *pressure flushing* sering dilakukan karena fungsi waduk yang tidak memungkinkan untuk dikosongkan. Kondisi yang menguntungkan untuk melakukan *flushing* adalah apabila debit inflow lebih besar tiga kalinya dari debit inflow rata-rata tahunan, waduk sempit dengan kemiringan dasar curam, banyak mempunyai outlet bawah pada elevasi yang rendah, operasinya dilakukan setiap tahun untuk mencegah konsolidasi dari material dasar dan efek negatif di hilir, dimulai saat awal banjir (Morris and Fan, 1997; van Rijn, 2013).

Untuk meminimalisasi terjadinya pengendapan sedimen di dalam waduk dapat dilakukan dengan pelewatan sedimen dari waduk selama banjir (*Sluicing*). Saat *sluicing* muka air waduk selalu dijaga tetap rendah (dengan *drawdown*). Selama kenaikan elevasi muka air waduk pada saat banjir, sedimen outflow dari waduk selalu lebih kecil dari sedimen inflow. Selama penurunan elevasi muka air waduk, sedimen outflow lebih besar dari sedimen inflow karena erosi material dasar waduk. Kondisi yang menguntungkan untuk melakukan *sluicing* adalah apabila debit inflow lebih besar dua kalinya dari debit inflow rata-rata tahunan, waduk sempit dan pendek, banyak mempunyai outlet bawah pada elevasi yang rendah, *drawdown* sampai dengan setengah tinggi bendungan, sedimen inflow terutama merupakan *suspended sediment*, pengalaman operator untuk menentukan waktu yang tepat (Morris and Fan, 1997; van Rijn, 2013).

Perbedaan antara *flushing* dan *sluicing* adalah *flushing* menggerakkan akumulasi sedimen sesudah diendapkan, memodifikasi dan mengubah karakteristik angkutan sedimen. Sedangkan *sluicing* meminimalkan pengendapan sedimen selama periode banjir, menjaga pola angkutan sedimen sepanjang alur (Morris and Fan, 1997).

Beberapa penelitian terkait operasi waduk dan sedimentasi waduk akan diuraikan sebagai penjelasan berikut. Nicklow and Mays (2000) menyatakan bahwa studi pengelolaan waduk yang telah banyak dilakukan selama ini lebih difokuskan pada aplikasi metode riset operasi untuk menentukan kebijakan pengoperasian waduk, belum ada model yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan pengendalian sedimen. Diperlukan alternatif pendekatan untuk mengurangi efek merugikan dari sedimentasi.

Selain itu antara pengembangan teori optimasi dan praktek pengelolaan masih ada gap dan untuk menyelesaikan model optimasi masih diperlukan waktu komputasi yang lama. Pada *multiple reservoir network* sedimen yang diangkut dari fasilitas di hulu akan mengendap di hilir sehingga mempengaruhi pengelolaan dari komponen-komponen di hilir. Diperlukan model optimasi untuk permasalahan pengendalian sedimen pada jaringan sungai dan waduk. Penelitian Nicklow and Mays (2000) ini bertujuan untuk menentukan skema penelusuran air dan sedimen yang optimal atau kebijakan pelepasan waduk yang memfokuskan pada pengendalian gerusan dan pengendapan sedimen. Fungsi tujuan dari penelitian ini adalah meminimalisasi elevasi dasar sungai dan waduk pada tiap penampang melintang pada tiap waktu. Teknik *discrete time optimal control* yang menggabungkan metode riset operasi dengan angkutan sedimen dipilih untuk membantu mengatasi gap antara pengembangan teori optimasi dan praktek pengelolaan. Penggabungan modifikasi HEC (*Hydrology Engineering Center*) 6 dengan algoritma SALQR (*Successive Approximation Linear Quadratic Regulator*) diperlukan untuk menyederhanakan *non linier transition constraint* menjadi *linier constraint* dalam tahap optimasi sehingga mengurangi waktu kompilasi. Sedangkan *Fungsi Penalty* diperlukan untuk merubah permasalahan kendala menjadi perumusan tak berkendala. Model ini diterapkan pada *hypothetical three reservoir network* dan *Yazoo River Basin Network*. Model dapat digunakan untuk mengevaluasi pengelolaan *multiple reservoir network* untuk minimasi efek merugikan sedimentasi di sungai dan waduk. Model ini menggabungkan model operasi waduk dengan model angkutan sedimen 1-D yang mempertimbangkan keseimbangan antara gerusan dan sedimentasi pada sistem arah longitudinal. Model 1-D lebih sesuai apabila digunakan pada sungai atau waduk yang sempit memanjang.

Hadihardaja (2009) melakukan penelitian model operasi waduk yang bertujuan meminimalisasi pengendapan sedimen dan memaksimalkan produksi energi. Fungsi tujuannya adalah $\min \sum_{t=1}^T [EDR_t - SDR_t]^2$ dimana EDR (*Energy Demand Ratio*) adalah ratio antara energi tahunan yang tersedia dengan target energi tahunan dan SDR (*Sediment Demand Ratio*) adalah ratio antara pelepasan sedimen tahunan dengan target pelepasan sedimen tahunan. Model operasi waduk – pengendalian sedimen diformulasikan dengan program non linier, *inflow* sedimen ditentukan dengan mengembangkan hubungan antara *inflow* dan debit sedimen menggunakan *Artificial*

Neural Network (ANN) sedangkan *outflow* sedimen ditentukan berdasarkan rumusan *outflow* sedimen yang dikembangkan untuk waduk – waduk di Cina berdasarkan data empiris yang diambil dari Morris and Fan (1997). Evaluasi *trade off* digunakan sebagai strategi untuk membangkitkan ratio target agar antara pengendalian pengendapan sedimen dan produksi energi mempunyai tingkat kepentingan yang sama. Studi kasus dilakukan untuk Waduk Sanmenxia di Cina selama 5 tahun operasi waduk dan operasi pengendalian sedimen dilakukan pada musim hujan. Hasilnya adalah apabila waduk dioperasikan tanpa pengendalian sedimen pada musim hujan, akumulasi sedimen dalam waktu lima tahun sebesar 2.750 juta m³ dan apabila waduk dioperasikan dengan pengendalian sedimen dihasilkan akumulasi sedimen sebesar 500 juta m³, terjadi penurunan akumulasi sedimen yang cukup signifikan. Model ini dapat diaplikasikan untuk operasi waduk pengendalian sedimentasi. Model ini hanya memprediksi volume sedimen yang terendap di waduk tidak mempertimbangkan distribusi sedimen di waduk. Prediksi volume sedimen yang terendap di waduk didapat berdasarkan volume sedimen yang masuk waduk dikurangi dengan volume sedimen yang keluar waduk, sehingga keakuratan dari prediksi ini tergantung dari model persamaan sedimen *inflow* dan *outflow*. Hadihardaja (2009) menyarankan bahwa untuk riset selanjutnya perlu dikembangkan besar dan waktu tempuh dari pengendapan sedimen berdasarkan pendekatan hidrolis saat sedimen mencapai mulut inlet dan dikombinasikan dengan operasi waduk.

Petkovsek and Roca (2014) melakukan studi dampak aturan operasi waduk terhadap sedimentasi waduk untuk waduk yang tidak mempunyai *flushing outlet* (waduk yang dibangun antara tahun 1960 – 1970). Untuk studi kasus digunakan Waduk Tarbela dan model yang digunakan adalah model 1D RESSASS (*Reservoir Survey Analysis and Sedimentation Simulation*). Operasi waduk diperoleh dengan menyederhanakan kurva tinggi muka air waduk. Muka air waduk maksimum, muka air waduk minimum dan durasi *flushing* ditentukan terlebih dahulu, antara muka air maksimum dan minimum merupakan kurva linier, yang menurun sesuai pelepasan air dan naik sesuai pengisian waduk. Tinggi muka air merupakan nilai target, jika tidak tercapai maka tinggi muka air sebisa mungkin mendekati nilai target. Perubahan operasi dilakukan dengan membuat 5 variasi tinggi muka air minimum waduk. Sedimen lebih besar dari pasir tidak digunakan dalam model sedimentasi waduk. Perubahan profil

dasar waduk dilakukan dengan mencari posisi sedimen *delta point*. *Delta point* merupakan posisi elevasi dasar waduk dengan jarak 1 m dibawah tinggi muka air minimum. Hasilnya adalah bila operasi *longterm* semakin lama maka endapan semakin mendekati bendungan. Dengan tinggi muka air minimum yang berbeda maka pada tinggi muka air minimum yang paling rendah endapan lebih cepat mendekati bendungan, ketebalan endapan lebih rendah, sedimen banyak mengendap di tampungan tidak aktif, kehilangan kapasitas total lebih kecil tetapi kehilangan kapasitas total masih lebih besar dari kehilangan kapasitas aktif dan sedimen outflow lebih besar. Sedimen outflow naik dengan waktu operasi *longterm* yang lebih lama, sedimen outflow turun dengan turunnya tinggi muka air minimum. Komposisi sedimen inflow dan outflow berbeda. Pada sedimen outflow, pasir mulai ada sesudah 30 tahun beroperasi dan semakin naik jumlahnya. Adanya pasir pada sedimen outflow harus dipertimbangkan terhadap abrasi outlet dan turbin. Pada penelitian Petkovsek and Roca (2014) ini geometri waduk panjang dan sempit sehingga dapat menggunakan model 1D. Operasi waduk ditentukan tidak dengan optimasi. Untuk bentuk geometri waduk yang berbeda maka hasilnya juga akan berbeda dan sebaiknya operasi waduk dilakukan dengan optimasi.

Kementerian PU (2007a) menyatakan bahwa permasalahan sedimentasi di Waduk Wonogiri adalah terjadinya sedimentasi yang lebih cepat dari rencana, penyumbatan intake karena pengendapan sedimen di sekitar intake dan pengurangan kapasitas efektif waduk. Beberapa metode yang diusulkan dan telah diteliti Kementerian PU (2007b; 2007c) untuk menangani sedimentasi Waduk Wonogiri adalah:

- 1) Metode yang diusulkan untuk mengatasi endapan sedimen dan penyumbatan sampah di intake adalah modifikasi dan relokasi intake, pembuatan struktur penangkap sampah di intake dan Sungai Keduang, dan pengerukan sedimen di sekitar intake
- 2) Metode yang dilakukan untuk pengendalian sedimen dari Sungai Keduang adalah pengalihan sedimen (*sediment bypass*) dari Sungai Keduang, pelewatan sedimen (*sediment sluicing*) dan *flushing* sedimen dari Sungai Keduang lewat pelimpah baru dengan membuat waduk tampungan sedimen. Metode ini dievaluasi dengan menggunakan model sedimentasi waduk 2D untuk memprediksi efek dari pengendalian yang diusulkan. Metode *flushing* juga dievaluasi oleh Sardi et al.

(2008) dengan model 2D pada kondisi eksisting dan kondisi ada waduk penampung sedimen dalam jangka waktu satu tahun.

- 3) Metode yang diusulkan untuk pengendalian sedimen dari anak sungai yang lainnya adalah bendungan tampungan sedimen untuk pengerukan sedimen, pengerukan sedimen di waduk, mengatur sedimen di waduk dengan pelepasan air dari intake dan peninggian bendungan
- 4) Konservasi daerah tangkapan air Waduk Wonogiri

Kesimpulan yang diambil berdasarkan penelitian tersebut adalah sedimentasi Waduk Wonogiri dapat diatasi dengan membuat waduk tampungan sedimen (*sediment storage reservoir*) yang dilengkapi pelimpah baru untuk keperluan *flushing/ sluicing* sedimen dari Sungai Keduang, konservasi daerah tangkapan air dan pengerukan rutin di sekitar intake. Yang perlu digaris bawahi pada penelitian yang dilakukan oleh Kementerian PU (2007b; 2007c) tersebut diatas adalah:

- 1) Pada Waduk Tampungan Sedimen, *sluicing* dilakukan pada saat debit Sungai Keduang lebih besar $10 \text{ m}^3/\text{dt}$, pintu pelimpah baru dibuka penuh mulai awal musim hujan hingga akhir Januari. Debit pelepasan *sluicing* maksimal $400 \text{ m}^3/\text{dt}$ dengan total volume air yang dilepas maksimal 200 juta m^3 . *Flushing* dilakukan pada akhir musim hujan (Februari – 15 April) ketika debit dari sungai Keduang $> 50 \text{ m}^3/\text{dt}$ dan elevasi muka air dibawah $+135,3 \text{ m}$. Dengan durasi *flushing* 15,3 jam, air yang digunakan untuk *flushing* diperkirakan 11 juta m^3 . Untuk *flushing* kemungkinan tidak bisa dilakukan tiap tahun, karena kemungkinan air tidak bisa mencapai muka air normal ketika akhir musim hujan.
- 2) Pada Waduk Utama, untuk mengurangi sedimentasi waduk dengan pelepasan air dari intake sebesar $70 \text{ m}^3/\text{dt}$ dapat menimbulkan resiko kekurangan air, karena muka air waduk pada akhir musim hujan tidak bisa mencapai muka air normal.
- 3) Dengan dibangunnya waduk tampungan sedimen diperlukan perubahan operasi Waduk Wonogiri untuk memfungsikan fasilitas *flushing/ sluicing* yang ada. Penentuan waktu dan debit pelepasan pada metode tersebut belum dilakukan dengan optimasi, sehingga menimbulkan resiko kekurangan air di musim kemarau. Selain itu penggelontoran juga harus menghasilkan efektifitas penggelontoran seoptimal mungkin.

Kementerian PU (2007c) mengembangkan model angkutan sedimen NKhydro2D yang merupakan model numerik *Depth-integrated Two Dimensional*. Model ini digunakan untuk memprediksi efek pengendalian sedimen dari Sungai Keduang yang dilakukan dengan pengalihan sedimen (*sediment bypass*), pelewatan sedimen (*sediment sluicing*) dan pembuatan waduk tampungan sedimen, pada pengendalian ini dibuat waduk terpisah pada sisi sebelah dalam Sungai Keduang dengan membuat *closure dike* sehingga terdapat dua bagian waduk yang dapat dioperasikan terpisah, untuk *flushing/ sluicing* sedimen dari Sungai Keduang dipasang pintu baru di abutment kanan bendungan. Simulasi dilakukan antara bulan Nopember – Mei pada tahun kering (tahun 2004-2005), tahun rata-rata (tahun 1995-1996) dan tahun basah (1998-1999). Pelepasan lewat intake sesuai dengan data debit bulanan rata-rata Bendung Colo dan elevasi muka air waduk awal +129,0 m. Simulasi dilakukan dengan 10 skenario sebagai berikut:

- 1) Simulasi 1 : Pelepasan banjir melalui *spillway* eksisting. Disamping pelepasan air melalui intake juga dilakukan pelepasan air lewat *spillway* eksisting dengan ketentuan muka air waduk diatas elevasi +131,5 m, debit Sungai Keduang lebih dari 50 m³/dt dan pelepasan maksimum 400 m³/dt
- 2) Simulasi 2 : *Sluicing* dengan pintu *spillway* baru lebar 30 m dan elevasi puncak *spillway* baru +127,00 m. Pada saat debit Sungai Keduang lebih besar 10 m³/dt pintu *spillway* baru dibuka penuh mulai awal musim hujan hingga akhir Januari. Debit pelepasan maksimal 400 m³/dt dengan total volume air yang dilepas maksimal 200 juta m³
- 3) Simulasi 3 : Waduk dibagi menjadi dua yaitu waduk utama dan waduk tampungan sedimen. *Sluicing* dengan pintu *spillway* baru lebar 30 m dan elevasi puncak *spillway* baru +127,00 m. Pada saat debit Sungai Keduang lebih besar 10 m³/dt pintu *spillway* baru dibuka penuh mulai awal musim hujan hingga akhir Januari. Debit pelepasan maksimal 400 m³/dt dengan total volume yang dilepas maksimal 200 juta m³
- 4) Simulasi 4 : Waduk dibagi menjadi dua yaitu waduk utama dan waduk tampungan sedimen. *Flushing* dan *sluicing* dengan pintu *spillway* baru lebar 30 m dan elevasi puncak *spillway* baru +127,00 m. *Flushing* dan *sluicing* dilakukan pada akhir musim hujan (Februari - 15 April) ketika debit banjir dari Sungai Keduang lebih dari 50 m³/dt.

- 5) Simulasi 5 : Seperti simulasi 4 tetapi *flushing* dan *sluicing* dengan pintu *spillway* eksisting.
- 6) Simulasi 6 : Seperti simulasi 4 tetapi pintu *spillway* baru lebarnya 22,5 m
- 7) Simulasi 7 : Seperti simulasi 4 tetapi pintu *spillway* baru lebarnya 15 m
- 8) Simulasi 8 : Seperti simulasi 4 tetapi pintu *spillway* baru lebarnya 10 m
- 9) Simulasi 9 : Seperti simulasi 4 tetapi pintu *spillway* baru lebarnya 10 m dan elevasi puncak *spillway* baru +128,00 m

Hasil simulasi 1 s/d 9 dapat dilihat pada Tabel 2-1 berikut.

Tabel 2-1. Sedimentasi di Muara Sungai Keduang Hasil Simulasi 1 s/d 9 (Kementerian PU, 2007c)

Simulasi	Sedimentasi (m ³) pada kondisi		
	Tahun Kering	Tahun Rata-rata	Tahun Banjir
1	278.200,00	724.500,00	847.200,00
2	224.100,00	667.000,00	772.000,00
3	358.700,00	675.600,00	863.400,00
4	385.200,00	74.900,00	136.400,00
5	382.100,00	654.100,00	818.400,00
6	387.500,00	73.400,00	165.00,00
7	390.400,00	181.200,00	301.200,00
8	400.600,00	468.300,00	535.900,00
9	401.100,00	539.900,00	565.300,00

- 10) Simulasi 10: *Bypassing*, simulasi ini dilakukan hanya pada tahun basah. Pelepasan dilakukan melalui *bypass tunnel* jika debit Sungai Keduang lebih besar 30 m³/dt dan lebih kecil 50 m³/dt. Pelepasan dilakukan melalui *spillway* eksisting jika muka air waduk diatas elevasi +131,50 m dan debit Sungai Keduang lebih besar 50 m³/dt dengan batas pelepasan maksimum 400 m³/dt.

Pada simulasi 10 didapatkan efektifitasnya hanya 6,9 % dan volume sedimen yang dapat dialihkan hanya 28 % dari total sedimen inflow. Berdasarkan hasil simulasi 1 – 4 dan 10 didapatkan pada simulasi 4 terjadi pengurangan sedimentasi yang cukup besar pada muara Sungai Keduang sampai muka bendungan dan debit pelepasan sedimen lewat pintu *spillway* baru besar. Pada simulasi 5 – 9, pengendapan yang terjadi tidak begitu banyak perubahan dengan perubahan lebar pintu dan elevasi puncak *spillway* baru dibandingkan dengan simulasi 4. Semakin lebar pintu *spillway* baru maka debit sedimen yang dilepas juga semakin besar. Jika *flushing* dan *sluicing* dilakukan lewat pintu *spillway* eksisting maka pengendapan di lokasi Keduang semakin tinggi dan debit

sedimen yang keluar pintu intake juga semakin besar. Pengendalian yang efektif adalah dengan simulasi 4 karena didapat efisiensi pelepasan sedimen dengan pengendalian ini lebih tinggi, sedimentasi di sekitar intake berkurang dan dengan *flushing* pada akhir musim hujan (Februari – 15 April) elevasi muka air waduk dapat dijaga lebih tinggi pada akhir musim hujan untuk semua tahun hidrologi.

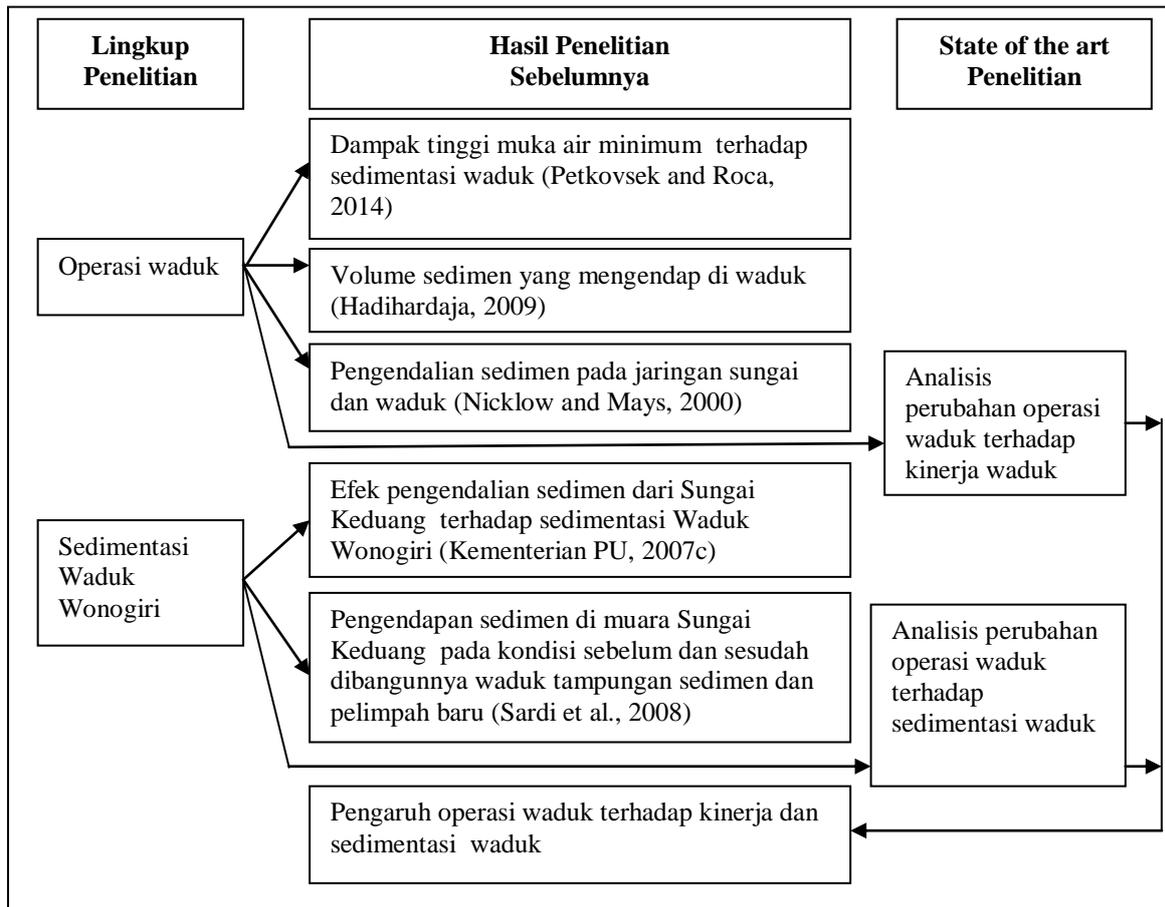
Pada studi Kementerian PU (2007) pengendalian baru difokuskan pada pengendalian sedimen dari Sungai Keduang yang dianalisis menggunakan model matematik 2-D. Untuk mengetahui penyebaran sedimen dan efek dari operasi waduk yang diterapkan akan lebih tepat jika digunakan struktur aliran 3-D dengan menggunakan model 3-D selain itu inflow sedimen dari anak sungai lainnya yang menyumbang sekitar 60% juga harus dipertimbangkan. Operasi pengendalian sedimen dilakukan pada saat musim hujan hal ini sudah tepat karena pada musim hujan sedimen yang terangkut kedalam waduk lebih besar dan cukup tersedia air untuk melakukan penggelontoran.

Sardi et al. (2008) melakukan penelitian untuk mengetahui besarnya pengurangan sedimen pada Bendungan Serbaguna Wonogiri apabila dibuat waduk penampung sedimen pada muara Sungai Keduang. Penelitian Sardi et al. (2008) dilakukan dengan membuat simulasi transpor sedimen 2D menggunakan bantuan software CCHE (*Center for Computational Hydroscience and Engineering*). Simulasi dilakukan pada kondisi eksisting dan kondisi ada waduk penampung sedimen dalam jangka waktu satu tahun. Data debit yang digunakan adalah data debit bulanan rata – rata yang diasumsikan sebagai debit jam-jaman, sehingga debit merata selama satu bulan. Penggelontoran dilakukan untuk mengurangi sedimen pada tampungan waduk penampung sedimen. Penggelontoran dilakukan pada bulan Januari sampai April ketika debit dari Sungai Keduang tinggi dan elevasi muka air waduk utama mencapai elevasi +136 m dengan debit konstan. Hasil simulasi menunjukkan aliran yang terjadi di muara Sungai Keduang pada kondisi eksisting terjadi turbulensi dengan kecepatan yang relatif kecil sehingga memungkinkan terjadinya pengendapan. Pada kondisi adanya waduk penampung sedimen aliran mengarah ke pintu pelimpah baru dengan kecepatan yang relatif seragam sehingga sedimen tersuspensi. Pengoperasian waduk penampung sedimen dapat mengurangi besarnya pengendapan sedimen. Penelitian Sardi et al. (2008) ini belum memperhitungkan pengaruh fluktuasi debit, waktu simulasi pendek

sehingga kecenderungan lokasi pengendapan belum terlihat secara signifikan dan penggelontoran yang optimum belum diketahui.

Chang et al. (2003) dan Ji (2006) mengembangkan kurva penggelontoran sedimen yang menggambarkan volume sedimen yang digelontor pada debit dan kedalaman aliran tertentu. Wohl and Rathburn (2003) melakukan studi pengurangan dampak negatif sedimentasi waduk terhadap saluran di hilir waduk. Hassanzadeh (2004) mengembangkan model matematik dengan tujuan menggambarkan profil dasar longitudinal dan variasi angkutan sedimen sebagai fungsi waktu dan kondisi aliran hidrolik. Liu et al. (2004) memprediksi variasi konsentrasi sedimen layang sepanjang sungai, perubahan dasar dan jumlah sedimen yang dapat digelontor dari waduk di hulu dan kemudian diendapkan di waduk bagian hilir selama *flushing* sedimen pada waduk seri. Elci et al. (2007) meneliti pengaruh stratifikasi dan erosi tebing waduk (*shoreline*) terhadap pola sedimentasi waduk. Lu and Wang (2009) melakukan simulasi angkutan muatan sedimen layang dari aliran turbulen berdasarkan teori stokastik aliran turbulen dari Dou. Lu et al. (2010) meneliti erosi dan pengendapan di bagian hulu waduk yang selalu dipengaruhi oleh fluktuasi *backwater*. Owens et al. (2011) menambah kemampuan dari model 2D CE-QUAL-W2 untuk mensimulasi efek dari arus dan gelombang terhadap resuspensi sedimen. Zhang et al. (2011) menghitung sedimentasi di Waduk Sanzuodian dan Waduk Daxia. Souza et al. (2010) membuat model fisik dan model numerik untuk angkutan sedimen di waduk dangkal. Dufresne et al. (2010) membuat model fisik untuk meneliti pengendapan yang terjadi akibat pola aliran utama dan pengaruh dari pola aliran utama terhadap trap efisiensi pada waduk dangkal. Effler et al. (2006) meneliti dampak kejadian limpasan pada padatan tersuspensi eksternal yang diangkut ke Schoharie Reservoir, New York, dan menilai pola hamburan cahaya dan pengendapan sedimen dalam waduk. Wang et al. (2010) menganalisis hubungan kekeruhan dengan status hidrologi untuk memahami variasi kekeruhan dalam kolom air dari waduk Liuxihe. Atmojo (2012) melakukan penelitian untuk menentukan tinggi muka air efektif pada penggelontoran sedimen muka air tinggi atau dengan tekanan (*pressure flushing*) pada tampungan sedimen (prototipe Waduk Wonogiri) berdasar uji model hidrolik fisik (*Hydraulic physical model test*).

Berdasarkan uraian diatas, ringkasan posisi penelitian dapat dilihat pada Gambar 2-3.



Gambar 2-3. Ringkasan Posisi Penelitian

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Operasi Waduk

Pada tahap perencanaan waduk, peraturan operasi (*operating rule*) biasanya telah direncanakan dan digunakan sebagai pedoman pengoperasian waduk untuk pelepasan/ *release* guna memenuhi kebutuhan/ *demands* rencana. Pengaturan pemanfaatan air waduk didasarkan atas pertimbangan sumber daya yang tersedia dan kebutuhan air yang diperlukan, agar dapat memenuhi kebutuhan air maka pemanfaatan air waduk harus didasarkan pada pengoperasian yang optimum berdasarkan hasil analisis.

Untuk waduk yang dioperasikan untuk melayani lebih dari satu tujuan, menurut Jain and Singh (2003) cenderung akan menimbulkan konflik, yaitu konflik dalam pemanfaatan ruang tampungan waduk, konflik dalam pemanfaatan airnya untuk memenuhi berbagai tujuan yang masing – masing mempunyai variasi berbeda, dan konflik dalam pendistribusian air untuk tujuan yang sama. Ada enam permasalahan

pokok yang membutuhkan penyelesaian optimal saat mengembangkan kebijakan operasi waduk. Kebijakan operasi akan menjadi pedoman bagi operator untuk menyelesaikan konflik yang muncul. Kata kunci dalam pengelolaan waduk multi tujuan adalah kompromi.

Dalam optimasi operasi waduk diawali dengan mendefinisikan fungsi tujuan (*Objective Function*) yang merupakan pernyataan kuantitatif dari kasus optimasi, misalnya meminimalkan selisih antara target dan kebutuhan air, memaksimalkan energi memaksimalkan benefit, meminimumkan biaya operasi dan lain-lainnya. Kemudian ditentukan variabel keputusan, kendala dan parameter sesuai sistim waduknya. Sebagai contoh untuk meminimalkan selisih antara target dan kebutuhan air maka fungsi tujuannya dapat dirumuskan sebagai Persamaan (2-1).

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N |T_i - U_i| \quad (2-1)$$

dimana:

T_i = Target kebutuhan air pada periode i (m^3)

U_i = Pelepasan waduk pada periode i (m^3)

Z = fungsi tujuan

i = periode yang ditinjau = $1, 2, \dots, N$

N = banyaknya periode yang ditinjau

Untuk sistim waduk dimana pelepasan untuk irigasi dan kebutuhan air baku terpisah dengan pelepasan untuk kebutuhan PLTA, maka hubungan kondisi tampungan waduk dari satu periode ke periode berikutnya dinyatakan sebagai berikut (ReVelle, 1999).

$$X_{i+1} = X_i + I_i - SO_i - q_i - p_i - z_i \quad (2-2)$$

dimana:

X_{i+1} = Volume tampungan waduk pada awal periode $i+1$ (m^3)

X_i = Volume tampungan waduk pada awal periode i (m^3)

I_i = inflow waduk pada periode i (m^3)

SO_i = limpasan waduk pada periode i (m^3)

$SO_i = 0$ jika $X_i + I_i \leq c_n$

$SO_i = X_i + I_i - T_i - c_n$ jika $X_i + I_i > c_n$

T_i = Target kebutuhan air pada periode i (m^3)

c_n = kapasitas tampungan waduk pada elevasi puncak *spillway*, apabila *spillway*

berpintu maka merupakan kapasitas tampungan waduk pada batas elevasi maksimum dimana pintu harus dibuka (m^3)

qi = pelepasan untuk kebutuhan air baku pada periode i (m^3)

pi = pelepasan untuk kebutuhan PLTA pada periode i (m^3)

zi = pelepasan untuk kebutuhan air irigasi pada periode i (m^3)

Persamaan kendala yang membatasi jumlah air maksimum yang boleh ditampung waduk pada periode i , untuk memberikan ruang tampungan guna pengendalian banjir dinyatakan sebagai Persamaan (2-3).

$$X_i \leq c - v_i \quad (2-3)$$

dimana:

X_i = Volume tampungan waduk pada awal periode i (m^3)

c = total kapasitas tampungan waduk (m^3)

v_i = tampungan waduk yang disediakan untuk pengendalian banjir pada periode i (m^3)

Persamaan kendala untuk mencegah kekurangan air dinyatakan dengan Persamaan (2-4).

$$X_N \geq X_0 \quad (2-4)$$

dimana:

X_0 = Volume tampungan akhir waduk pada awal operasi (m^3)

X_N = Volume tampungan akhir waduk pada akhir operasi (m^3)

Persamaan (2-5) diperlukan untuk membatasi aliran maksimum yang dapat melalui turbin.

$$p_i \leq p_{max} \quad (2-5)$$

dimana:

p_{max} = Kapasitas debit turbin maksimal (m^3)

pi = pelepasan untuk kebutuhan PLTA pada periode i (m^3)

Persamaan (2-6) menyatakan energi yang dapat dihasilkan pada periode i .

$$\frac{d_i}{p_i} - \left(\frac{\alpha m}{2}\right) X_i - \left(\frac{\alpha m}{2}\right) X_{i+1} \leq \alpha h_o \quad (2-6)$$

dimana:

d_i = energi yang diperlukan pada periode i (KwH)

α = faktor daya = $2,73 \times 10^{-3}$ x efisiensi

m = kemiringan dari persamaan lengkung elevasi-tampungan waduk

h_o = Tinggi muka air waduk di atas turbin - awal (m)

X_{i+1} = Volume tampungan waduk pada awal periode $i+1$ (m^3)

X_i = Volume tampungan waduk pada awal periode i (m^3)

Pelepasan untuk irigasi dan kebutuhan air baku langsung diambil dari waduk. Pelepasan untuk kebutuhan PLTA hanya dimanfaatkan energi potensialnya saja dan volume airnya kembali masuk ke sungai di hilir. Sehingga untuk pemeliharaan sungai dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-7).

$$p_i + SO_i \geq f_i \quad (2-7)$$

dimana:

p_i = pelepasan untuk kebutuhan PLTA pada periode i (m^3)

SO_i = limpasan waduk pada periode i (m^3)

f_i = pemeliharaan sungai pada periode bulan i (m^3)

Untuk membatasi jumlah air yang dilepas untuk memenuhi kebutuhan air baku dan air irigasi dinyatakan dengan Persamaan (2-8).

$$q_i + z_i \leq T_i \quad (2-8)$$

dimana:

q_i = pelepasan untuk kebutuhan air baku pada periode i (m^3)

z_i = pelepasan untuk kebutuhan air irigasi pada periode i (m^3)

T_i = Target kebutuhan air pada periode i (m^3)

2.2.1.1 Program Dinamik

Program Dinamik digunakan untuk optimalisasi pengambilan keputusan berangakai (*sequential decision problems*). Menurut Nandalal and Bogardi (2007) keputusan optimal untuk sistem yang berada pada *state* X_j dan *stage* i dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-9) berikut :

$$F_i(X_j) = \max \text{ or } \min_{U_k} [f_i(X_j, U_k) + F_{i+1}(X_{j+1})] \quad (2-9)$$

dimana :

$F_i(X_j)$ = hasil optimal yang diperoleh dari *stage i* jika pada *stage i* sistem berada pada *state X_j*

$f_i(X_j, U_k)$ = hasil yang diperoleh pada *stage i* jika sistem berada pada *state X_j* dan keputusan yang diambil adalah U_k . Suku ini disebut sebagai *immediate return*

$F_{i+1}(X_{j+1})$ = hasil optimal yang diperoleh dari *stage i+1* jika pada *stage i+1* (pada *stage* sebelumnya) sistem berada pada *state X_{j+1}*. Suku ini disebut sebagai *longterm return*

Model program dinamik diselesaikan dengan evaluasi secara mundur (*backward solution*) untuk memperoleh keputusan optimal pada setiap *stage* pada masing-masing *state* yang mungkin terjadi. *Backward solution* (lihat Gambar 2-4) dimulai dengan hitungan optimasi pada *stage* terakhir (*stage N*). Untuk menyelesaikan problem pada *stage* berikutnya ($N-1$) dipergunakan hasil optimal yang diperoleh pada *stage N*. Prosedur yang sama dapat diteruskan sampai dengan problem pada *stage 1*. Hasil yang diperoleh pada *backward solution* dapat digambarkan sebagai tabulasi semua *state* yang mungkin atau layak ditinjau dengan keputusan optimalnya untuk setiap *stage*. Prosedur selanjutnya adalah penyelesaian langkah maju (*forward solution*) untuk memperoleh kebijakan optimal sebagai petunjuk penentuan keputusan optimal (lihat Gambar 2-5).

Nandalal and Bogardi (2007) menyatakan bahwa untuk waduk ganda diperlukan penentuan kebijakan operasi waduk secara simultan. Hal ini penting karena apabila kebijakan operasi ditentukan sendiri – sendiri maka hasilnya tidak akan optimal. Pada waduk ganda lebih cocok digunakan teknik algoritma *Incremental Dynamic Programming* (IDP) karena bila digunakan program dinamik konvensional akan menemui masalah *curse of dimensionality* (memerlukan waktu *running* dan memori komputer yang besar karena banyaknya perulangan dalam proses perhitungannya). IDP dapat mengurangi waktu dan memori komputer yang diperlukan dalam optimasi. Untuk menggunakan teknik IDP ini terlebih dahulu harus ditentukan kurva operasi waduk awal (*Initial trajectory*). Berdasarkan *Initial trajectory* ini kemudian dibuat titik koridor dengan menambah dan atau mengurangi *Initial trajectory* dengan setengah lebar koridor

yang ditentukan. Sehingga akan didapatkan 3^n titik diskrit tampungan waduk pada tiap tahap iterasi, dimana n adalah jumlah waduk. Gambar 2-6 menunjukkan cara membuat koridor dengan IDP. Umumnya koridor dibuat simetris disekitar *Initial trajectory*. Koridor yang asimetris mungkin ada jika batas koridor melebihi batas maksimum atau batas minimum dari kendala batas tampungan waduk. Pada tahap awal digunakan lebar koridor yang besar, kemudian lebar koridor yang lebih kecil dapat digunakan untuk siklus berikutnya. Berdasarkan koridor ini kemudian dilakukan uji coba secara berulang-ulang hingga didapatkan kurva operasi yang memenuhi fungsi tujuan. Setelah koridor ditentukan kemudian dicari *optimal trajectory* dan nilai fungsi tujuan dengan menggunakan algoritma program dinamik konvensional dalam batas transformasi keadaan sesuai nilai variabel keadaan yang ditentukan dalam koridor. Sesudah iterasi terakhir pada tiap siklus tentukan nilai konvergensi dari algoritma untuk menentukan penyelesaian yang optimal dengan menggunakan Persamaan (2-10). Prosedur algoritma IDP yang lengkap dapat dilihat pada Gambar 2-7.

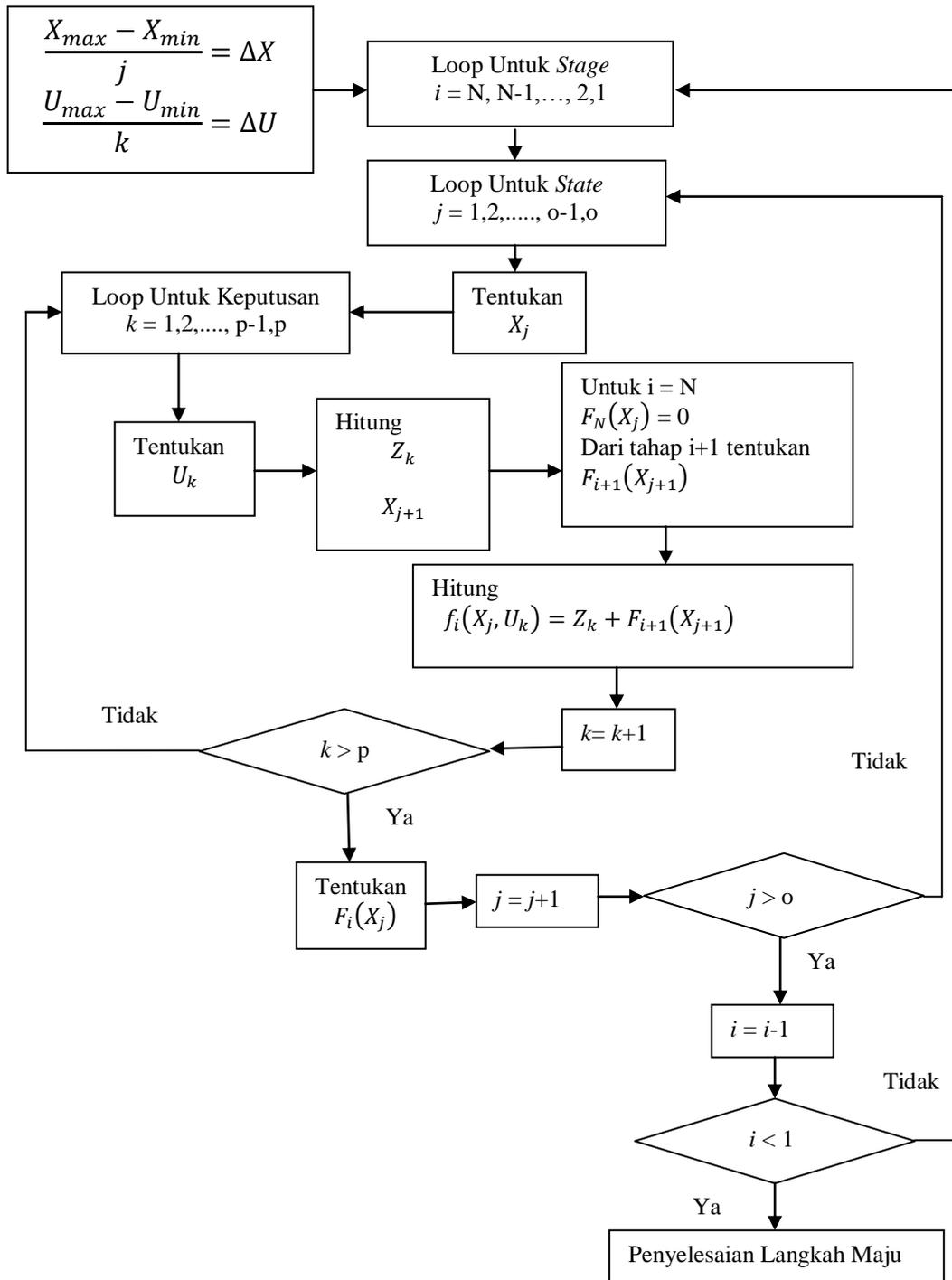
$$0,0001 \geq \frac{|F_j^* - F_{j-1}^*|}{F_{j-1}^*} \quad (2-10)$$

dimana :

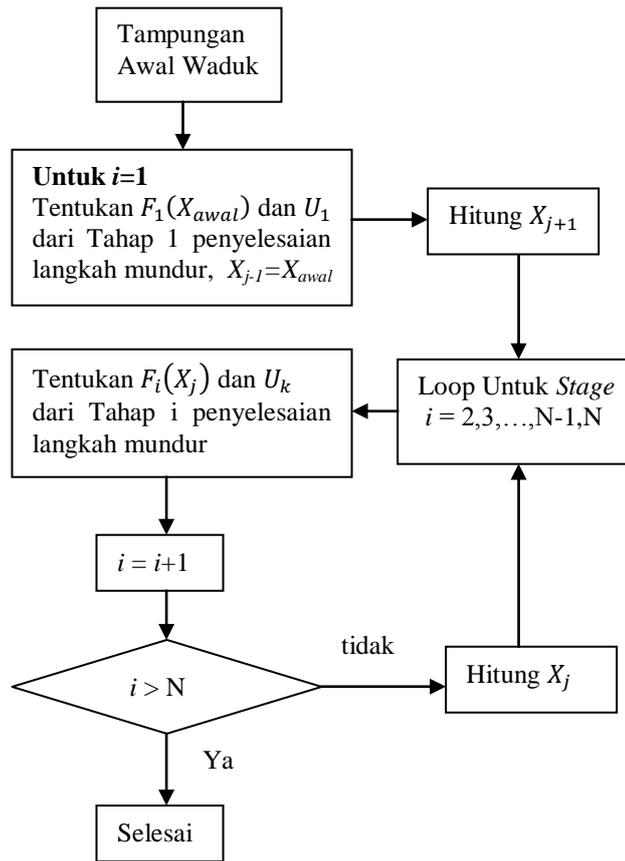
F_j^* = hasil dari *optimal trajectory* untuk siklus ke j

2.2.1.2 Kinerja Waduk

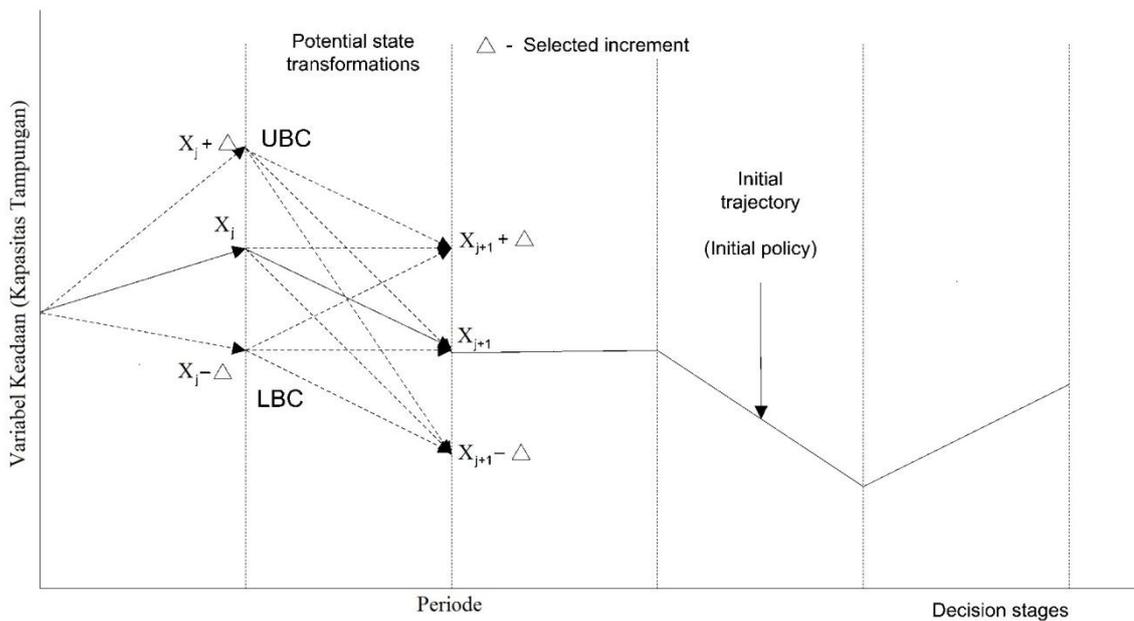
Kinerja Pengoperasian Waduk merupakan indikator waduk dalam pengoperasiannya untuk memenuhi kebutuhan air irigasi, air baku air minum dan industri serta pemeliharaan sungai. Beberapa indikator untuk menilai besarnya *performance* operasi waduk adalah keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*) dan kerawanan (*vulnerability*). Keandalan digunakan untuk mengukur kemampuan waduk dalam memenuhi target kebutuhan selama masa operasi waduk. Kelentingan digunakan untuk mengukur kemampuan waduk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan bahwa waduk lebih lenting sehingga dampak dari kegagalan lebih kecil. Kerawanan digunakan untuk mengukur besaran kegagalan (Suharyanto, 1997).



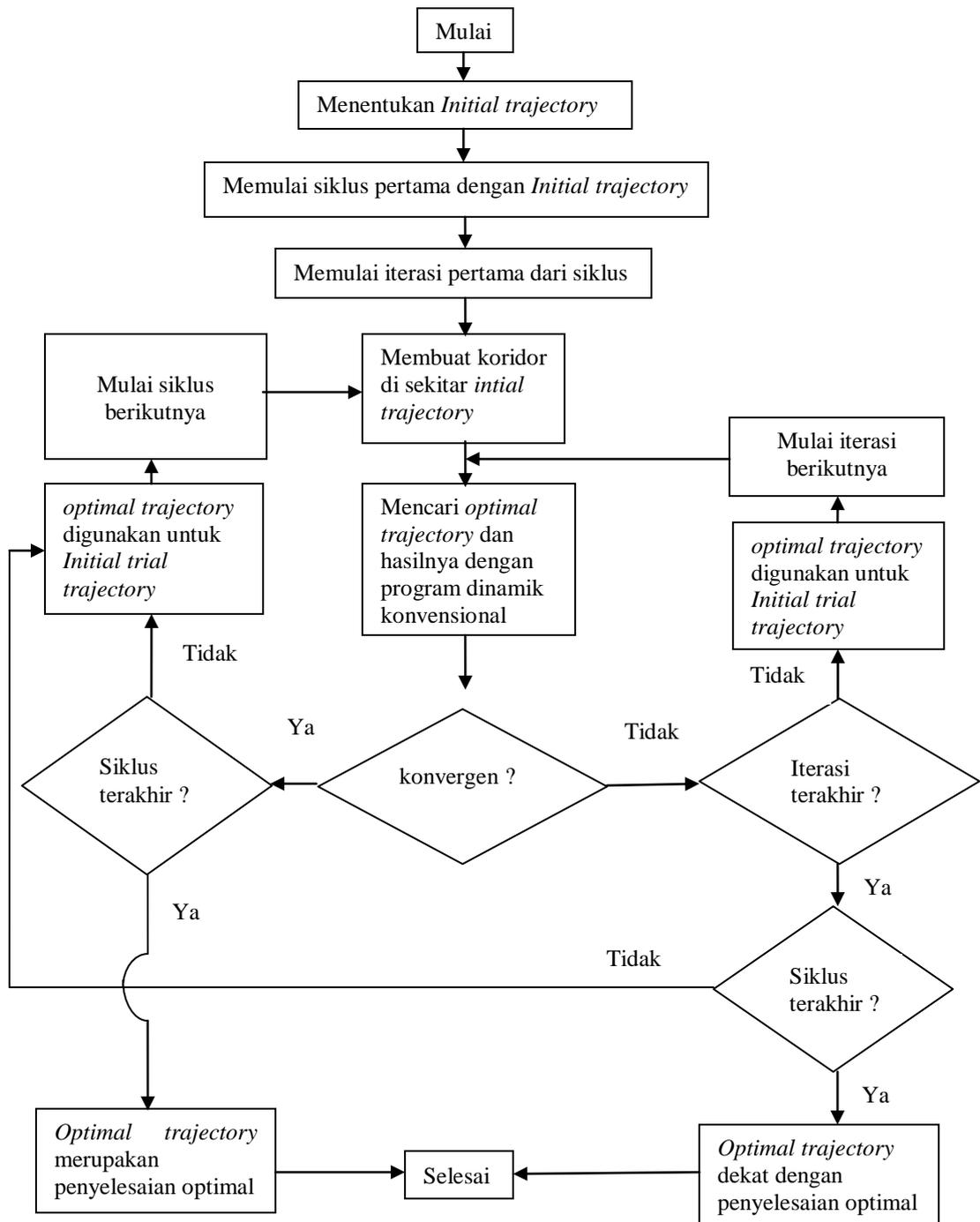
Gambar 2-4. Penyelesaian Langkah Mundur (*Backward Solution*) dalam Program Dinamik (Hasil Analisis)



Gambar 2-5. Penyelesaian Langkah Maju (*Upward Solution*) Dalam Program Dinamik (Hasil Analisis)



Gambar 2-6. Cara Membuat Koridor (Nandalal and Bogardi, 2007)



Gambar 2-7. Prosedur Perhitungan IDP (Nandalal and Bogardi, 2007)

1) Keandalan

Keandalan waduk dapat dituliskan seperti pada Persamaan (2-11) dan Persamaan (2-12).

$$Z_i = \begin{cases} 100\% & \text{untuk } U_i \geq T_i \\ 0 & \text{untuk } U_i \leq T_i \end{cases} \quad (2-11)$$

$$Z_i = \begin{cases} 100\% & \text{untuk } U_i \geq T_i \\ \frac{U_i}{T_i} \times 100\% & \text{untuk } U_i \leq T_i \end{cases} \quad (2-12)$$

Pada Persamaan (2-11) waduk dianggap gagal total apabila tidak dapat memenuhi 100% kebutuhan airnya. Sedang pada Persamaan (2-12) meskipun waduk tidak dapat memenuhi 100% kebutuhan airnya, waduk tidak dianggap gagal total, waduk dianggap hanya dapat memenuhi sebagian dari kebutuhannya. Pada penelitian ini kita gunakan keandalan pada Persamaan (2-12).

Dalam jangka panjang, nilai keandalan sistem dapat ditulis sebagai Persamaan (2-13) berikut :

$$Z_N = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \quad (2-13)$$

Dimana :

- Z_i = keandalan waduk pada periode i
- Z_N = keandalan waduk jangka panjang
- N = banyaknya periode yang ditinjau
- U_i = pelepasan pada periode i
- T_i = target kebutuhan air pada periode i

2) Kelentingan

Kelentingan waduk dapat dituliskan seperti pada Persamaan (2-14).

$$Kelentingan = \frac{1}{T_{gagal}} \quad (2-14)$$

Jangka waktu rerata waduk dalam keadaan gagal secara kontinu dapat dituliskan pada Persamaan (2-15) berikut.

$$T_{gagal} = \frac{\sum_{i=1}^N (1-Z_i)}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (2-15)$$

Dalam jangka panjang, jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinyu dapat dituliskan sebagai Persamaan (2-16) berikut:

$$T_{gagal} = \frac{1-Z_N}{\bar{W}} \quad (2-16)$$

Perhitungan masa transisi dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan dituliskan pada Persamaan (2-17) berikut :

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{jika } U_{i-1} \leq T_{i-1} \text{ dan } U_i \geq T_i \\ 0 & \text{jika selain keadaan diatas} \end{cases} \quad (2-17)$$

Dalam jangka panjang, nilai rerata dari “Wt” akan menunjukkan jumlah rerata terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan. Jumlah rerata terjadinya transisi ini dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-18).

$$\bar{W} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \quad (2-18)$$

Dimana :

T_{gagal} = jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinyu

W_i = masa transisi dari kondisi gagal ke kondisi sukses pada periode i

\bar{W} = probabilitas (rerata frekwensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan

3) Kerawanan

Kerawanan sebagai nilai kekurangan air pelepasan dari kebutuhannya dapat dituliskan dalam Persamaan (2-19) berikut.

$$DEF_i = \begin{cases} T_i - U_i & \text{jika } U_i \leq T_i \\ 0 & \text{jika } U_i \geq T_i \end{cases} \quad (2-19)$$

Kinerja kerawanan dapat dirumuskan dengan berbagai penafsiran sebagai dalam Persamaan (2-20) sampai Persamaan (2-22) berikut.

$$v_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{DEF_i}{T_i} \right)}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (2-20)$$

$$v_2 = \max_i \left\{ \frac{DEF_i}{T_i} \right\} \quad (2-21)$$

$$v_3 = \max_i \{ DEF_i \} \quad (2-22)$$

Dimana :

DEF_i = variabel kekurangan (*deficit*) pada periode ke-i

v_1 = nilai rata-rata *deficit ratio*

v_2 = nilai maksimum *deficit ratio*

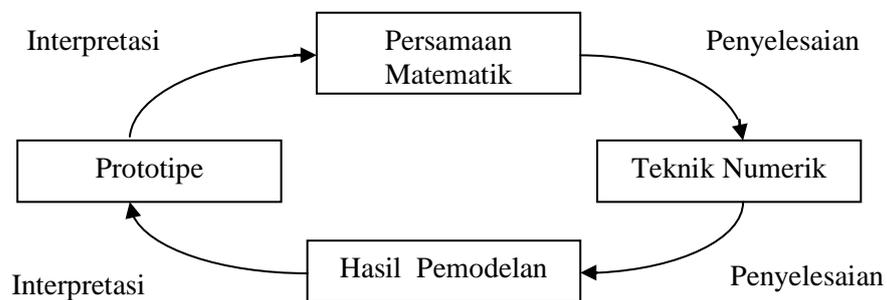
v_3 = nilai maksimum *deficit*

2.2.2 Pemodelan Sedimentasi Waduk

Menurut Simoes and Yang (2008) sirkulasi yang terjadi dalam waduk pada umumnya multi dimensi, *non uniform* dan *unsteady*. Hal ini dipengaruhi kondisi hidrologi waduk dan DTA, iklim, fisiografi, morfologi waduk dan operasi waduk. Mekanisme proses sedimentasi yang terjadi di waduk cukup kompleks. Oleh karena itu simulasi numerik merupakan metode yang paling efisien dan praktis untuk memprediksi transportasi sedimen dalam sistem hidrodinamika kompleks (James et al., 2010). Untuk waduk sempit memanjang dengan arah aliran seperti sungai, lebih tepat digunakan model 1D, sedang untuk waduk yang lebar dan tanpa arah aliran yang jelas lebih tepat digunakan model multi dimensi. Model 3D lebih tepat digunakan apabila diperlukan struktur aliran 3D misalnya untuk mengetahui penyebaran sedimen ataupun polutan di air, geseran dasar dan perubahan momentum lateral serta *density driven flow* (Simoes and Yang, 2008). Model 3D diperlukan untuk memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai arus dan gerak sedimen di sekitar struktur hidrolis, karena gerak aliran dan sedimen pada dasarnya tiga dimensi, meskipun model 2D telah berkembang pesat dan digunakan untuk memecahkan masalah sedimen di bidang teknik hidrolis (Lu dan Wang, 2009). Menurut Vreugdenhil (1994) model Numerik 3D digunakan apabila perkiraan yang dibuat dalam model 2D tidak valid, khususnya untuk gesekan dasar dan pertukaran momentum lateral, penyebaran polutan dalam air karena penyebaran partikel oleh kecepatan berbeda dalam arah vertikal (adveksi diferensial atau dispersi geser) dan perbedaan kepadatan.

Proses pemodelan numerik cukup kompleks dan cenderung terjadi kesalahan. Keputusan yang teliti harus dilakukan pada tiap tahap. Pemodelan diawali dengan mendefinisikan data dan pengetahuan dari prototipe (lihat Gambar 2-8). Data menggambarkan kondisi batas seperti batimetri, debit, distribusi ukuran partikel sedimen, vegetasi dan lain-lainnya. Pengetahuan berisi proses fisik yang diketahui untuk menentukan perilaku sistem seperti aliran turbulen, mekanisme transport sedimen, proses pencampuran dan lain-lainnya. Interpretasi awal dari semua proses fisik sesuai yang teridentifikasi dalam prototipe dirubah kedalam bentuk persamaan

pengaruh, yang disusun kedalam suatu persamaan matematik. Persamaan matematik merupakan pendekatan pertama dari permasalahan, pada tahap ini dilakukan penyederhanaan – penyederhanaan misal *steady vs unsteady*, 1D vs 2D vs 3D, turbulensi. Tahap berikutnya adalah menyelesaikan persamaan – persamaan pengaruh (persamaan matematik) yang membentuk model (*governing equation*) dengan teknik numerik misalnya dengan *finite difference*, *finite element* dan *finite volume*. Pada tahap ini persamaan – persamaan diferensi parsial ditransformasikan ke dalam persamaan – persamaan aljabar melalui pendekatan – pendekatan misalnya dengan deret Taylor. Tahap berikutnya menyelesaikan hasil teknik numerik dengan bantuan komputer dan akan didapatkan hasil pemodelan. Tahap akhir adalah menginterpretasikan hasil yang didapat kedalam prototipe (Simoes and Yang, 2008).

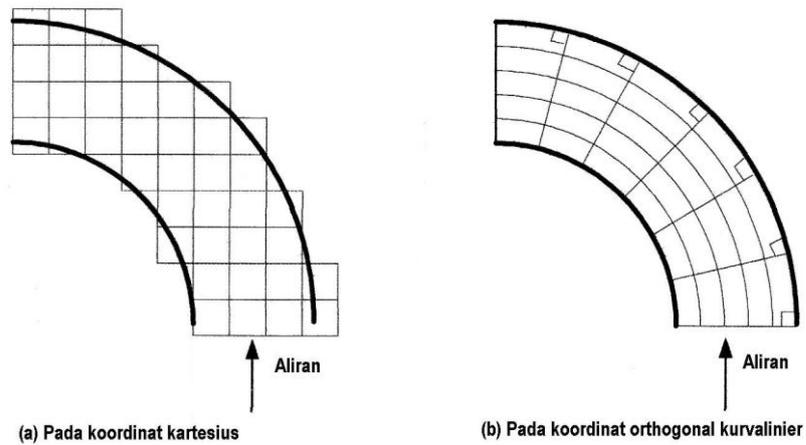


Gambar 2-8. Siklus Pemodelan Numerik (Simoes and Yang, 2008)

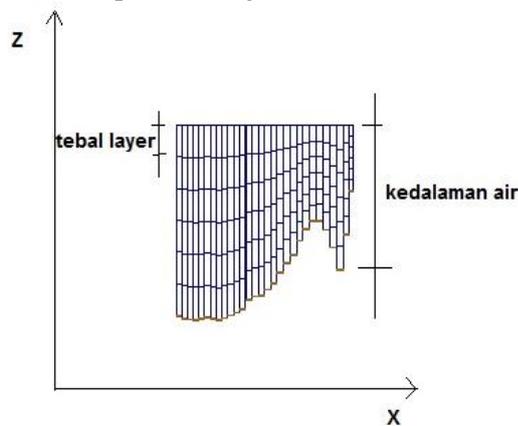
Penelitian disertasi ini menggunakan software EFDC. EFDC adalah model untuk simulasi tiga dimensi (3D) dari aliran, angkutan, dan proses biogeokimia dalam sistem air permukaan dalam hal ini termasuk: sungai, danau, muara, waduk, rawa, dan pantai-pesisir. EFDC mampu mensimulasikan angkutan sedimen kohesif dan non-kohesif, debit dari berbagai sumber dalam jarak dekat ataupun jauh, angkutan dan kandungan kontaminan beracun dalam fase air dan sedimen dan proses oksigen/ nutrisi terlarut (eutrofikasi). EFDC menyelesaikan persamaan 3D, *unsteady*, permukaan bebas dan persamaan turbulensi rata-rata gerak untuk variabel kepadatan fluida. Perangkat tambahan khusus untuk proses hidrodinamika meliputi resistensi vegetasi, pengeringan dan pembasahan (*drying and wetting*), representasi struktur hidrolik, interaksi gelombang arus lapis batas dan gelombang penyebab arus. EFDC telah diuji secara ekstensif dan saat ini telah banyak digunakan oleh universitas, pemerintah, dan organisasi konsultan teknik dan lingkungan (Craig, 2012).

2.2.2.1 Sistem Grid

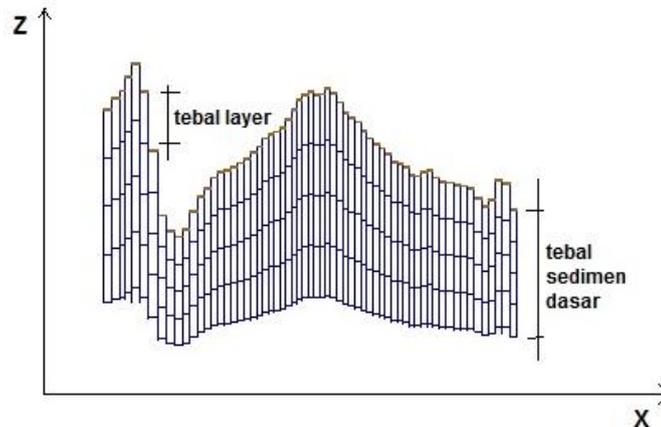
Sistem grid yang digunakan dalam EFDC adalah grid Cartesian dan grid *curvelinier* dengan ukuran sel seragam maupun bervariasi, yang dapat diputar dan dirapikan untuk menyesuaikan dengan keadaan fisiknya (lihat Gambar 2-9 sampai dengan Gambar 2-11). Untuk grid *curvelinier* hanya dapat digunakan untuk bentuk *riverine* (saluran) saja. Kualitas grid/ orthogonalitas dari model grid ditunjukkan dengan nilai *orthogonal deviation*-nya, model grid orthogonal sempurna bila sudut deviasi pada tiap titik potong grid besarnya 0^0 . Pembuatan grid dalam EFDC ini nilai *orthogonal deviation* -nya dibuat $< 3^0$ sehingga grid yang dihasilkan representatif dan efisien dalam perhitungan (Craig, 2012).



Gambar 2-9. Sistem Grid pada bidang horizontal (Kementerian PU, 2007c)



Gambar 2-10. Sistem Grid Pada Bidang Vertikal Untuk Kolom Air



Gambar 2-11. Sistem Grid Pada Bidang Vertikal Untuk Lapisan Sedimen

2.2.2.2 Sistem Koordinat

Koordinat vertikal menggunakan sistem koordinat *Stretched* atau sigma untuk memberikan resolusi yang seragam dalam arah vertikal, sejajar dengan vektor gravitasi dan dibatasi oleh topografi dasar dan permukaan bebas yang memungkinkan gerakan gelombang panjang. Koordinat horisontal menggunakan sistem koordinat kurvalinier orthogonal untuk mengakomodasi batasan horisontal yang realistis (Craig, 2012).

2.2.2.3 Diskritisasi

Diskritisasi pada bidang horisontal didapatkan dengan membagi panjang sumbu X dengan jumlah diskrit dan membagi panjang sumbu Y dengan jumlah diskrit, sehingga akan diperoleh jumlah sel dalam bidang horisontal. Diskritisasi pada bidang vertikal ada dua, yaitu pada kolom air dan pada sedimen dasar. Pada kolom air untuk mendapatkan diskritisasi, kedalaman air dibagi dengan jumlah *layer*. Pada sedimen dasar untuk mendapatkan diskritisasi, ketebalan sedimen dibagi dengan jumlah *layer*. Sedangkan diskritisasi terhadap waktu ditentukan oleh nilai *time step*-nya.

2.2.2.4 Persamaan Pembentuk Model Sedimentasi Waduk

EFDC menyelesaikan hidrostatika, permukaan bebas, persamaan Reynolds-averaged Navier-Stokes dengan pendekatan turbulen (James et al., 2010). Berdasarkan Tetra Tech (2007a, 2007b) persamaan momentum tiga dimensi dalam sistem koordinat vertikal sigma dan koordinat horizontal *curvelinier orthogonal* adalah seperti pada Persamaan (2-23) sampai dengan Persamaan (2-26).

Persamaan Momentum

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y H u) + \partial_x(m_y H u u) + \partial_y(m_x H v u) + \partial_z(m_x m_y w u) - f_e m_x m_y H v = \\ & -m_y H \partial_x(p + p_{atm} + \Phi) + m_y (\partial_x z_b^* + z \partial_x H) \partial_z p + \partial_z \left(m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z u \right) + \\ & \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \partial_x u \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y u \right) - m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} u \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y H v) + \partial_x(m_y H u v) + \partial_y(m_x H v v) + \partial_z(m_x m_y w v) - f_e m_x m_y H u = \\ & -m_x H \partial_y(p + p_{atm} + \Phi) + m_x (\partial_y z_b^* + z \partial_y H) \partial_z p + \partial_z \left(m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z v \right) + \\ & \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \partial_x v \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y v \right) - m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} v \end{aligned} \quad (2-24)$$

$$m_x m_y f_e = m_x m_y f - u \partial_y m_x + v \partial_x m_y \quad (2-25)$$

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = \frac{A_v}{H} \partial_z (u, v) \quad (2-26)$$

Dimana :

- u = komponen kecepatan horisontal arah sumbu x di dimensi *curvelinier orthogonal* (m/dt)
- v = komponen kecepatan horisontal arah sumbu y di dimensi *curvelinier orthogonal* (m/dt)
- m_x = faktor skala koordinat horizontal arah sumbu x
- m_y = faktor skala koordinat horizontal arah sumbu y
- w = kecepatan vertikal dalam koordinat vertikal *stretched z* (m/dt)
- z_s^* = Koordinat vertikal fisik permukaan bebas
- z_b^* = Koordinat vertikal fisik dasar waduk
- H = Total kedalaman kolom air (m)
- Φ = *free surface potential* = $g z_s^*$.
- f_e = Percepatan Coriolis efektif (m/dt²), menggabungkan bentuk percepatan kelengkungan dengan parameter Coriolis, f, menurut Persamaan (2-25).
- A_v = viskositas turbulen arah bidang vertikal (m²/dt)
- A_H = viskositas turbulen arah bidang horisontal (m²/dt)

- c_p = koefisien resistensi
- D_p = proyeksi tak berdimensi area vegetasi normal terhadap aliran per satuan luas horisontal.
- p_{atm} = tekanan atmosfer (N/m^2), direferensikan ke densitas air, sedangkan tekanan hidrostatik berlebih dalam kolom air diberikan oleh Persamaan (2-27).

$$\partial_z p = -gHb = -gH \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \quad (2-27)$$

di mana

- ρ = rapat massa air (kg/m^3)
- ρ_0 = rapat massa air acuan (kg/m^3)
- b = *bouyancy* (N)

Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas tiga dimensi dalam sistem koordinat vertikal sigma dan koordinat horizontal *curvelinier orthogonal* dituliskan pada Persamaan (2-28).

$$\partial_t(m_x m_y H) + \partial_x(m_y H u) + \partial_y(m_x H v) + \partial_z(m_x m_y w) = Q_H + \delta(0)(Q_{SS} + Q_{SW}) \quad (2-28)$$

dengan Q_H adalah volume *sources* dan *sinks* termasuk curah hujan, penguapan, dan lateral inflow dan outflow dengan mengabaikan perubahan momentum. Q_{SS} dan Q_{SW} adalah perubahan volumetrik bersih sedimen dan air dari dasar dan kolom air, yang didefinisikan positif apabila perubahan dari dasar ke kolom air ketika model beroperasi dalam mode geomorfologi. Fungsi delta $\delta(0)$ menunjukkan perubahan ini memasuki lapisan bawah dari kolom air.

Suspended Load

Persamaan *convection-diffusion* transportasi umum untuk bahan terlarut atau tersuspensi yang memiliki massa per satuan konsentrasi volume C adalah seperti Persamaan (2-29) (Tetra Tech, 2007b ; James et al., 2010) :

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y H C) + \partial_x(m_y H u C) + \partial_y(m_x H v C) + \partial_z(m_x m_y w C) - \\ & \partial_z(m_x m_y w_{sc} C) = \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H K_H \partial_x C \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H K_H \partial_y C \right) + \partial_z \left(m_x m_y \frac{K_V}{H} \partial_z C \right) + \\ & Q_c \end{aligned} \quad (2-29)$$

dimana :

K_V = koefisien difusi turbulen arah bidang vertikal

K_H = koefisien difusi turbulen arah bidang horisontal

w_{sc} = kecepatan pengendapan positif (m/dt)

Q_c = eksternal *sources* dan *sinks* dan internal reaktif *sources* dan *sink* (m³)

Bed Load

Persamaan konservasi massa untuk sedimen dasar adalah Persamaan (2-30).

$$\partial_t(S^m B)_n = -\delta(n, n_t)J_{SB}^m + \alpha_A \delta(n, n_t)J_{PA}^m - \alpha_A \delta(n, n_t - 1)J_{PA}^m \quad (2-30)$$

dimana :

S = konsentrasi massa per total volume dari lapisan dasar n (mg/l)

B = ketebalan lapisan sedimen dasar (m)

J_{SB} = perubahan bersih massa sedimen, massa per satuan luas dan per satuan waktu, nilainya positif untuk perubahan dari dasar ke kolom air

α_A = parameter armoring (1 untuk armoring, 0 tidak terjadi armoring)

J_{PA} = perubahan lapisan armoring awal ketika lapisan atas atau permukaan dasar, n_t , mulai terjadi armoring.

Indeks m menunjukkan tipe ukuran kelas sedimen *nth*.

Konsentrasi sedimen juga dapat didefinisikan oleh Persamaan (2-31).

$$S^m = \frac{F^m \rho_s^m}{1+\varepsilon} \quad (2-31)$$

di mana :

F = fraksi volume sedimen

ρ_s = rapat massa sedimen (kg/m³)

ε = angka pori

Fraksi volume sedimen didefinisikan sebagai Persamaan (2-32) berikut :

$$F_n^m = \left(\sum_m \left(\frac{S^m B}{\rho_s^m} \right)_n \right)^{-1} \left(\frac{S^m B}{\rho_s^m} \right)_n \quad (2-32)$$

Pemodelan numerik membutuhkan deskripsi dari proses individual yang terlibat dalam transportasi sedimen, khususnya erosi, pengendapan, dan pergerakan sedimen di kolom air. Erosi adalah perubahan partikel dari sedimen dasar ke kolom air di atasnya, dan deposisi adalah perubahan partikel kembali ke sedimen dasar. Gerakan partikel

sedimen di kolom air karena adveksi, dispersi turbulen dan pengendapan. Penurunan laju erosi sedimen seiring dengan waktu, sering disebut sebagai *armoring*, hal ini dapat terjadi karena :

- 1) selama terjadi aliran. konsolidasi sedimen kohesif,
- 2) pengendapan sedimen yang lebih kasar di sedimen dasar selama terjadi aliran, atau
- 3) erosi dari sedimen halus di bagian permukaan, meninggalkan sedimen kasar di bawahnya

Model 3D EFDC mensimulasikan erosi, deposisi, resuspension, *armoring* dan konsolidasi.

Kondisi Batas

Kondisi batas vertikal untuk penyelesaian persamaan momentum adalah tegangan geser kinematik Persamaan (2-26) di dasar dan permukaan. Di permukaan, komponen tegangan x dan y ditentukan oleh tegangan angin di permukaan air (Persamaan (2-33)).

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = c_s \sqrt{U_w^2 + V_w^2} (U_w + V_w) \quad (2-33)$$

$$c_s = 0.001 \frac{\rho_a}{\rho_w} (0.8 + 0.065 \sqrt{U_w^2 + V_w^2}) \quad (2-34)$$

Dimana :

U_w = kecepatan angin arah x pada ketinggian 10 m diatas permukaan air (m/dt)

V_w = kecepatan angin arah y pada ketinggian 10 m diatas permukaan air (m/dt)

c_s = koefisien tegangan angin

ρ_a = rapat massa udara (kg/m^3)

ρ_w = rapat massa air (kg/m^3)

Di dasar, komponen tegangan dikaitkan komponen kecepatan dekat dasar atau lapisan bawah dengan persamaan kuadrat resisten (Persamaan (2-35)).

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_b \sqrt{u_l^2 + v_l^2} (u_l, v_l) \quad (2-35)$$

Dengan asumsi profil kecepatan di dekat bawah adalah logaritmik pada waktunya maka:

$$c_b = \left(\frac{\kappa}{\ln(\Delta_l/2z_0)} \right)^2 \quad (2-36)$$

Dimana :

c_b = koefisien tegangan dasar

u_l = kecepatan di dasar arah x

v_l = kecepatan di dasar arah y

κ = konstanta Von Karman

Δ_l = ketebalan tak berdimensi dari lapis bawah

z_0 = kekasaran dasar tak berdimensi

Kondisi batas vertikal untuk persamaan transport sedimen adalah :

Di permukaan :

$$\frac{K_V}{H} \partial_z C - w_{sc} C = 0 \quad (2-37)$$

Di dasar :

$$\frac{K_V}{H} \partial_z C - w_{sc} C = J_{SB} \quad (2-38)$$

Kondisi Awal

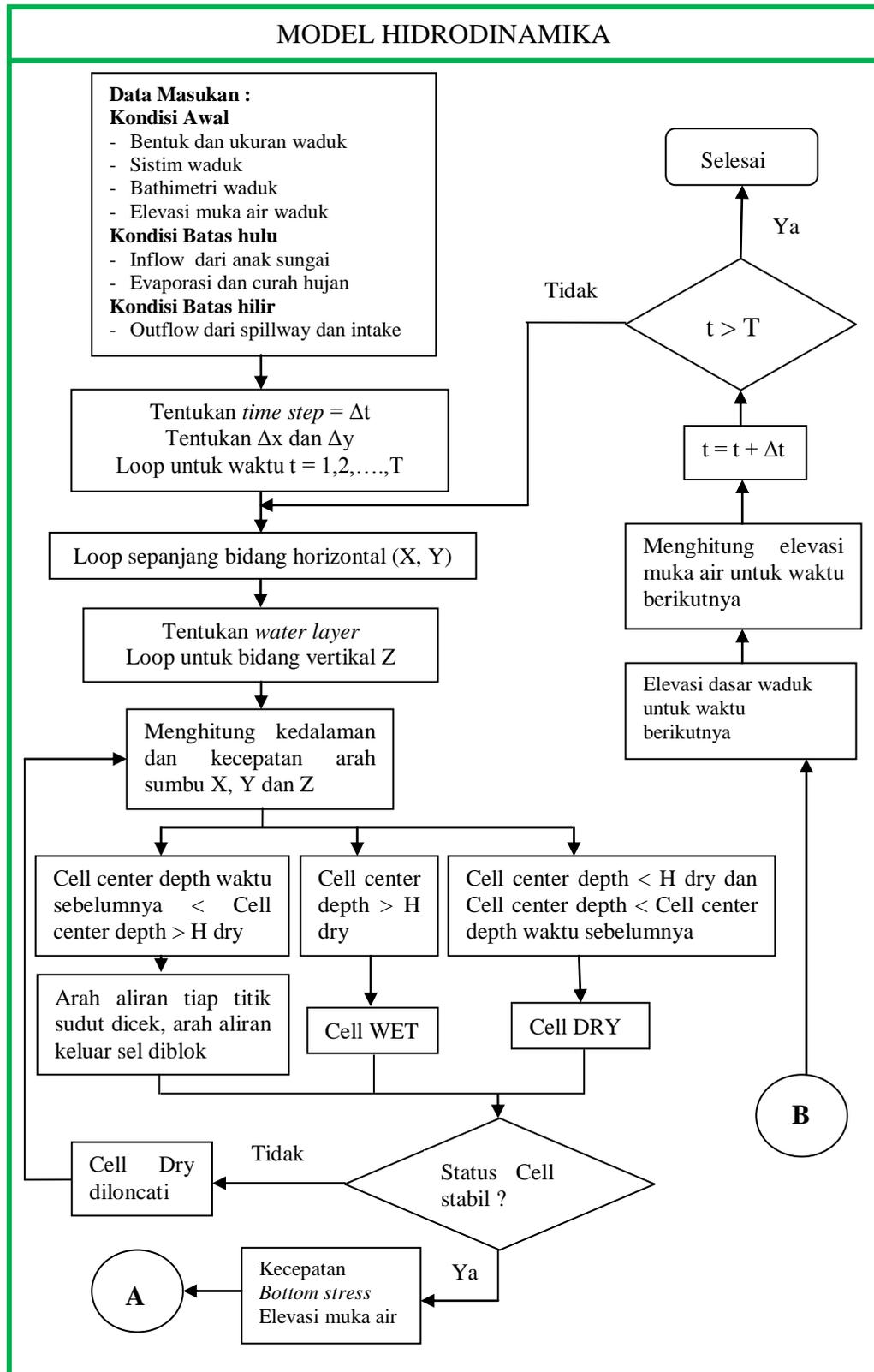
Kondisi awal adalah kondisi batas pada saat $t = 0$, merupakan hasil pengukuran berupa bentuk dan ukuran waduk, sistim waduk, bathimetri waduk, elevasi muka air waduk awal, distribusi ukuran butiran sedimen dasar awal, dan letak lintang.

Batas Berpindah (*Moving Boundary*)

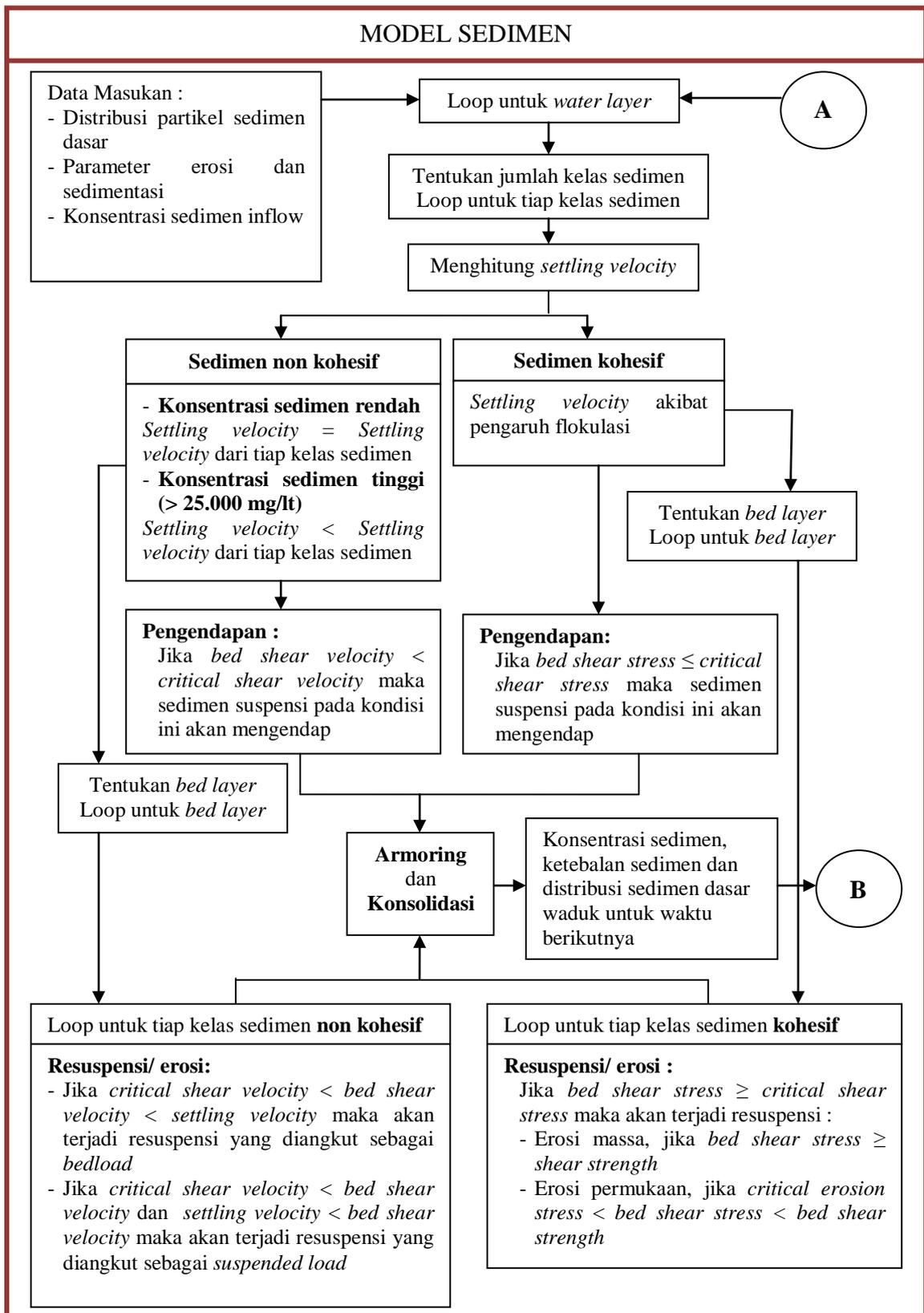
Batas tepian waduk berpindah-pindah karena ada bagian permukaan waduk yang kering saat elevasi muka airnya rendah. Untuk mengatasi hal ini pada model EFDC memungkinkan untuk pengeringan dan pembasahan di daerah dangkal dengan skema konservasi massa (Tetra Tech, 2007a, 2007b).

2.2.2.5 Penyelesaian Numerik

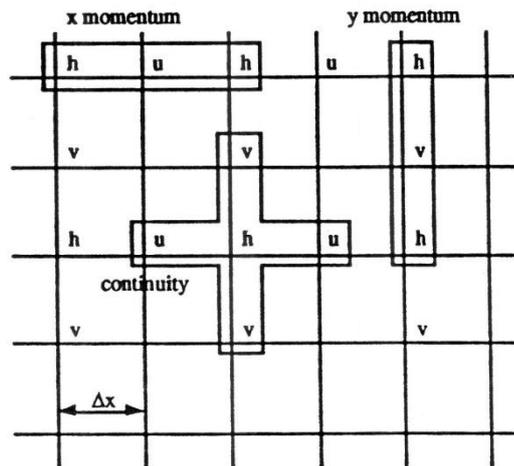
Persamaan momentum dan kontinuitas diselesaikan secara implisit dengan metode *external-internal mode splitting* pada *staggered grid/* grid C (lihat Gambar 2-13) menggunakan kombinasi antara *finite volume* dan *finite difference*. Pada *staggered grid*, tidak perlu mencari semua variabel pada tiap titik, sub bagian yang ditunjukkan pada gambar cukup untuk menyelesaikan persamaan kontinuitas dan momentum (Vreugdenhil, 1994). Persamaan transport sedimen diselesaikan secara implisit dengan *fractional step procedure* (Tetra Tech, 2007a, 2007b). Garis besar proses perhitungan dapat dilihat pada Gambar 2-12.



Gambar 2-12. Proses Perhitungan dalam Perangkat Lunak EFDC (Tetra Tech, 2007a, 2007b)



Gambar 2-12. Proses Perhitungan dalam Perangkat Lunak EFDC (Tetra Tech, 2007a, 2007b) (Lanjutan)



Gambar 2-13. Skema penyelesaian *staggered grid* (Vreugdenhil, 1994)

2.2.2.6 Input Data dan Output

Input data yang diperlukan pada perangkat lunak EFDC adalah :

- 1) Kondisi Awal berupa bentuk dan ukuran waduk, sistim waduk, bathimetri waduk, elevasi muka air waduk awal, distribusi ukuran butiran sedimen dasar awal, dan letak lintang
- 2) Kondisi Batas berupa *inflow* dari masing-masing anak sungai, konsentrasi sedimen inflow, evaporasi dan curah hujan di waduk, *outflow* dari *intake* dan *spillway*
- 3) Parameter model yang bernilai tetap yaitu parameter erosi dan sedimentasi untuk sedimen kohesif (konsentrasi sedimen awal di waduk, *bed mass* awal, *specific volume*, *specific gravity*, *settling velocity*, batas bawah tegangan untuk terjadinya sedimentasi, batas atas tegangan untuk terjadinya erosi, *surface erosion rate*, diameter median), parameter erosi dan sedimentasi untuk sedimen non kohesif (Konsentrasi awal, *Bed mass* awal, *Specific Volume*, *Specific Gravity*, *Settling velocity*, Diameter median, *Critical shear stress* (τ_c), Parameter *Shields*)
- 4) Parameter model yang dirubah yaitu kekasaran dasar, koefisien difusi arah bidang horizontal, koefisien viskositas arah bidang horisontal dan arah bidang vertikal. Rentang nilai parameter dalam kalibrasi berdasarkan EFDC Team (2014) :
 - a) Kekasaran dasar : 0,01 m - 0,1 m
 - b) Koefisien difusi arah bidang horizontal : 0,1-0,25
 - c) Koefisien viskositas arah bidang vertikal : 0,0000001 sampai 0,001 m²/s

- d) Koefisien viskositas arah bidang horisontal : 0,5 sampai 20 m²/s (biasanya 10² – 10⁷ kali lebih besar dari koefisien viskositas arah bidang vertikal)

Output dari Model Hidrodinamika dan Model Sedimen pada perangkat lunak EFDC adalah elevasi dasar waduk, elevasi muka air waduk, kecepatan dan arah aliran, konsentrasi sedimen, ketebalan sedimen dan distribusi sedimen dasar waduk.

2.2.2.7 Stabilitas Model

Stabilitas model dilihat dari nilai delta T Courant- Friedrichs-Lewy (CFL delta). Model stabil apabila nilai *time step* < nilai CFL delta (Tetra Tech, 2007a, 2007b). Untuk model 3 Dimensi CFL dinyatakan dalam Persamaan (2-39).

$$C = \Delta t \frac{u}{\Delta x} + \Delta t \frac{v}{\Delta y} + \Delta t \frac{w}{\Delta z} \leq C_{max} \quad (2-39)$$

Dimana :

$C = CFL$

$\Delta t = time\ step$

$u, v, w =$ komponen kecepatan arah sumbu X, Y dan Z

$\Delta x, \Delta y, \Delta z =$ panjang interval arah sumbu X, Y dan Z

$C_{max} = 1$

2.2.2.8 Kalibrasi

Kalibrasi diperlukan untuk menentukan parameter dari model. Penentuan parameter dimaksudkan untuk meminimalkan ketidakcocokan antara data dan hasil model serta untuk mendapatkan performa model yang terbaik. Untuk mendapatkan model yang andal dan akurat adalah dengan meminimalkan nilai RMS (*Root Mean Square*) dan Rel. RMS (*Relatif Root Mean Square*) (Elci et al., 2007; Jin et al., 2000; Jin et al., 2004). Nilai RMS dan Rel. RMS yang paling minimal (≈ 0) menunjukkan data dan hasil model yang paling cocok.

Kalibrasi dapat dilakukan secara subyektif dengan melihat perbandingan visual dari keluaran model dan data, atau secara obyektif dengan menggunakan ukuran kuantitatif. Kalibrasi yang tersedia di EFDC dapat dilakukan secara visual dengan plotting model-data atau dengan menggunakan parameter statistik pada Persamaan (2-40) sampai Persamaan (2-45) berikut (Craig, 2012).

1) Average Error

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^{Nn} (Od_i - Om_i)}{Nn} \quad (2-40)$$

2) Relative Error

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{Nn} (Od_i - Om_i)}{\sum_{i=1}^{Nn} Od_i} \times 100 \quad (2-41)$$

3) Average Absolute Error

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^{Nn} |Od_i - Om_i|}{Nn} \quad (2-42)$$

4) Root Mean Square Error

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Nn} (Od_i - Om_i)^2}{Nn}} \quad (2-43)$$

5) Relative Root Mean Square Error

$$Rel. RMS = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Nn} (Od_i - Om_i)^2}{Nn}}}{Od_{max} - Od_{min}} \times 100 \quad (2-44)$$

6) Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

$$NSEC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{Nn} (Od_i - Om_i)^2}{\sum_{i=1}^{Nn} (Od_i - \bar{Od})^2} \quad (2-45)$$

Dimana :

Od = data pengamatan

Om = hasil perhitungan model

Nn = jumlah pasangan data-model

\bar{Od} = nilai rata – rata data pengamatan

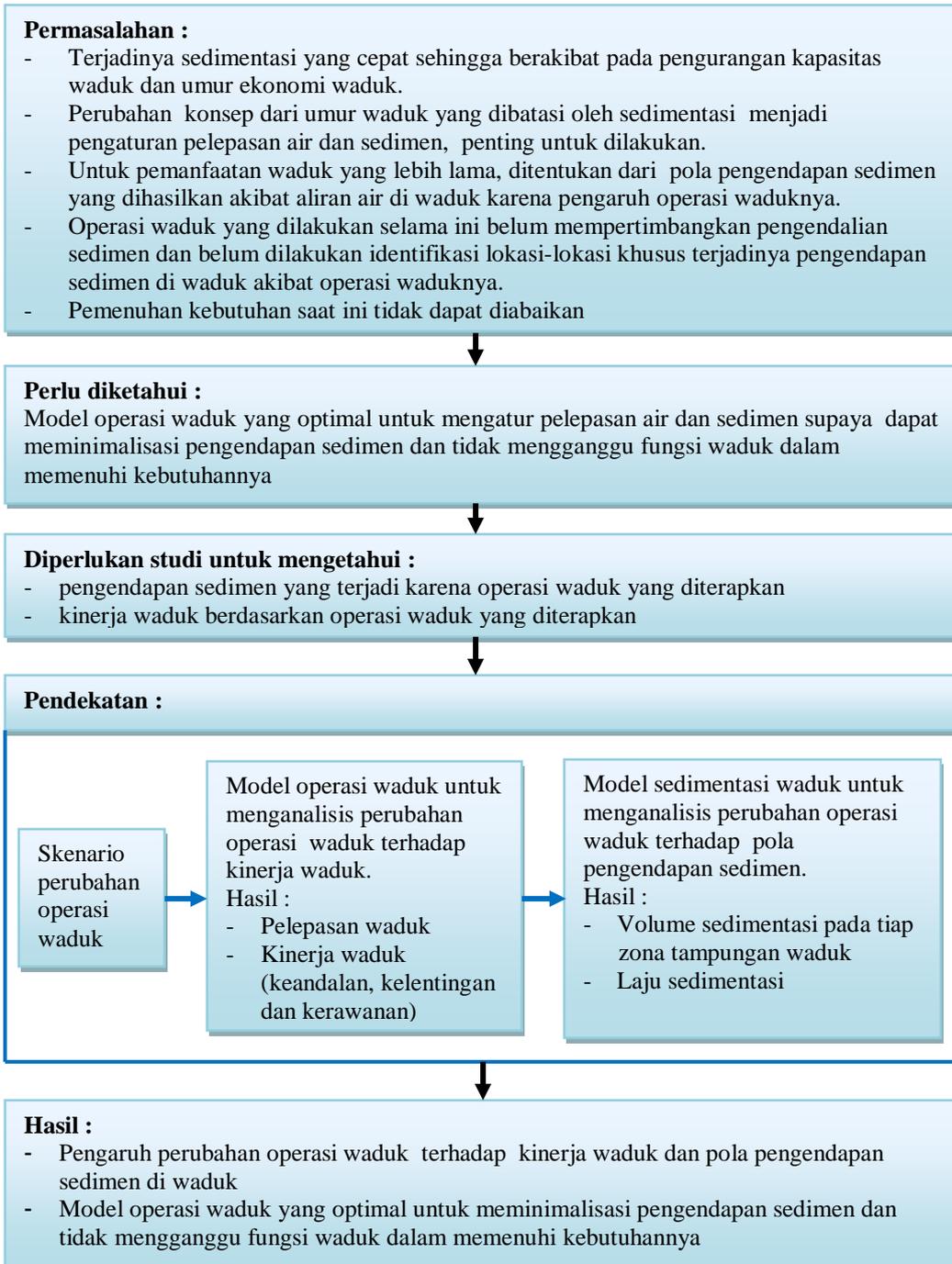
2.3 Kerangka Berpikir

Waduk selain menerima air dari daerah tangkapan airnya juga menerima sedimen yang ikut terbawa aliran air. Angkutan sedimen yang masuk waduk sebagian akan tertangkap di waduk dan sebagian lainnya akan ikut terbawa aliran keluar waduk baik lewat *intake*, *spillway* maupun *bottom outlet*. Sedimen yang mengendap di waduk akan mengurangi kapasitas tampungan waduk. Meskipun telah disediakan tampungan mati yang khusus untuk menampung endapan sedimen, tetapi sedimen mengendap hampir di seluruh

dasar waduk. Bila hal ini dibiarkan saja tanpa ada penanganan maka lama kelamaan endapan akan mengurangi tampungan efektif waduk, melebihi kapasitas tampungan matinya dan membuat umur ekonomi waduk semakin berkurang.

Permasalahan yang dihadapi waduk – waduk besar di Pulau Jawa adalah terjadinya sedimentasi yang cepat sehingga berakibat pada pengurangan kapasitas waduk dan umur ekonomi waduk. Untuk menjaga keberlanjutan fungsi waduk diperlukan perubahan konsep dari umur waduk yang dibatasi oleh sedimentasi menjadi pengaturan pelepasan air dan sedimen. Selain harus dapat meminimalisasi pengendapan sedimen maka operasi waduk juga harus menghasilkan kinerja yang baik. Pada tahap perencanaan dan pengelolaan waduk yang dilakukan selama ini, operasi waduk belum mempertimbangkan pengendalian sedimen dan belum dilakukan identifikasi lokasi-lokasi khusus terjadinya pengendapan sedimen di waduk akibat operasi waduknya.

Untuk itu diperlukan model operasi waduk yang optimal untuk mengatur pelepasan air dan sedimen supaya dapat meminimalisasi pengendapan sedimen dan tidak mengganggu fungsi waduk dalam memenuhi kebutuhannya. Hal ini dapat dicapai dengan melakukan studi pengaruh operasi waduk terhadap kinerja waduk dan studi pengaruh operasi waduk terhadap pengendapan sedimen di waduk. Pendekatan yang dilakukan adalah dengan merubah operasi waduknya dengan skenario yang ditentukan. Operasi waduk yang berbeda akan menghasilkan pelepasan dan distribusi sedimen yang berbeda sehingga pola pengendapan sedimennya juga berbeda. Berdasarkan kinerja dan pola pengendapan sedimen yang dihasilkan dapat ditentukan operasi waduk yang tepat untuk menjaga keberlanjutan fungsi waduk. Kinerja waduk dilihat dari keandalan, kelentingan dan kerawanan waduk dalam memenuhi kebutuhan airnya. Pola pengendapan sedimen dilihat dari laju sedimentasi dan volume sedimen yang mengendap di tampungan matinya. Uraian kerangka pikir tersebut diatas diperjelas dengan gambaran ringkas seperti pada Gambar 2-14.



Gambar 2-14. Kerangka Berpikir