

BAB 2. KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1 Analisis Daerah Aliran Sungai

Daerah Aliran Sungai (DAS) secara umum didefinisikan sebagai suatu hamparan wilayah atau kawasan yang dibatasi oleh pembatas topografi (punggung bukit) yang menerima, mengumpulkan air hujan, sedimen dan unsur hara serta mengalirkannya melalui anak-anak sungai dan keluar pada sungai utama ke laut atau danau.

DAS adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan (Kodoatie and Sjarief, 2010). Linsley (1949) menyebut DAS sebagai *“A river of drainage basin in the entire area drained by a stream or system of connecting streams such that all stream flow originating in the area discharged through a single outlet”*. Sementara itu Kerr (2002) menyebutkan bahwa *“A watershed is a geographic area that drains to a common point, which makes it an attractive unit for technical efforts to conserve soil and maximize the utilization of surface and subsurface water for crop production, and a watershed is also an area with administrative and property regimes, and farmers whose actions may affect each other’s interests”*. Dari definisi tersebut, dapat dikemukakan bahwa DAS merupakan ekosistem, dimana unsur organisme dan lingkungan biofisik serta unsur kimia berinteraksi secara dinamis dan di dalamnya terdapat keseimbangan inflow dan outflow dari material dan energi.

Dalam mempelajari ekosistem DAS, dapat diklasifikasikan menjadi daerah hulu, tengah dan hilir. DAS bagian hulu dicirikan sebagai daerah konservasi, DAS bagian hilir merupakan daerah pemanfaatan. DAS bagian hulu mempunyai arti penting terutama dari segi perlindungan fungsi tata air, karena itu setiap terjadinya kegiatan di daerah hulu akan menimbulkan dampak di daerah hilir dalam bentuk perubahan fluktuasi debit dan transpor sedimen serta material terlarut dalam sistem aliran airnya. Dengan perkataan lain ekosistem DAS, bagian hulu mempunyai fungsi perlindungan terhadap keseluruhan DAS. Perlindungan ini antara lain dari segi fungsi tata air, dan oleh karenanya pengelolaan

DAS hulu seringkali menjadi fokus perhatian mengingat dalam suatu DAS, bagian hulu dan hilir mempunyai keterkaitan biofisik melalui daur hidrologi.

Daerah aliran sungai (DAS) bisa dipandang sebagai suatu sistem pengelolaan, dimana DAS memperoleh masukan (*input*) yang kemudian diproses di DAS untuk menghasilkan luaran (*output*) (Asdak, 1995 dan Becerra, 1995). Dengan demikian DAS merupakan prosesor dari setiap masukan yang berupa hujan dan intervensi manusia (manajemen) untuk menghasilkan luaran yang berupa produksi, limpasan dan sedimen. Dalam konteks pengelolaan DAS, kegiatan pengelolaan yang dilakukan umumnya bertujuan mengendalikan atau menurunkan laju sedimentasi karena kerugian yang ditimbulkan oleh adanya proses sedimentasi jauh lebih besar dari pada manfaat yang diperoleh (Asdak, 2002).

Menurut Pawitan (2000) pendekatan analisis sistem dalam kajian hidrologi DAS merupakan landasan teori yang sangat ampuh dalam mengintegrasikan informasi komponen-komponen suatu sistem DAS menjadi model-model hidrologi DAS. Berbagai model simulasi hidrologi telah banyak dikembangkan di negara maju, untuk menerangkan proses perubahan masukan hujan menjadi keluaran berupa debit aliran sungai dengan mempertimbangkan karakteristik fisik DAS. Model simulasi hidrologi pada dasarnya dibuat untuk menyederhanakan sistem hidrologi, sehingga perilaku sebagian komponen di dalam sistem dapat diketahui. Parameter yang diperlukan sebagai data masukannya pun lebih sederhana, mudah diukur dan cepat diperoleh hasil keluarannya. Model semacam ini diharapkan dapat digunakan untuk memecahkan masalah pada suatu DAS yang kurang lengkap atau tidak tersedia datanya, seperti halnya kebanyakan DAS di Indonesia.

Daerah Aliran Sungai (DAS) secara umum didefinisikan sebagai suatu hamparan wilayah yang dibatasi oleh pembatas topografi (punggung bukit) yang menerima, mengumpulkan air hujan, sedimen dan unsur hara serta mengalirkannya melalui anak-anak sungai dan keluar pada sungai utama ke laut atau danau. Untuk menganalisis suatu DAS, sekurang-kurangnya ada empat hal yang perlu diperhatikan (Fleming, 1975) :

- 1) Fase Lahan (*land phase*), mempertimbangkan aliran air di atas permukaan tanah, baik sebagai aliran limpasan maupun limpasan permukaan. Dalam hal ini tidak memandang aliran permukaan sebagai aliran di dalam saluran.
- 2) Fase sungai (*river phase*), mempertimbangkan semua aspek aliran dalam saluran (sungai), termasuk di dalamnya proses penggerusan, sedimentasi, variasi aliran

melalui sistem sungai, dan semua proses yang terjadi dan bervariasi sesuai dengan sifat aliran.

- 3) Fase tampungan (*reservoir phase*), termasuk tampungan alami maupun buatan dan proses-proses yang menyangkut masukan, keluaran, sedimentasi di tampungan (*reservoir*), *density currents*, kualitas air dan proses biologi.
- 4) Fase bawah permukaan (*subsurface phase*), menyangkut semua proses yang berkaitan dengan aliran dan tampungan air di bawah permukaan tanah, hubungan antara masukan dan keluaran, kontaminasi dan isian buatan maupun alami.

Dalam penelitian yang akan dilakukan yaitu model tangki untuk prediksi debit sedimen pada DAS, analisisnya merujuk pada fase lahan dan fase sungai. Dalam fase lahan yang mempertimbangkan aliran air di atas permukaan tanah, baik sebagai aliran limpasan maupun limpasan permukaan merupakan hal penting dalam penelitian yang akan dilakukan ini, dikarenakan aliran limpasan maupun limpasan penyebab terjadinya proses erosi dan sedimentasi disamping akibat hujan dengan keluaran berupa debit sedimen. Sedangkan fase sungai, penelusuran debit sedimen yang analisisnya berdasarkan tiga persamaan yaitu persamaan kontinuitas air, persamaan momentum, dan persamaan kontinuitas sedimen tidak diperhitungkan, namun penelitian yang akan dilakukan ini, proses hitungan debit sedimen di alur sungai didasarkan pada data pengukuran lapangan

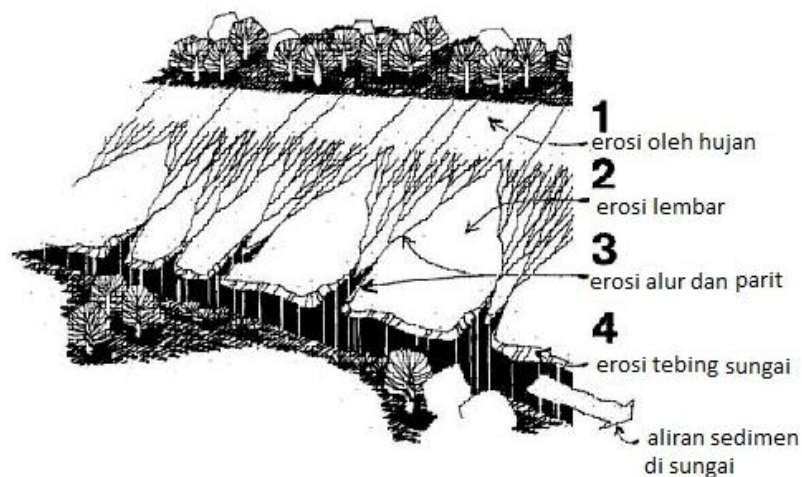
2.2 Erosi dan Sedimentasi

Proses hidrologi langsung atau tidak langsung, akan mempengaruhi erosi, transpor sedimen, deposisi sedimen di daerah hilir, dan mempengaruhi karakteristik fisik, biologi, dan kimia yang secara keseluruhan mewakili status kualitas perairan. Tataguna lahan dan praktik pengelolaan DAS juga mempengaruhi proses erosi, sedimentasi, dan pada gilirannya akan mempengaruhi kualitas air.

Frevert et al. (1950) cit. Suripin (2002^a) mengartikan erosi tanah sebagai proses hilangnya lapisan tanah yang jauh lebih cepat dari proses kehilangan tanah pada peristiwa erosi geologi (*geological erosion*). Arsyad (2006) Erosi adalah peristiwa pindahnya atau terangkutnya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat ke tempat lain oleh media alami. Pada peristiwa erosi, tanah atau bagian-bagian tanah pada suatu tempat terkikis dan terangkut yang kemudian diendapkan di tempat lain. Pengikisan dan pengangkutan tanah tersebut terjadi oleh media alami, yaitu air dan angin. Menurut bentuknya, erosi

dibedakan dalam erosi lembar, erosi alur, erosi parit, erosi tebing sungai, longsor, dan erosi internal

Menurut Arsyad (2006) Erosi lembar (*sheet erosion*) adalah pengangkutan lapisan tanah yang merata tebalnya dari suatu permukaan tanah. Erosi alur (*rill erosion*) adalah pengangkutan tanah dari alur-alur tertentu pada permukaan tanah, yang merupakan parit-parit kecil dan dangkal. Erosi alur terjadi karena air mengalir di permukaan tanah tidak merata, tetapi terkonsentrasi pada alur tertentu, sehingga pengangkutan tanah terjadi tepat pada tempat aliran permukaan terkonsentrasi. Erosi parit (*Gully erosion*) proses terjadinya sama dengan erosi alur, tetapi alur yang terbentuk sudah demikian besarnya, sehingga tidak dapat lagi dihilangkan dengan pengolahan tanah biasa. Erosi tebing sungai (*river bank erosion*) terjadi sebagai akibat pengikisan tebing sungai oleh air yang mengalir dari bagian atas tebing atau oleh terjangan aliran sungai yang kuat pada belokan sungai sebagaimana diberikan pada Gambar 2.1. Longsor (*landslide*) adalah suatu bentuk erosi yang pengangkutan atau pemindahan atau gerakan tanah terjadi pada saat bersamaan dalam volume besar. Erosi internal adalah terangkutnya butir-butir tanah ke bawah ke dalam celah-celah atau pori-pori tanah, sehingga tanah menjadi kedap air dan udara.



Gambar 2.1. Jenis dan Proses Erosi Tanah di Lereng yang Terekspos
(USDA NRCS, 2002 cit. Erosion and Sediment Control Measures)

Faktor-faktor terpenting yang mempengaruhi erosi adalah sebagai berikut (Asdak, 1995):

- 1) Iklim, pengaruh iklim terhadap erosi dapat bersifat langsung atau tidak langsung. Pengaruh langsung adalah melalui tenaga kinetis air hujan, terutama intensitas dan diameter butiran air hujan. Pada hujan yang intensif dan berlangsung dalam waktu

pendek, erosi yang terjadi biasanya lebih besar dari pada hujan dengan intensitas lebih kecil dengan waktu berlangsungnya hujan lebih lama. Pengaruh iklim tidak langsung, ditentukan oleh pengaruhnya terhadap pertumbuhan *vegetasi* atau *land cover*.

- 2) Sifat-sifat tanah, empat sifat tanah yang penting dalam menentukan erodibilitas tanah (mudah tidaknya tanah tererosi) adalah :
 - (1) tekstur tanah, biasanya berkaitan dengan ukuran dan porsi partikel-partikel tanah dan akan membentuk tipe tanah tertentu.
 - (2) Unsur organik, terdiri atas limbah tanaman dan hewan sebagai hasil proses dekomposisi.
 - (3) Struktur tanah, adalah susunan partikel-partikel tanah yang membentuk agregat. Struktur tanah mempengaruhi kemampuan tanah dalam menyerap air tanah dan stabilitas konstruksi tanah.
 - (4) Permeabilitas tanah, menunjukkan kemampuan tanah dalam meloloskan air.
- 3). Topografi atau Lahan, kemiringan dan panjang lereng adalah faktor penting untuk terjadinya erosi karena faktor-faktor tersebut menentukan besarnya kecepatan air larian. Kecepatan air larian yang besar umumnya ditentukan oleh kemiringan lereng yang tidak terputus.
- 4). *Vegetasi* penutup tanah, pengaruh *vegetasi* penutup tanah terhadap erosi adalah : (1) melalui fungsi melindungi permukaan tanah dari tumbukan air hujan, (2) menurunkan kecepatan air larian, (3) menahan partikel-partikel tanah pada tempatnya, dan (4) mempertahankan kemantapan kapasitas tanah dalam menyerap air.

United States Soil Conservation Service (1940) cit. Fakultas Teknik UGM, (1984-1985) ditemukan suatu persamaan tentang “*Universal Soil – Loss Equation*” sebagai berikut pada Persamaan 2.1 :

$$E = R. K .L. S. C. P \quad (2.1)$$

dimana :

E = Laju erosi (ton/ha/tahun)

R = faktor ‘*erosivity*’ hujan

K = faktor ‘*erodibility*’ yang disebabkan oleh keadaan fisik tanah misalnya : sifat mekanis, *chemis*, dan komposisi tanah.

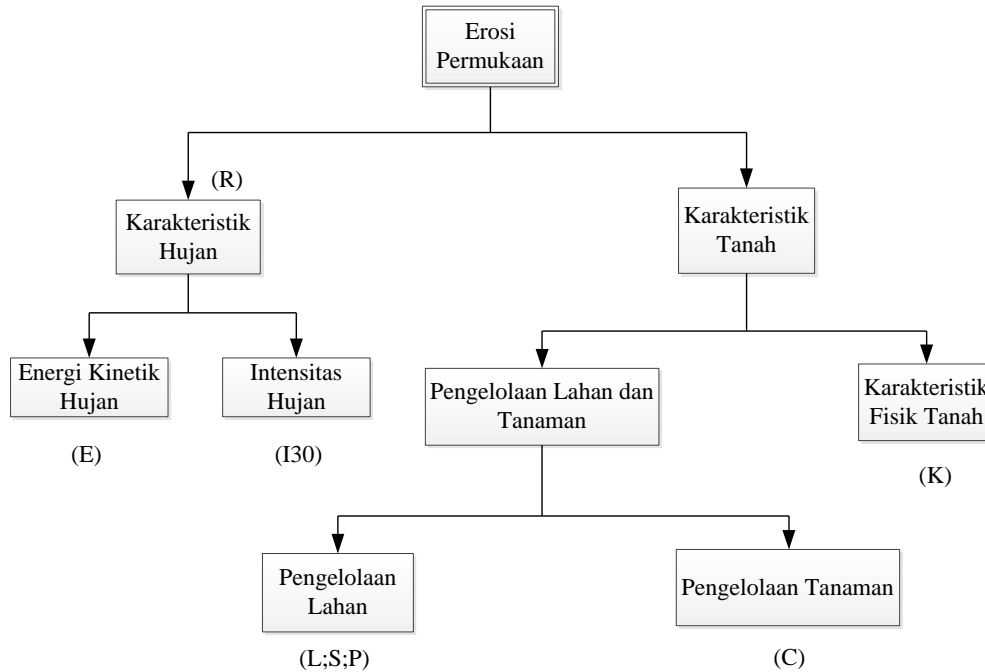
L = faktor jarak transport

S = faktor kemiringan tanah

C = faktor management akibat tanaman yang ada setempat

P = faktor management akibat pelapukan terhadap lahan setempat, misalnya : teknik dalam penggunaan lahan.

Secara skematik faktor-faktor proses erosi dapat dijelaskan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skema Faktor-faktor Proses Erosi Permukaan
(United States Soil Conservation Service, 1940 cit.Fakultas Teknik UGM, 1984-1985, p.6)

Pada hakikatnya USLE dikembangkan sebagai alat perencanaan konservasi tanah (*soil conservation plainning tool*). Namun karena belum adanya model prediksi erosi skala DAS maka model ini tetap digunakan untuk memprediksi erosi DAS tanpa dibarengi modifikasi yang berarti (Kinnell dan Risse, 1998).

Sedimen merupakan material hasil erosi yang dibawa oleh aliran air sungai dari daerah hulu dan kemudian mengendap di daerah hilir. Menurut Hudson (1971) aliran sedimen dalam sungai terutama disebabkan oleh erosi yang terjadi dalam daerah aliran sungai tersebut. Sedangkan aliran sedimen adalah material hasil erosi yang terangkut dan bergerak bersama dengan aliran permukaan. Apip et al. (2007, 2008) menyatakan dalam modelnya bahwa algoritma aliran sedimen mencakup beberapa sumber aliran sedimen, yaitu pelepasan tanah oleh hujan (*detachment raindrop/DR*) dan pelepasan dan pengendapan tanah oleh aliran permukaan (*detachment flow/DF*) dan asumsi dasar bahwa sedimen yang dihasilkan berupa aliran sedimen ketika terjadi aliran permukaan.

Proses sedimentasi meliputi proses erosi, transportasi (debit), pengendapan (*deposition*), dan pemadatan (*compaction*) dari sedimentasi itu sendiri. Proses tersebut berjalan sangat kompleks, dimulai dari jatuhnya hujan yang menghasilkan energi kinetik yang merupakan permulaan dari proses erosi. Begitu tanah menjadi partikel halus, lalu menggelinding bersama aliran, sebagian akan tertinggal di atas tanah sedangkan bagian lainnya masuk ke sungai terbawa aliran menjadi debit sedimen. Bentuk, ukuran, dan beratnya partikel tanah tersebut akan menentukan jumlah besarnya debit sedimen. Kemampuan tanah itu untuk terkikis tidak hanya tergantung pada ukuran partikel-partikelnya tetapi juga pada sifat fisik bahan organik dan anorganik yang terikat bersama-sama partikel tersebut. Apabila partikel tanah tersebut terkikis dari permukaan bumi atau dari dasar dan tebing sungai maka endapan yang dihasilkan akan bergerak atau berpindah secara kontinyu menurut arah aliran yang membawanya menjadi debit sedimen dari suatu daerah aliran sungai (DAS). Material sedimen yang terbawa oleh aliran sungai berasal dari berbagai sumber atau tempat, yaitu dari talud, longsoran tanah, erosi permukaan tanah, dan erosi pada tebing-tebing dan dasar sungai.

Beberapa sumber sedimen yang disebutkan di atas, sebagian besar material sedimen yang terangkut oleh aliran di sungai berasal dari erosi permukaan tanah pada daerah aliran sungai (DAS), dan hanya sebagian kecil saja yang berasal dari erosi pada tebing-tebing dan dasar sungai. Bilamana debit aliran sungai berkurang atau kemiringan dasar sungai mengecil, kemampuan sungai untuk mengangkut sedimen biasanya berkurang, sehingga sebagian dari material sedimen yang terangkut akan mengendap

Hasil sedimen (*sediment yield*) adalah besarnya sedimen yang berasal dari erosi yang terjadi di daerah tangkapan air yang diukur pada periode waktu dan tempat tertentu. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen terlarut dalam sungai (*suspended sediment*) atau dengan pengukuran langsung di dalam waduk. Bentuk hubungan antara erosi yang berlangsung di daerah tangkapan dan besarnya sedimen yang terukur di daerah hilir mempunyai mekanisme kausalitas yang rumit dan belum banyak dimengerti (Simons dan Senturk, 1992).

Hasil sedimen tergantung pada besarnya erosi total di DAS/sub-DAS dan tergantung pada transpor partikel-partikel tanah yang tererosi tersebut keluar dari daerah tangkapan air DAS/sub-DAS. Produksi sedimen umumnya mengacu kepada besarnya laju sedimen yang mengalir melewati satu titik pengamatan tertentu dalam suatu sistem DAS. Tidak semua tanah yang tererosi di permukaan daerah tangkapan air akan sampai ke titik pengamatan. Sebagian tanah tererosi akan terdeposisi di cekungan-cekungan permukaan tanah, di kaki-kaki lereng dan bentuk-bentuk penampungan sedimen lainnya. Oleh

karenanya, besarnya hasil sedimen biasanya bervariasi mengikuti karakteristik fisik DAS/sub-DAS (Julien, 1995). Besarnya hasil sedimen dinyatakan sebagai volume atau berat sedimen per satuan daerah tangkapan air per satuan waktu (ton per km² per tahun).

Penelitian jangka panjang yang dilakukan di daerah beriklim sedang menunjukkan bahwa hasil sedimen tahunan merupakan fungsi dari besarnya air larian tahunan di daerah kajian, daerah tangkapan air, dan persentase daerah yang digarap (pertanian, perkebunan, peternakan). Besarnya hasil sedimen per kilometer persegi meningkat dengan meningkatnya air larian, menurunnya daerah tangkapan asal sedimen, dan meningkatnya lahan garapan (Dunne dan Leopold, 1978).

Dalam sistem transportasi sedimen sangat dipengaruhi oleh kapasitas sungai yang ada, sehingga faktor sungai akan sangat berpengaruh sekali meskipun belum ada suatu rumus pasti tentang hubungan potensi debit dengan aliran sedimen yang ada, hanya oleh Hudson (1971) diutarakan bahwa aliran sedimen dalam sungai, puncak konsentrasi umumnya terjadi lebih awal dari puncak banjir. Seperti telah diungkapkan oleh beberapa peneliti bahwasanya aliran sedimen dalam sungai dipengaruhi oleh keadaan dan kejadian pada sumber sedimen disamping faktor hidraulis sungai itu sendiri.

Erosi sungai atau tebing sungai melalui erosi dan keruntuhan lateral (sisi) seringkali menimbulkan muatan sedimen yang tinggi pada sungai atau anak sungai. Hal ini diawali oleh turunnya hujan deras pada Daerah Aliran Sungai yang tutupan *vegetasinya* buruk, yang menyebabkan limpasan yang berlebihan. Apabila tegangan yang diberikan oleh aliran sungai melebihi tahanan material tanah setempat, erosi tebing sungai terjadi, muatan sedimen layang meningkat. Legono (2005) hasil penyelidikan laboratorium menunjukkan bahwa terdapat korelasi antara kecepatan erosi dan tegangan geser dasar. Partikel akan bergerak dalam bentuk sedimen layang atau *suspense* apabila aliran yang mempunyai tegangan geser dasar besarnya jauh melebihi tegangan geser dasar kritis. Aliran sedimen dalam jaringan saluran merupakan fungsi dari dua proses, yaitu pengendapan (*deposition*) dan degradasi yang bekerja secara bersamaan dalam ruas saluran.

Kejadian hujan, proses aliran sedimen di lahan berlereng asumsi yang digunakan hanya dipengaruhi oleh aliran permukaan sebagai tampungan sedimen di lahan berlereng, tanpa mempertimbangkan pengaruh beban sedimen oleh aliran lapisan bawah permukaan sebagai tampungan air bawah permukaan. Demikian pula tampungan di saluran atau sungai adalah dipasok dengan bahan sedimen dari lahan berlereng, erosi dasar sungai dan hanya sedimen suspensi (Apip et al., 2007 dan 2008). Kemudian Apip et al. (2008) mengembangkan model aliran sedimen berdasar konsep merespon daerah aliran sungai

dengan proses pada lahan (lereng bukit) yang hanya dipengaruhi aliran permukaan dan proses pada saluran atau sungai yang hanya untuk sedimen suspensi, dan direpresentasikan dalam tipe tampungan. Akbari et al. (1996) penelusuran angkutan sedimen di alur sungai dihitung berdasarkan tiga persamaan yaitu persamaan kontinuitas air, persamaan momentum, dan persamaan kontinuitas sedimen. Penelitian yang akan dilakukan ini, proses hitungan debit sedimen didasarkan pada data pengukuran lapangan.

2.3 Model Tangki

2.3.1 Dasar-dasar Model Tangki

Model Tangki pada dasarnya suatu model untuk meniru simulasi Daerah aliran Sungai (DAS) dengan menggantinya oleh sejumlah tampungan yang digambarkan sebagai sederet tangki. Model Tangki ini dikembangkan oleh Sugawara pada Tahun 1984. Menurut Sugawara (1984) model tangki adalah suatu metode *non linier* yang berdasarkan pada hipotesis bahwa aliran limpasan dan infiltrasi merupakan fungsi dari jumlah air yang tersimpan didalam tanah.

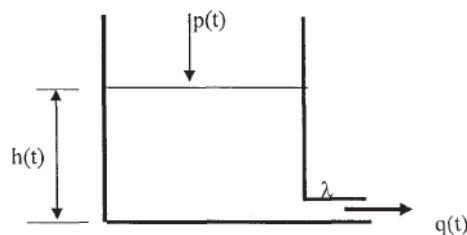
Pada prinsipnya model tangki memprediksi limpasan yang keluar dari tangki yang besarnya sebanding dengan tinggi air dalam tangki yang beraliran (*storage depth*) $h(t)$ di atas lobang yang disajikan pada Gambar 2.3. Limpasan $q(t)$ dirumuskan sebagai berikut pada Persamaan 2.2 :

$$q(t) = h(t) \lambda \quad (2.2)$$

dimana : $q(t)$ = limpasan (mm/hari)

$h(t)$ = tinggi tampungan (mm)

λ = koefisien lobang (hari^{-1})



Gambar 2.3. Hubungan $p(t)$, $h(t)$ dan $q(t)$

Apabila terdapat penambahan air dari atas, misal hujan untuk tangki teratas atau infiltrasi untuk tangki dibawahnya, maka persamaan adalah Persamaan 2.3 sebagai berikut :

$$p(t) - q(t) = \frac{dh}{dt} \quad (2.3)$$

$p(t)$ adalah curah hujan atau infiltrasi dari tangki atas

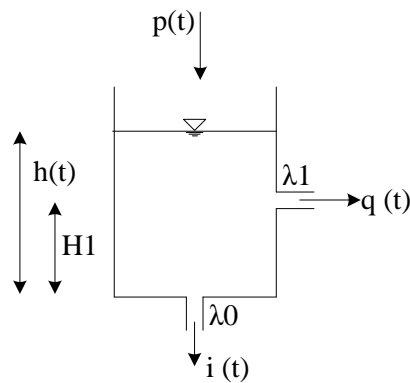
Persamaan (2.3) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q(t) = \int_0^{\infty} p(t - \tau) \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau \quad (2.4)$$

Hubungan antara limpasan $q(t)$ dan infiltrasi $i(t)$ dengan tinggi air pada tangki $h(t)$ pada kondisi seperti Gambar 2.4.

Hubungan limpasan $q(t)$, infiltrasi $i(t)$, tinggi tampungan $h(t)$, dan tinggi lobang H_1 dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.5.

$$\left. \begin{aligned} q(t) &= [h(t) - H_1] \lambda_1 \\ i(t) &= h(t) \lambda_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$



Gambar 2.4. Hubungan $p(t)$, $i(t)$, $h(t)$ dan H_1

dengan syarat $h(t) > H_1$, berdasarkan hukum kontinuitas didapatkan Persamaan 2.6 :

$$p(t) - q(t) - i(t) = \frac{dh}{dt} \quad (2.6)$$

Model tangki yang akan dibuat harus dapat menggambarkan proses aliran air yang sesungguhnya menuju ke sungai yang terdiri atas aliran permukaan, aliran antara dan aliran bawah tanah. Aliran tersebut dapat digambarkan dengan model tangki bersusun. Menurut Soemarto (1987) secara normal tangki yang berada di atasnya mempunyai lobang-lobang limpasan dan infiltrasi dengan konstanta yang lebih besar dibanding dengan tangki di bawahnya. Oleh karena itu selama hujan berlangsung limpasan dari tangki yang lebih atas menjadi lebih dominan. Setelah hujan berhenti, tangki atas

mengalirkan semua tampungannya dan kemudian limpasan yang berasal dari tangki yang lebih bawah berganti menjadi lebih dominan.

Model Tangki termasuk dalam model empiris model *black box*. Model empiris yaitu model yang didasarkan atas penggunaan hubungan yang secara statistik nyata antara variabel-variabel yang dianggap penting dari sejumlah data yang tersedia, sedangkan model *black box* adalah model parametrik yang hanya menelaah masukan dan keluaran utama.

2.3.2 State of The Art Model Tangki dan Aplikasinya untuk Debit Sedimen

State of the Art adalah sebuah konsep yang digunakan dalam proses penilaian dan penegasan dari tahap pembaharuan dan penciptaan atau pencapaian paling tinggi dari sebuah proses pengembangan (bisa berupa *device*, prosedur, proses, teknik atau sains), dalam penelitian ini model tangki dan aplikasinya dalam debit sedimen, diawali oleh Sugawara (1979, 1995) bahwa model tangki yang dikembangkan merupakan model hujan –aliran adalah model yang digunakan untuk menghitung aliran atau debit berdasarkan hujan. Penggunaan model tangki mengalami perkembangan dan banyak penelitian-penelitian tentang model tangki tentang aliran atau debit adalah sebagai berikut :

Lee and Singh (1999) mengembangkan model tangki untuk curah hujan –limpasan menggunakan aplikasi Kalman filter, untuk memperkirakan koefisien dari persamaan diferensial nonlinier menggunakan teknik estimasi berurutan secara optimal, yaitu kondisi vektor, yang menggambarkan parameter model tangki.

Harmailis et al. (2001) memodifikasi model tangki untuk analisis debit terhadap pengaruh perubahan tata guna lahan, dalam hal ini tata guna lahan hutan, sawah dan kebun campuran. Hasil modifikasi model tangki dari keseluruhan alternatif perubahan tata guna lahan yang efektif untuk meningkatkan ketersediaan air dengan memperbanyak tata guna lahan hutan, sawah berteras dan mengurangi kebun campuran.

Setiawan (2003) menerapkan metode optimasi menggunakan *algoritma Marquardt* untuk model tangki yang menggambarkan hubungan antara hujan minus evapotranspirasi dan debit air dengan hasil kinerja cukup baik dilihat dari keseimbangan air dan koefisien determinasi. Chen and Pi (2004) menerapkan model tangki difusi dalam drainase lahan padi di Taiwan, dengan hasil cukup baik untuk proses aliran dan ketinggian air serta puncak aliran pada beberapa kejadian hujan.

Takahashi et al. (2008) menjelaskan bahwa model multi tangki-terhubung berguna dalam tabel prediksi air tanah cekungan terutama ketika analisis stabilitas lereng diperlukan.

Aziz et al. (2012) menerapkan model tangki untuk estimasi besaran *return flow* yang terjadi di lahan irigasi, hal ini membantu dalam menentukan nilai komponen imbalanced air, dengan hasil kinerja cukup baik.

Penelitian selanjutnya, tentang model tangki untuk debit sedimen, hasil penelitian antara lain adalah sebagai berikut ini.

Lee and Singh (2005) menerapkan model tangki untuk hasil sedimen, dengan analisis menggunakan susunan 3 (tiga) tangki *cascade* dan parameter model tangki yang sama, baik untuk analisis hujan-aliran berupa debit (Sugawara et al., 1984 dan 1991 ; Sugawara, 1979 ; Phien et al., 1983), maupun analisis hasil sedimen yaitu debit dikalikan dengan konsentrasi sedimen. Penerapan model tangki untuk hasil sedimen ini menggunakan asumsi bahwa konsentrasi sedimen mengalami infiltrasi, perkolasi, dan kondisi sebenarnya kecil kemungkinan terjadi proses demikian, hal ini merupakan kelemahan dalam model. Lee (2007) menerapkan model tangki menggunakan Kalman filter untuk hasil sedimen, dengan analisis menggunakan susunan 3 (tiga) tangki *cascade* dan parameter model tangki yang sama, baik untuk analisis hujan-aliran berupa debit, maupun analisis hasil sedimen yaitu debit dikalikan dengan konsentrasi sedimen. Parameter model tangki ditentukan oleh kondisi vektor disistem model pada Kalman filter dengan menggunakan teknik estimasi berurutan secara optimal dan algoritma Kalman filter dibentuk oleh tiga komponen : (1) model sistem; (2) model pengukuran; dan (3) Kalman filter. Apip (2007) menganalisis aliran sedimen menggunakan metode *lumped sedimen runoff model* mencakup wilayah di lahan berlereng dan di sungai pada daerah aliran sungai dan menganalisis debit sedimen berdasar model hujan- aliran yaitu model tangki dengan memasukkan unsur sedimen, tetapi belum diterapkan.

Dari *State of the Art* di atas, penulis mencoba melakukan pengembangan penelitian yaitu Model Tangki untuk Prediksi Debit Sedimen dengan memodifikasi susunan tangki berdasar proses erosi dan debit sedimen pada wilayah Daerah Aliran Sungai dan Optimasi Parameter model menggunakan metoda Algoritma Genetik. Pemrograman optimasi dengan Algoritma Genetik menggunakan bahasa pemrograman MATLAB (*Matrix Laboratory*). Bahasa pemrograman MATLAB menyediakan *Toolbox* graphical user interfaces (GUI) untuk Algoritma Genetik yang sangat mendukung dalam penyusunan program optimasinya.

2.3.3 Model Tangki untuk Debit Sedimen

Model tangki merupakan model hidrologi konseptual deterministik, dalam penelitian yang akan dilakukan ini digunakan untuk pengalihragaman hujan yang dihubungkan dengan debit sedimen. Model tangki ini digambarkan sebagai suatu mekanisme debit sedimen di Daerah Aliran Sungai yang meliputi lahan berlereng dan alur sungai yang akan disubstitusikan rangkaian sejumlah tangki.

Landasan teori yang digunakan untuk mengembangkan model tangki untuk prediksi debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai mengacu pada metode *lumped* secara fisik berbasis distribusi untuk prediksi aliran sedimen pada Daerah Aliran Sungai, dengan konsep adalah memasukan unsur sedimen dalam proses analisis hujan menjadi aliran (*rainfall-runoff*). Analisis konsep ini melalui 2 tahapan model, Model hujan–aliran metode *lumped* secara fisik berbasis distribusi dan Model hujan-aliran sedimen metode *lumped* secara fisik berbasis distribusi (Apip et al., 2007).

Sejak erosi tanah dan transportasi sedimen oleh air berkaitan erat dengan proses curah hujan dan limpasan, pemodelan erosi dan debit sedimen tidak dapat dipisahkan dari prosedur untuk menggunakan model generasi limpasan dengan menggunakan model hidrologi berbasis *physically*. Model diasumsikan bahwa garis aliran adalah paralel terhadap kemiringan, gradien hidraulik adalah sama dengan kemiringan. Dalam model *kinematic wave* tidak dipertimbangkan aliran air vertikal seperti efek infiltrasi. Masukan data hujan adalah langsung dtambahkan ke aliran bawah permukaan (*subsurface flow*) atau aliran permukaan (*surface flow*) dengan mempertimbangkan kedalaman air dalam area dimana hujan jatuh. Dalam model hujan-aliran secara fisik berbasis distribusi, Daerah Aliran Sungai dianalisa dibuat dalam *grid cell* atau segmen dengan persamaan kontinuitas untuk menghitung nilai aliran per segmen seperti pada Persamaan 2.7 (Apip et al., 2008).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = P(t) \quad (2.7)$$

dimana : h = kedalaman aliran permukaan (m)

q = debit per satuan lebar (m²/detik)

P = hujan (mm)

Menurut Singh et al. (2008) aliran sedimen dalam DAS digambarkan oleh hubungan persamaan kontinuitas aliran bentuk *lumped spatially* dan tampungan aliran sedimen – linear. Model hujan–aliran secara fisik berbasis distribusi tersebut kemudian ditambahkan

komponen aliran sedimen hasil erosi. Proses debit sedimen disimulasi dengan pelepasan tanah oleh hujan dan aliran permukaan. Asumsi dasar dari model ini adalah sedimen yang diangkut dan dihasilkan ketika terjadi aliran permukaan. Dengan demikian, kapasitas angkut dari aliran permukaan diperkirakan untuk mensimulasikan proses aliran sedimen. Konsep dari Model hujan–aliran sedimen secara spasial berbasis distribusi, dapat ditunjukkan dalam Gambar 2.5. Dalam aliran permukaan, aliran sedimen (erosi tanah) dan pengendapan dianalisis per segmen atau grid, mengikuti arah aliran. Pelepasan tanah, pengendapan dan aliran sedimen ditangani dengan persamaan kontinuitas aliran sedimen seperti pada Persamaan 2.8 (Lopes and Lane. 1998 ; Jayawardena and Bhuiyan, 1999 ; dan Apip et al., 2008)

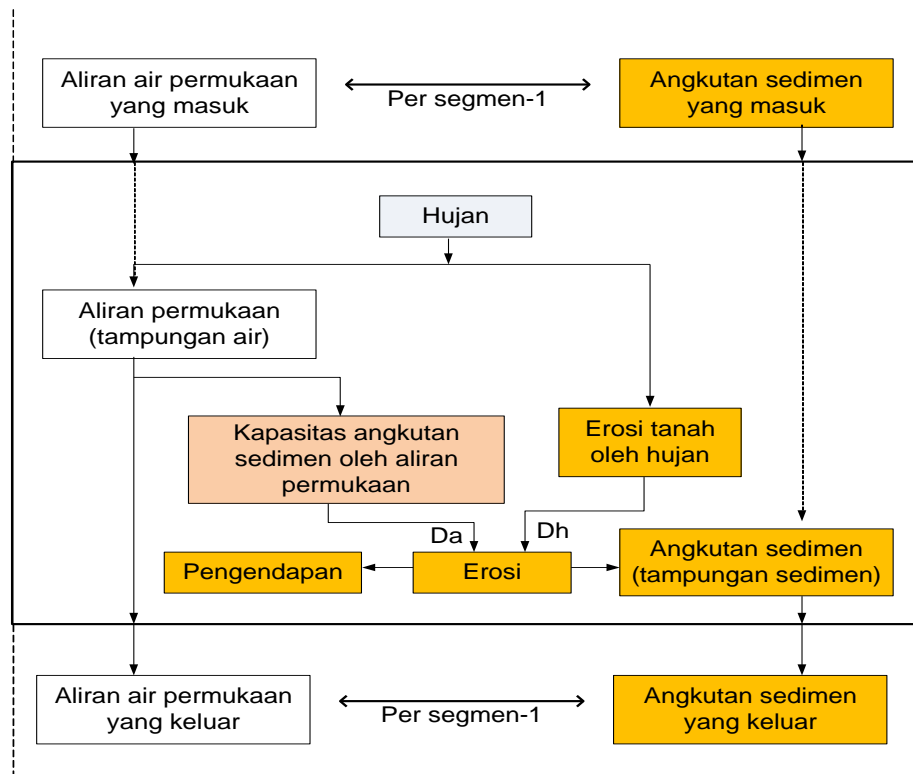
$$\frac{\partial(h_a C)}{\partial t} + \frac{\partial(q_a C)}{\partial x} = e(x,t) \quad (2.8)$$

dimana : C = konsentrasi sedimen dalam aliran (kg/m^3)

h_a = kedalaman aliran permukaan (m)

q_a = debit per satuan lebar (m^2/detik)

$e(x,t)$ = erosi oleh hujan dan aliran permukaan ($\text{kg/m}^2/\text{jam}$)



Gambar 2.5. Skema diagram model hujan- aliran sedimen secara spasial berbasis distribusi pada skala per segmen

$$e(x,t) = D_h + D_a$$

dimana : D_h = erosi oleh hujan dengan Persamaan 2.9 dan D_a = erosi oleh aliran permukaan dengan Persamaan 2.10.

$$D_{hi} = k KE = k 56,48 P_i \quad (2.9)$$

dimana : D_{hi} = erosi oleh hujan per segmen ($\text{kg/m}^2/\text{jam}$)

k = tanah terlepas (kg/J) (=0,002)

KE = Total energi Kinetik akibat hujan efektif (J/m^2)

P_i = kedalaman intensitas hujan (mm/jam)

$$D_{ai} = \alpha (KS_i - C_i) h_{ai} \quad (2.10)$$

dimana : D_{ai} = erosi oleh aliran permukaan per segmen ($\text{kg/m}^2/\text{jam}$)

α = faktor efisiensi pelepasan /pengendapan

KS_i = Kapasitas angkut sedimen oleh aliran permukaan ($\text{kg/m}^3/\text{jam}$)

C = Konsentrasi sedimen (kg/m^3)

h_{ai} = kedalaman air permukaan (m)

Dalam model hujan–aliran secara fisik berbasis distribusi, asumsi aliran adalah kondisi *steady state* dengan input hujan seragam secara *spatial*, hubungan tampungan air per segmen dan debit aliran per segmen dapat diturunkan secara teori. Debit aliran $Q_i(x)$ per segmen dinyatakan sebagai produk intensitas curah hujan (uniform) (\bar{P}) dan kontribusi akumulasi aliran air wilayah lereng bagian atas (U), seperti pada Gambar 2.6. dan Persamaan 2.11.

$$Q_i(x) = Q_i(0) + \bar{P} \int_0^x b_i(x) dx \quad (2.11)$$

dengan : x = jarak horisontal dari hulu ke hilir (m)

L = panjang jarak horisontal dari hulu ke hilir (m)

$b(x)$ = lebar horisontal (m)

Kemudian Persamaan (2.11) dapat ditulis:

$$Q_i(x) = Q_i(0) + \bar{P} x_i b(x)$$

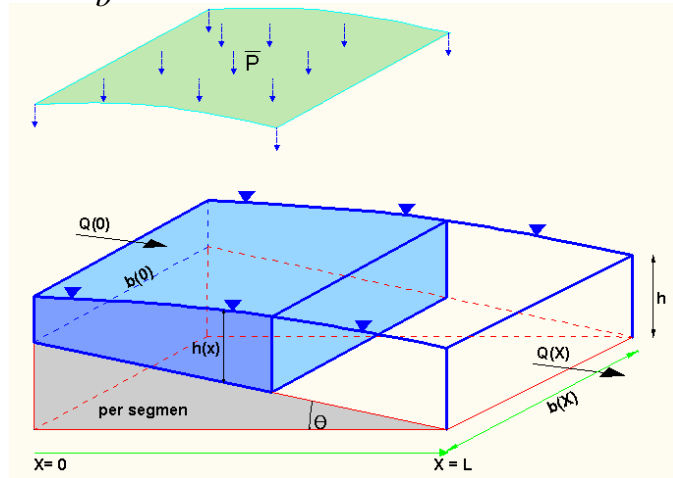
$$= \bar{P} U_i + \bar{P} x_i b(x)$$

Flux debit air dapat ditulis kembali dengan unit lebar seperti pada Persamaan 2.12.

$$Q(x)/b = \bar{P} U / b + \bar{P} x b(x)/b$$

$$q_i(x) = \bar{P} U_i / b + \bar{P} x_i$$

$$= \bar{P} \left(\frac{U_i}{b} + x_i \right) \quad (2.12)$$



Gambar 2.6. Skema Diagram Model Hujan-Aliran secara Fisik Berbasis Distribusi pada Skala per Segmen

Dari hubungan debit per lebar dan tinggi muka air ($q-h$), secara umum persamaan gelombang kinematik untuk aliran permukaan seperti pada Persamaan 2.13.

$$q(x) = \alpha h(x)^m \quad (2.13)$$

dimana :

$$\alpha = \frac{\sqrt{i}}{n} = \frac{\sqrt{\sin \theta}}{n}$$

dengan : i = gradien kemiringan (m/m)

n = koefisien kekasaran

m = konstanta eksponen, yang mana nilainya 5/3 dari persamaan manning

Substitusi Persamaan (2.13) ke Persamaan (2.12) kita mendapatkan kedalaman air permukaan dengan hasil sebagai berikut pada Persamaan 2.14.

$$\alpha_i h_i(x)^m = \bar{p} \left(\frac{U_i}{b} + x_i \right)$$

$$h_i(x) = \left(\frac{\bar{p} \left(\frac{U_i}{b} + x_i \right)}{\alpha_i} \right)^{1/m} \quad (2.14)$$

Tampungan volume air permukaan per segmen (S_{ai}) sebagai fungsi diferensial kedalaman air, lebar per segmen dan jarak horisontal dari hulu ke akhir hilir seperti pada Persamaan 2.15.

$$\begin{aligned}
 S_{ai} &= \int_0^x h_i(x) b_i(x) dx \\
 &= b \int_0^L \left(\frac{\bar{P} \left(\frac{U_i + x_i}{b} \right)}{\alpha_i} \right)^{1/m} dx \\
 &= b \left(\frac{\bar{P}}{\alpha_i} \right)^{1/m} \frac{1}{\frac{1}{m} + 1} \left(x_i + \frac{U_i}{b} \right)^{\frac{1}{m} + 1} \Bigg|_0^L \\
 &= b \left(\frac{\bar{P}}{\alpha_i} \right)^{1/m} \frac{1}{\frac{1}{m} + 1} \left(\left(L_i + \frac{U_i}{b} \right)^{\frac{1}{m} + 1} - \left(\frac{U_i}{b} \right)^{\frac{1}{m} + 1} \right) \\
 S_{ai} &= b \bar{P}^r k_i \frac{1}{r+1} \left(\left(L_i + \frac{U_i}{b} \right)^{r+1} - \left(\frac{U_i}{b} \right)^{r+1} \right) \tag{2.15}
 \end{aligned}$$

dimana : $r = \frac{1}{m}$ dan $\left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{m}} = k$

Total tampungan volume air permukaan dalam sistem Daerah Aliran Sungai (S_a) adalah dihitung dengan menambahkan total tampungan volume tiap-tiap per segmen dalam sistem DAS sebagai fungsi variabel topografi dan intensitas hujan :

$$\begin{aligned}
 S_a &= \sum_{i=1}^N S_{ai} \\
 &= \sum_{i=1}^N b \bar{P}^r k_i \frac{1}{r+1} \left(\left(L_i + \frac{U_i}{b} \right)^{r+1} - \left(\frac{U_i}{b} \right)^{r+1} \right)
 \end{aligned}$$

dimana : N = total jumlah per segmen

Dengan asumsi bahwa proses hujan-aliran mencapai kondisi *steady state* dengan input hujan seragam spasial, maka hujan dinyatakan sebagai fungsi debit dan total luas sistem DAS seperti pada Persamaan 2.16.

$$S_a = \sum_{i=1}^N b \left(\frac{Q}{A}\right)^r k_i \frac{1}{r+1} \left(\left(L_i + \frac{U_i}{b}\right)^{r+1} - \left(\frac{U_i}{b}\right)^{r+1} \right) \quad (2.16)$$

Persamaan (2.16) ini dapat disederhanakan dengan menyatakan bahwa hubungan dengan menggunakan parameter yang mana mempunyai pengertian fisik seperti pada Persamaan 2.17.

$$S_a = K Q^r \quad (2.17)$$

dimana : K = parameter model mempunyai arti phisik, dapat digambarkan sebagai waktu konsentrasi untuk sistem *kinematic wave* dalam perjalanannya

Dari persamaan integral distribusi. Sekarang K adalah parameter dimensi ($m^{6/5} S^{3/5}$) yang didefinisikan seperti pada Persamaan 2.18.

$$K = \sum_{i=1}^N \frac{b}{(A)^r} \frac{k_i}{r+1} \left(\left(L_i + \frac{U_i}{b}\right)^{r+1} - \left(\frac{U_i}{b}\right)^{r+1} \right) \quad (2.18)$$

2.3.3.1 Tampunguan Sedimen Maksimum pada Daerah Aliran Sungai (DAS) (S_s^{\max})

Tampunguan sedimen maksimum didefinisikan sebagai total kapasitas angkut sedimen di seluruh DAS untuk tiap tahapan waktu. Oleh karena itu kita menyatakan S_s^{\max} adalah fungsi kapasitas angkut sedimen dan total tampungan air.

Dari Persamaan (2.12) dan Persamaan (2.14), v_i telah diestimasi dengan :

$$v_i(x) = \frac{q_i(x)}{h_i(x)} = \frac{\bar{P}\left(\frac{U_i}{b} + x_i\right)}{\left(\frac{\bar{P}\left(\frac{U_i}{b} + x_i\right)}{\alpha_i}\right)^r}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\bar{P}\left(x_i + \frac{U_i}{b}\right)}{\left(\bar{P}\left(x_i + \frac{U_i}{b}\right)\right)^r k_i} \\
&= \left(\bar{P}\left(x_i + \frac{U_i}{b}\right)\right)^{1-r} k_i^{-1}
\end{aligned}$$

Untuk tiap segmen $x = L$, kemudian persamaan di atas ditulis kembali menjadi Persamaan 2.19.

$$v_i = \left(\frac{Q}{A}\left(L_i + \frac{U_i}{b}\right)\right)^{1-r} k_i^{-1} \quad (2.19)$$

Dimana v_i adalah variabel independen *Unit Stream Power* tiap segmen (USP_i) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
USP_i &= v_i \sin \theta_i = v_i i_i \\
USP_i &= \left(\frac{Q_w}{A}\left(L_i + \frac{U_i}{b}\right)\right)^{1-r} k_i^{-1} i_i
\end{aligned}$$

Kapasitas angkut sedimen (KS) untuk tiap segmen (KS_i) diestimasi seperti pada Persamaan 2.20.

$$KS_i = 10^{5.0105 + 1.363 \log((USP_i - USP_{\text{kritis}}) / \omega)} \quad (2.20)$$

Tampang sedimen maksimum pada skala Daerah Aliran Sungai adalah dihitung dengan menambahkan $KS_i \cdot S_{ai}$ di hulunya, untuk per segmen seperti pada Persamaan 2.21.

$$\begin{aligned}
S_s^{\max} &= \sum KS_i S_{ai} \\
&= \sum_{i=1}^N b \bar{P}^r k_i \frac{1}{r+1} \left[\left(L_i + \frac{U_i}{b}\right)^{r+1} - \left(\frac{U_i}{b}\right)^{r+1} \right] KS_i \\
&= \sum_{i=1}^N b \left(\frac{Q}{A}\right)^r k_i \frac{1}{r+1} \left[\left(L_i + \frac{U_i}{b}\right)^{r+1} - \left(\frac{U_i}{b}\right)^{r+1} \right] KS_i \quad (2.21)
\end{aligned}$$

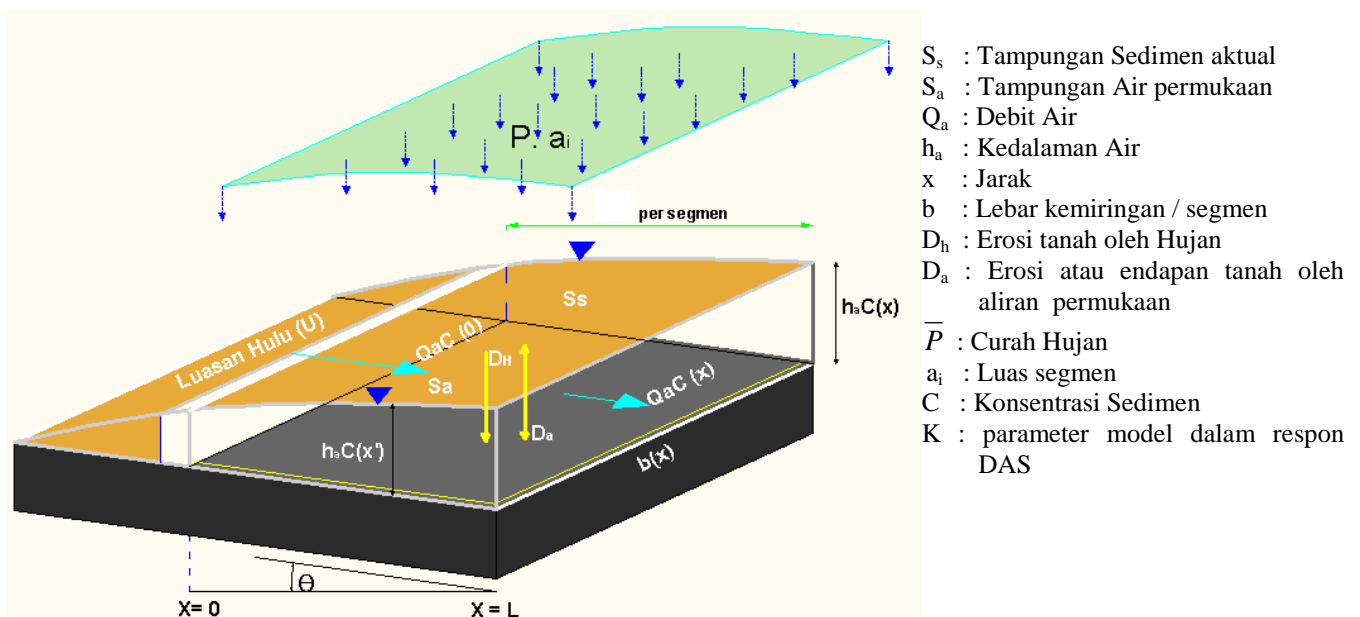
2.3.3.2 Konsentrasi Sedimen (C)

Hubungan antara pelepasan dan pengendapan digambarkan dengan Persamaan (2.10) tergantung keseimbangan antara tampungan sedimen aktual per unit luas (S_s) ($\text{kg/m}^2/\text{jam}$) dan tampungan sedimen maksimum per unit luas (S_s^{max}) ($\text{kg/m}^2/\text{jam}$). Berdasarkan hubungan antara S_s dan S_a , nilai konsentrasi sedimen (C) dari keluaran DAS untuk tiap waktu dapat diselesaikan dengan Persamaan 2.22.

$$C(t) = \frac{S_s(t)}{S_a(t)} \quad (2.22)$$

Pengembangan tahap pertama, mengabaikan kontribusi *subsurface*, dan mengasumsikan bahwa semua aliran air adalah aliran permukaan. Berdasar Gambar 2.7, keseimbangan tampungan sedimen per segmen (S_s) adalah adanya erosi tanah akibat curah hujan (D_h) dan aliran permukaan (D_a) dan keluaran berupa debit sedimen ($Q_a \cdot C$). Erosi tanah akibat curah hujan di estimasi dengan Persamaan 2.9. sedang aliran permukaan yang mengakibatkan pelepasan tanah atau erosi tanah dan pengendapan, tergantung tampungan sedimen maksimum dan tampungan sedimen aktual. Tampungan sedimen maksimum merupakan fungsi kapasitas angkut sedimen (KS_i) dan total tampungan air (S_a) seperti pada Persamaan 2.21.

Akhirnya, persamaan kontinuitas untuk S_a dan S_s pada skala DAS. dipresentasikan seperti pada Persamaan 2.23 dan Persamaan 2.24.



Gambar 2.7. Skema Diagram Model Hujan – Aliran Sedimen secara Fisik Berbasis Distribusi pada Skala per Segmen

$$\frac{dS_a}{dt} = \bar{P} A - \left(\frac{S_a}{K} \right)^{1/r} \quad (2.23)$$

$$\frac{dS_s}{dt} = D_h + D_a - Q_a C$$

$$\frac{dS_s}{dt} = k 56,48 \bar{P} + (\alpha (S_s^{\max} - S_s) - Q_a C) / A \quad (2.24)$$

dimana : A = Total luas DAS (m²)

S_a = Tampungan air permukaan

S_s = Tampungan sedimen aktual

S_s^{max} = Tampungan sedimen maksimum

\bar{P} = Intensitas hujan aktual (m/jam)

K = Parameter model dalam respon DAS

α = Faktor efisiensi pelepasan/pengendapan

k = Kemampuan melepaskan tanah (kg/J)

Q_a = Debit (m³/detik)

C = Konsentrasi Sedimen (mg/l)

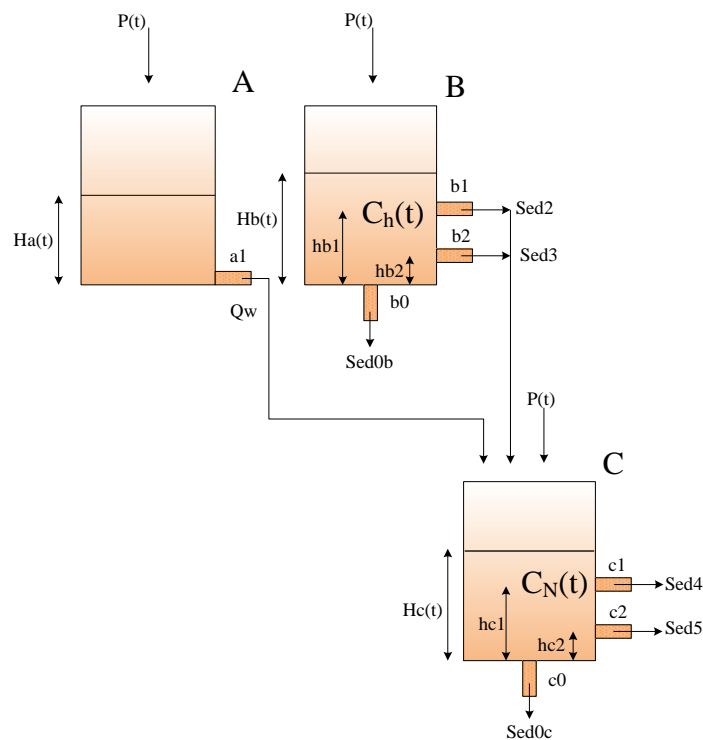
Selanjutnya konfigurasi atau susunan tangki pada model tangki dirumuskan berdasar perlakuan atau skenario, dalam penelitian yang akan dilakukan ini diusulkan 4 (empat) model tangki untuk susunan tangki dengan merepresentasikan proses debit sedimen pada lahan berlereng dan debit sedimen pada saluran atau sungai. Adapun penjelasannya adalah sebagai berikut:

A. Model Tangki 1

Model Tangki 1 terdiri dari tiga tangki meliputi dua tangki berjajar atau seri dan satu tangki cascade. Konsep model tangki 1 adalah menggambarkan erosi DAS terjadi pada erosi permukaan di lahan dan erosi di sungai dengan pengaruh aliran bawah permukaan.

Hujan dalam waktu tertentu merupakan masukan bagi tangki A, B dan C. Hujan tersebut, akan membasahi lapisan permukaan, dan menghasilkan partikel tanah tererosi akibat hempasan percikan air hujan (*detachment by raindrop impact*) di lahan berlereng, selanjutnya apabila tanah sudah jenuh, air akan mengalir di atas permukaan tanah sebagai limpasan permukaan. Limpasan permukaan ini dapat mengakibatkan tanah tergerus dan terangkut (*detachment by flow*) sebagai debit sedimen pada tangki B yang digambarkan pada lobang sisi kanan (Sed2(t) dan Sed3(t)) dan terdapat pula debit sedimen yang

tertahan misal dalam cekungan ($Sed0b(t)$). Tanah yang sudah jenuh, disamping terjadi aliran permukaan, juga terjadi aliran bawah permukaan (tangki A) yang dapat berupa aliran air bawah tanah, yang menuju ke hilir atau sungai ($Q_w(t)$). Tanah tererosi sebagai debit sedimen pada tangki B ($Sed2(t)$ dan $Sed3(t)$) dan aliran air bawah tanah pada tangki A ($Q_w(t)$) akan masuk ke sungai bergabung dengan aliran sungai (tangki C) dan dapat menggerakkan partikel tanah (suspensi) berupa debit sedimen merupakan lobang atas sisi bagian kanan tangki yang bisa disebut debit sedimen ($Sed4(t)$ dan $Sed5(t)$). Saluran di lobang bagian bawah tangki ($Sed0c(t)$) menggambarkan partikel tanah yang tidak atau belum bergerak oleh limpasan permukaan di lereng bukit dan aliran sungai di alur sungai dimana tegangan geser dasar jauh dibawah tegangan geser dasar kritis, partikel tanah akan mengendap di sungai. Total limpasan debit sedimen dari *outlet-outlet* di sisi kanan tangki C adalah total debit sedimen di sungai ($Sed4(t)$ dan $Sed5(t)$) lihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Konfigurasi atau Susunan Model Tangki 1

dimana :

- $P(t)$ = Curah hujan
- a_1 = Koefisien lobang aliran lapisan bawah permukaan tangki A
- b_1 = Koefisien lobang debit sedimen bagian atas di tangki B
- b_2 = Koefisien lobang debit sedimen bagian bawah di tangki B
- c_1 = Koefisien lobang debit sedimen bagian atas di tangki C

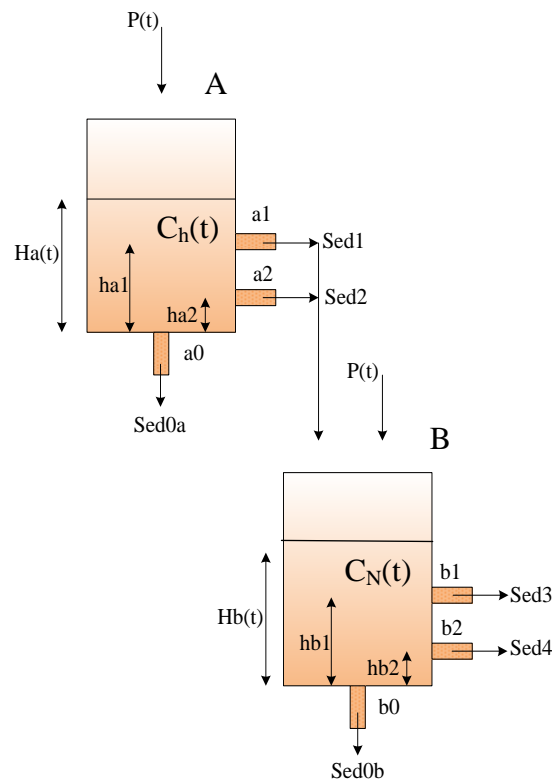
c_2	= Koefisien lobang debit sedimen bagian bawah di tangki C
b_0	= Koefisien lobang endapan sedimen di tangki B
c_0	= Koefisien lobang endapan sedimen di tangki C
hb_1	= Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki B
hb_2	= Tinggi lobang debit sedimen bagian bawah di tangki B
hc_1	= Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki C
hc_2	= Tinggi lobang debit sedimen bagian bawah di tangki C
$Ha(t)$	= Tinggi tampungan sedimen tangki A
$Hb(t)$	= Tinggi tampungan sedimen tangki B
$Hc(t)$	= Tinggi tampungan sedimen tangki C
$Q_w(t)$	= Aliran bawah permukaan tangki A
$C_h(t)$	= Konsentrasi sedimen di lahan
$C_N(t)$	= Konsentrasi sedimen di saluran/sungai
$Sed_2(t), Sed_3(t)$	= Debit sedimen pada lahan berlereng tangki B
$Sed_4(t), Sed_5(t)$	= Debit sedimen pada sungai tangki C
$Sed_{0b}(t)$	= Debit sedimen mengendap di lahan berlereng tangki B
$Sed_{0c}(t)$	= Debit sedimen mengendap di sungai tangki C

B. Model Tangki 2

Model Tangki 2 terdiri dari dua tangki cascade. Konsep model tangki 2 adalah menggambarkan erosi DAS terjadi pada erosi permukaan di lahan dan erosi di sungai.

Hujan dalam waktu tertentu merupakan masukan bagi tangki A, dan B. Hujan tersebut, akan membasahi lapisan permukaan, dan menghasilkan partikel tanah tererosi akibat hempasan percikan air hujan (*detachment by raindrop impact*) di lahan berlereng, selanjutnya apabila tanah sudah jenuh, air akan mengalir di atas permukaan tanah sebagai limpasan permukaan. Limpasan permukaan ini dapat mengakibatkan tanah tergerus dan terangkut (*detachment by flow*) sebagai debit sedimen pada tangki A yang digambarkan pada lobang sisi kanan ($Sed_1(t)$ dan $Sed_2(t)$) dan terdapat pula tanah yang tertahan misal dalam cekungan (Sed_{0a}). Tanah tererosi sebagai debit sedimen pada tangki A ($Sed_1(t)$ dan $Sed_2(t)$) akan masuk ke sungai bergabung dengan aliran sungai (tangki B) dan dapat menggerakkan partikel tanah (suspensi) berupa debit sedimen merupakan lobang atas sisi bagian kanan tangki ($Sed_3(t)$ dan $Sed_4(t)$). Saluran di lobang bagian bawah tangki ($Sed_{0b}(t)$) menggambarkan partikel tanah yang tidak atau belum bergerak oleh limpasan permukaan di lereng bukit dan aliran sungai di alur sungai dimana tegangan geser dasar

jauh dibawah tegangan geser dasar kritis, partikel tanah akan mengendap di sungai. Total limpasan debit sedimen dari *outlet-outlet* di sisi kanan tangki B adalah total limpasan debit sedimen di sungai (Sed3(t) dan Sed4(t)) lihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Konfigurasi atau Susunan Model Tangki 2

dimana :

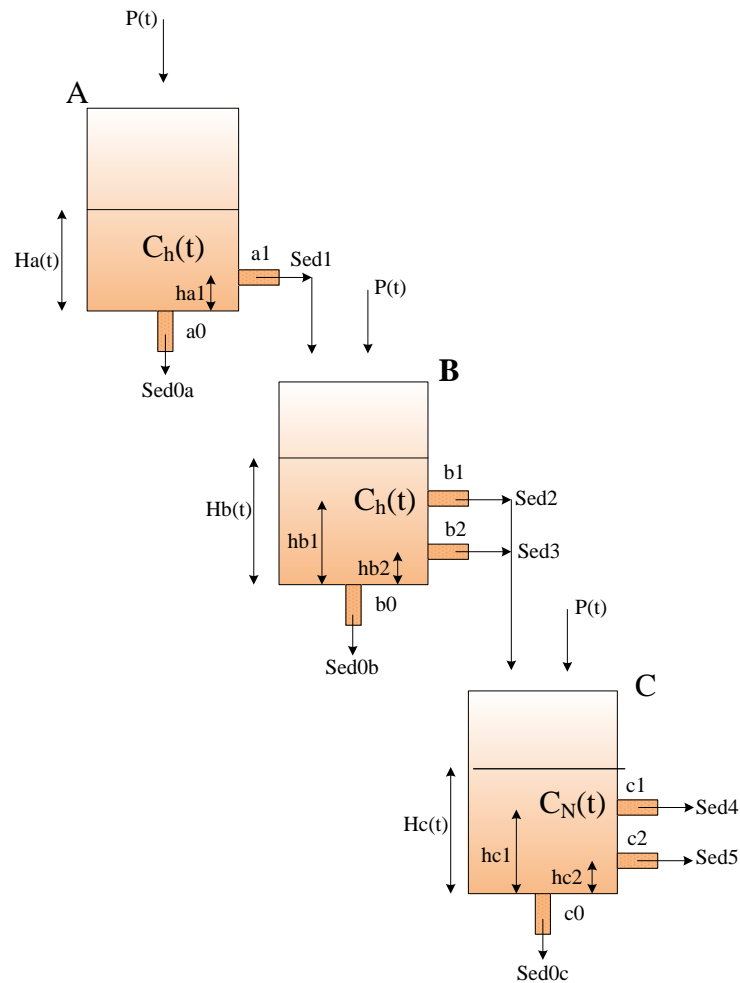
- $P(t)$ = Curah hujan
- a_1 = Koefisien lobang debit sedimen bagian atas di tangki A
- a_2 = Koefisien lobang debit sedimen bagian bawah di tangki A
- b_1 = Koefisien lobang debit sedimen bagian atas di tangki B
- b_2 = Koefisien lobang debit sedimen bagian bawah di tangki B
- a_0 = Koefisien lobang endapan sedimen di tangki A
- b_0 = Koefisien lobang endapan sedimen di tangki B
- ha_1 = Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki A
- ha_2 = Tinggi lobang debit sedimen bagian bawah di tangki A
- hb_1 = Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki B
- hb_2 = Tinggi lobang debit sedimen bagian bawah di tangki B
- $Ha(t)$ = Tinggi tampungan sedimen tangki A
- $Hb(t)$ = Tinggi tampungan sedimen tangki B

- $C_h(t)$ = Konsentrasi sedimen di lahan
 $C_N(t)$ = Konsentrasi sedimen di saluran/sungai
 $Sed1(t), Sed2(t)$ = Debit sedimen pada lahan berlereng tangki A
 $Sed3(t), Sed4(t)$ = Debit sedimen pada sungai tangki B
 $Sed0a(t)$ = Debit sedimen mengendap di lahan berlereng tangki A
 $Sed0b(t)$ = Debit sedimen layang mengendap di sungai tangki B

C. Model Tangki 3

Model Tangki 3 terdiri dari tiga tangki cascade. Konsep model tangki 3 adalah menggambarkan erosi DAS bentuk panjang, dengan asumsi terjadi tiga erosi permukaan di lahan (3 tangki) yaitu di wilayah hulu, wilayah tengah, dan wilayah hilir dari suatu DAS.

Hujan dalam waktu tertentu merupakan masukan bagi tangki A, B dan C. Hujan tersebut, akan membasahi lapisan permukaan, dan menghasilkan partikel tanah tererosi akibat hempasan percikan air hujan (*detachment by raindrop impact*) di lahan berlereng, selanjutnya apabila tanah sudah jenuh, air akan mengalir di atas permukaan tanah sebagai limpasan permukaan. Limpasan permukaan ini dapat mengakibatkan tanah tergerus dan terangkut (*detachment by flow*) sebagai debit sedimen pada tangki A dan B yang digambarkan pada lobang sisi kanan ($Sed1(t)$, $Sed2(t)$ dan $Sed3(t)$) dan terdapat pula tanah yang tertahan misal dalam cekungan ($Sed0a(t)$ dan $Sed0b(t)$). Tanah tererosi sebagai angkatan sedimen pada tangki A dan tangki B ($Sed1(t)$, $Sed2(t)$ dan $Sed3(t)$) akan masuk ke sungai bergabung dengan aliran sungai (tangki C) dan dapat menggerakkan partikel tanah (suspensi) berupa debit sedimen merupakan lobang atas sisi bagian kanan tangki yang bisa disebut limpasan debit sedimen ($Sed4(t)$ dan $Sed5(t)$). Saluran di lobang bagian bawah tangki ($Sed0c(t)$) menggambarkan partikel tanah yang tidak atau belum bergerak oleh limpasan permukaan di lereng bukit dan aliran sungai di alur sungai dimana tegangan geser dasar jauh dibawah tegangan geser dasar kritis, partikel tanah akan mengendap di sungai. Total limpasan debit sedimen dari *outlet-outlet* di sisi kanan tangki C adalah total limpasan debit sedimen di sungai ($Sed4(t)$ dan $Sed5(t)$) lihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Konfigurasi atau Susunan Model Tangki 3

dimana :

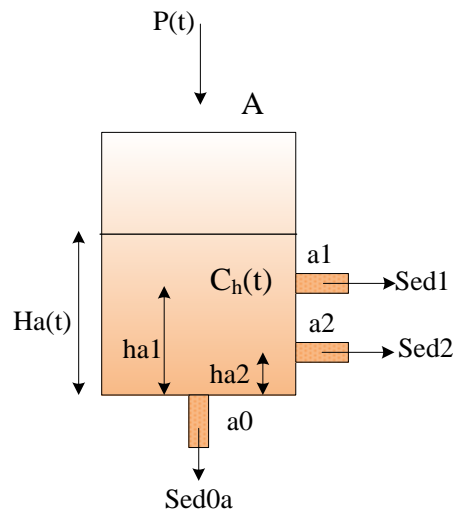
- $P(t)$ = Curah hujan
- a_1 = Koefisien lobang debit sedimen tangki A
- b_1 = Koefisien lobang debit sedimen bagian atas di tangki B
- b_2 = Koefisien lobang debit sedimen bagian bawah di tangki B
- c_1 = Koefisien lobang debit sedimen bagian atas di tangki C
- c_2 = Koefisien lobang debit sedimen bagian bawah di tangki C
- a_0 = Koefisien lobang endapan sedimen di tangki A
- b_0 = Koefisien lobang endapan sedimen di tangki B
- c_0 = Koefisien lobang endapan sedimen di tangki C
- h_{a1} = Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki A
- h_{b1} = Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki B
- h_{b2} = Tinggi lobang debit sedimen bagian bawah di tangki B

hc_1	= Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki C
hc_2	= Tinggi lobang debit sedimen bagian bawah di tangki C
$H_a(t)$	= Tinggi tampungan sedimen tangki A
$H_b(t)$	= Tinggi tampungan sedimen tangki B
$H_c(t)$	= Tinggi tampungan sedimen tangki C
$C_h(t)$	= Konsentrasi sedimen di lahan
$C_N(t)$	= Konsentrasi sedimen di saluran/sungai
$Sed1(t)$	= Debit sedimen pada lahan berlereng tangki A
$Sed2(t), Sed3(t)$	= Debit sedimen pada lahan berlereng tangki B
$Sed4(t), Sed5(t)$	= Debit sedimen pada sungai tangki C
$Sed0a(t)$	= Debit sedimen mengendap di lahan berlereng tangki A
$Sed0b(t)$	= Debit sedimen mengendap di lahan berlereng tangki B
$Sed0c(t)$	= Debit sedimen mengendap di sungai tangki C

D. Model Tangki 4

Model Tangki 4 terdiri dari satu tangki. Konsep model tangki 4 adalah menggambarkan erosi DAS terjadi pada erosi permukaan lahan dalam sistem DAS.

Hujan dalam waktu tertentu merupakan masukan bagi tangki A. Hujan tersebut, akan membasahi lapisan permukaan, dan menghasilkan partikel tanah tererosi akibat hempasan percikan air hujan (*detachment by raindrop impact*) di lahan berlereng, selanjutnya apabila tanah sudah jenuh, air akan mengalir di atas permukaan tanah sebagai limpasan permukaan. Limpasan permukaan ini dapat mengakibatkan tanah tergerus dan terangkut (*detachment by flow*) sebagai debit sedimen dan akan masuk ke sungai bergabung dengan aliran sungai pada tangki A dan dapat menggerakkan partikel tanah (suspensi) berupa aliran sedimen merupakan lobang atas sisi bagian kanan tangki yang bisa disebut limpasan debit sedimen ($Sed1(t)$ dan $Sed2(t)$). Saluran di lobang bagian bawah tangki ($Sed0a(t)$) menggambarkan partikel tanah yang tidak atau belum bergerak oleh limpasan permukaan di lereng bukit dan aliran sungai di alur sungai dimana tegangan geser dasar jauh dibawah tegangan geser dasar kritis, partikel tanah akan mengendap di sungai. Total limpasan debit sedimen dari *outlet-outlet* di sisi kanan tangki A adalah total limpasan debit sedimen di sungai ($Sed1(t)$ dan $Sed2(t)$), lihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Konfigurasi atau Susunan Model Tangki 4

dimana :

$P(t)$ = Curah hujan

a_1 = Koefisien lobang debit sedimen bagian atas di tangki A

a_2 = Koefisien lobang debit sedimen bagian bawah di tangki A

a_0 = Koefisien lobang endapan sedimen di tangki A

ha_1 = Tinggi lobang debit sedimen bagian atas di tangki A

ha_2 = Tinggi lobang debit sedimen bagian bawah di tangki A

$Ha(t)$ = Tinggi tampungan sedimen tangki A

$C_h(t)$ = Konsentrasi sedimen di lahan

$Sed1(t), Sed2(t)$ = Debit sedimen pada lahan berlereng tangki A

$Sed0a(t)$ = Debit sedimen mengendap pada lahan berlereng tangki A

Dalam analisis model tangki untuk prediksi debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai, besarnya debit sedimen yang keluar dari tangki sebanding dengan tampungan (volume) sedimen maksimum yang merupakan fungsi dari kapasitas debit sedimen dan tampungan (volume) air yang direpresentasikan dalam bentuk tinggi tampungan sedimen dalam tangki yang bersangkutan (*storage depth*) di atas lobang.

Penerapan model tangki untuk debit sedimen digambarkan dengan merepresentasikan proses erosi-debit sedimen pada lahan berlereng dan debit sedimen pada saluran atau sungai yang didasarkan pada persamaan kontinuitas aliran air (Persamaan 2.25), dan persamaan kontinuitas aliran sedimen (Persamaan 2.26). Hal ini berdasar analisis dalam DAS merupakan fase lahan (*land phase*), karena mempertimbangkan aliran air di atas permukaan tanah, baik sebagai aliran limpasan maupun limpasan permukaan yang

merupakan penyebab terjadinya proses erosi dan sedimentasi disamping akibat hujan dengan keluaran berupa debit sedimen. Sedangkan fase sungai (*river phase*), karena mempertimbangkan semua aspek aliran dalam saluran (sungai), termasuk di dalamnya proses penggerusan, sedimentasi, variasi aliran melalui sistem sungai, dan semua proses yang terjadi dan bervariasi sesuai dengan sifat aliran, dalam penelitian yang akan dilakukan ini proses hitungan debit sedimen di alur sungai didasarkan pada data pengukuran lapangan. Kemudian persamaan pelepasan butiran tanah oleh hujan dan persamaan pelepasan butiran tanah oleh aliran permukaan adalah seperti pada Persamaan 2.26.

Persamaan kontinuitas untuk aliran air adalah :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2.25)$$

dimana :

- t = waktu
- x = jarak sepanjang aliran
- r = intensitas hujan

Persamaan kontinuitas untuk debit sedimen adalah :

$$\frac{\partial (h_s \cdot C)}{\partial t} + \frac{\partial (q_s \cdot C)}{\partial x} = e(x, t) \quad (2.26)$$

dimana :

- C = Konsentrasi sedimen dalam aliran permukaan (mg/l)
- h_s = Kedalaman air aliran permukaan (m)
- q_s = Debit per satuan lebar (m^2/det)

$$e(x, t) = D_r + DF_h$$

dimana :

menurut Apip et al. (2002),

$$D_r = k \cdot 56,48 \cdot r_h$$

$$DF_h = \alpha (KC_i / 1000 - C_i) h_s = \alpha (S_{sh}^{\max} - S_{sh})$$

$$KC_i = 10^{5.0105 + 1.363 \log ((USP_i - USP_{\text{kritis}}) / \omega)}$$

$$USP_i = v_i \sin \theta_i = v_i i_i$$

dimana :

- D_r = Pelepasan tanah oleh curah hujan (t/d)
- DF_h = Pelepasan tanah oleh aliran permukaan (t/d)
- KC_i = Kapasitas Angkut sedimen tiap segmen
- k = Kehilangan tanah (kg/J)
- r_h = Intensitas hujan efektif di lahan berlereng (mm)
- α = Faktor efisiensi erosi/*deposition*
- C_i = Konsentrasi sedimen tiap segmen (kg/m³)
- h_s = Kedalaman air permukaan (m)
- S_{sh} = Tampungan aliran sedimen di lahan berlereng (t/d)
- S_{sh}^{max} = Tampungan aliran sedimen maksimum di lahan berlereng (t/d)
- v_i = Kecepatan aliran permukaan tiap segmen (m/detik)
- i_i = Gradien kemiringan
- ω = Kecepatan endap sedimen (m/detik)

Jika pelepasan < kapasitas angkut, maka tanah terangkut ke bagian bawah lereng dan pelepasan > kapasitas angkut, maka tanah sebagian kecil terangkut ke bagian bawah lereng, dan sebagian besar mengendap.

Menurut Apip et al. (2008) neraca keseimbangan model tangki untuk aliran sedimen adalah sebagai berikut :

- 1). Neraca keseimbangan model tangki untuk aliran sedimen di lahan berlereng. persamaannya seperti pada Persamaan 2.27 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{dS_{sh}}{dt} &= D_r + DF_h - Q_h \cdot C_h \\ &= k \cdot 56,48 \cdot r_h + \frac{(\alpha \cdot (S_{sh}^{max} - S_{sh}) - Q_h \cdot C_h)}{A_h} \end{aligned} \quad (2.27)$$

dimana :

- dS_{sh} = Tampungan aliran sedimen di lahan berlereng (t/d)
- D_r = Kehilangan tanah oleh curah hujan (t/d)
- DF_h = Kehilangan tanah oleh aliran permukaan (t/d)
- Q_h = Aliran permukaan di lahan berlereng (m³/det)
- C_h = Konsentrasi sedimen di lahan berlereng (kg/m³)
- k = Kehilangan tanah (kg/J)
- r_h = Intensitas hujan efektif di lahan berlereng (mm)
- α = Faktor efisiensi erosi/*deposition*

S_{sh} = Tampung aliran sedimen di lahan berlereng (t/d)

S_{sh}^{max} = Tampung aliran sedimen maksimum di lahan berlereng (t/d)

A_h = Total Luas Lahan (m^2)

2). Neraca keseimbangan model tangki untuk aliran sedimen di alur sungai persamaannya seperti pada Persamaan 2.28 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{dS_{sN}}{dt} &= Y_h + DF_N - Q_N \cdot C_N \\ &= Q_h \cdot C_h + \frac{(\alpha \times (S_{sN}^{max} - S_{sN}) - Q_N \cdot C_N)}{A_N} \end{aligned} \quad (2.28)$$

dimana :

dS_{sN} = Tampung aliran sedimen di alur sungai (t/d)

Y_h = Hasil sedimen dari lahan berlereng (t/d)

DF_N = Kehilangan tanah oleh aliran sungai (t/d)

Q_N = Aliran di alur sungai (m^3/det)

C_N = Konsentrasi sedimen di alur sungai (kg/m^3)

Q_h = Aliran permukaan di lahan berlereng (m^3/det)

C_h = Konsentrasi sedimen di lahan berlereng (kg/m^3)

α = Faktor efisiensi erosi

S_{sN} = Tampung aliran sedimen di alur sungai (t/d)

S_{sN}^{max} = Tampung aliran sedimen maksimum di alur sungai (t/d)

A_N = Total Luas Lahan (m^2)

Konsentrasi Sedimen di lahan berlereng (C_h) dalam analisis diperoleh dari distribusi konsentrasi sedimen (SCD) yang disebabkan oleh curah hujan dengan mempertimbangkan persamaan penelusuran sedimen (Williams, 1975 ; Lee and Singh, 2005), seperti pada Persamaan 2.29 dan Persamaan 2.30.

$$Y = Y_0 \exp(-aTd^{0.5}) \quad (2.29)$$

Kemudian substitusi $C(t)$ dalam Y , menjadi Persamaan 2.30 adalah :

$$C(t) = C_0 \exp(-aTd^{0.5}) \quad (2.30)$$

$C_0 = b \tau = b \gamma y S$, dimana : C_0 diperkirakan fungsi tegangan geser dalam Daerah Aliran Sungai disebabkan aliran permukaan.

dimana :

Y = Hasil sedimen pada potongan melintang (t/d)

Y_0 = Hasil sedimen di hulu potongan (t/d)

- $C(t)$ = Konsentrasi sedimen pada waktu t (mg/l)
- C_0 = Konsentrasi sedimen awal (mg/l)
- a = Koefisien penelusuran
- T = *Time travel* diantara dua potongan melintang (detik)
- d = Diameter median partikel konsentrasi sedimen (mm)
- b = Konstanta proporsional
- γ = Berat jenis air (kg/m^3)
- y = Kedalaman air permukaan (m)
- S = Kemiringan dasar lahan

Namun penelitian yang akan dilakukan ini menggunakan konsentrasi sedimen di lahan berlereng (C_h) dan di saluran/sungai (C_N) dengan cara coba ulang (*try and error*) dalam program model tangki. Rumusan model tangki untuk prediksi debit sedimen pada DAS mengacu pada Persamaan 2.8, Persamaan 2.9, Persamaan 2.10, Persamaan 2.24, Persamaan 2.27, Persamaan 2.28.

Dengan berdasar neraca keseimbangan Persamaan 2.27 dan Persamaan 2.28, neraca keseimbangan 4 model tangki adalah sebagai berikut :

Model Tangki 1 :

$$\frac{dH_a}{dt} = P - Q_w \quad (2.31)$$

$$\frac{dH_b}{dt} = P - Sed_2 - Sed_3 - Sed_{0b} \quad (2.32)$$

$$\frac{dH_c}{dt} = P + Sed_2 + Sed_3 + Q_w - Sed_4 - Sed_5 - Sed_{0c} \quad (2.33)$$

Model Tangki 2 :

$$\frac{dH_a}{dt} = P - Sed_1 - Sed_2 - Sed_{0a} \quad (2.34)$$

$$\frac{dH_b}{dt} = P + Sed_1 + Sed_2 - Sed_3 - Sed_4 - Sed_{0b} \quad (2.35)$$

Model Tangki 3 :

$$\frac{dH_a}{dt} = P - Sed_1 - Sed_{0a} \quad (2.36)$$

$$\frac{dH_b}{dt} = P + Sed_1 - Sed_2 - Sed_3 - Sed_{0b} \quad (2.37)$$

$$\frac{dH_c}{dt} = P + Sed_2 + Sed_3 - Sed_4 - Sed_5 - Sed_{0c} \quad (2.38)$$

Model Tangki 4 :

$$\frac{dH_a}{dt} = P - Sed_1 - Sed_2 - Sed_{0a} \quad (2.39)$$

Analisis model tangki untuk prediksi debit sedimen, penentuan parameter model dan struktur model dilakukan berdasar perlakuan atau skenario Gambar 2.8, Gambar 2.9, Gambar 2.10, dan Gambar 2.11, dan rumusan model tangki untuk debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai pada penelitian yang akan dilakukan seperti pada Persamaan 2.40 sampai dengan Persamaan 2.67 adalah sebagai berikut :

1). Model Tangki 1

$$Q_w(t) = [(Ha(t)+P(t)] \times a_1 \quad (2.40)$$

$$Sed_2(t) = [((Hb(t)+P(t)+ Q_w(t)) \times C_h(t)) - hb_1] \times b_1 \quad (2.41)$$

$$Sed_3(t) = [(Hb(t)+P(t)+ Q_w(t)) \times C_h(t) - hb_2] \times b_2 \quad (2.42)$$

$$Sed_4(t) = [(Sed_2(t)+Sed_3(t))+ ((Hc(t)+P(t)) \times C_N(t)) - hc_1] \times c_1 \quad (2.43)$$

$$Sed_5(t) = [(Sed_2(t)+Sed_3(t))+ ((Hc(t)+P(t)) \times C_N(t)) - hc_2] \times c_2 \quad (2.44)$$

$$Sed_{0b}(t) = [(Hb(t)+P(t)+ Q_w(t)) \times C_h(t)] \times b_0 \quad (2.45)$$

$$Sed_{0c}(t) = [(Hc(t)+P(t)) \times C_N(t)] \times c_0 \quad (2.46)$$

Total limpasan aliran sedimen melalui outlet-outlet di sisi kanan tangki =

$$Sed_{total} = Sed_4(t) + Sed_5(t) \quad (2.47)$$

2). Model Tangki 2

$$Sed_1(t) = [((Ha(t)+P(t)) \times C_h(t)) - ha_1] \times a_1 \quad (2.48)$$

$$Sed_2(t) = [((Ha(t)+P(t)) \times C_h(t)) - ha_2] \times a_2 \quad (2.49)$$

$$Sed_3(t) = [(Sed_1(t)+Sed_2(t)+ ((Hb(t)+P(t)) \times C_N(t)) - hb_1] \times b_1 \quad (2.50)$$

$$Sed_4(t) = [(Sed_1(t)+Sed_2(t)+((Hb(t)+P(t)) \times C_N(t)) - hb_2] \times b_2 \quad (2.51)$$

$$\text{Sed}_{0a}(t) = [(\text{Ha}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t)] \times a_0 \quad (2.52)$$

$$\text{Sed}_{0b}(t) = [(\text{Hb}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_N(t)] \times b_0 \quad (2.53)$$

Total limpasan aliran sedimen melalui outlet-outlet di sisi kanan tangki =

$$\text{Sed}_{\text{total}} = \text{Sed}_3(t) + \text{Sed}_4(t) \quad (2.54)$$

3). Model Tangki 3

$$\text{Sed}_1(t) = [((\text{Ha}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t)) - \text{ha}_1] \times a_1 \quad (2.55)$$

$$\text{Sed}_2(t) = [(\text{Sed}_1(t) + ((\text{Hb}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t))) - \text{hb}_1] \times b_1 \quad (2.56)$$

$$\text{Sed}_3(t) = [(\text{Sed}_1(t) + ((\text{Hb}(t) \text{ P}(t)) \times \text{C}_h(t))) - \text{hb}_2] \times b_2 \quad (2.57)$$

$$\text{Sed}_4(t) = [(\text{Sed}_2(t) + \text{Sed}_3(t) + ((\text{Hc}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_N(t))) - \text{hc}_1] \times c_1 \quad (2.58)$$

$$\text{Sed}_5(t) = [(\text{Sed}_2(t) + \text{Sed}_3(t) + ((\text{Hc}(t)+ \text{P}(t)) \times \text{C}_N(t))) - \text{hc}_2] \times c_2 \quad (2.59)$$

$$\text{Sed}_{0a}(t) = [(\text{Ha}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t)] \times a_0 \quad (2.60)$$

$$\text{Sed}_{0b}(t) = [(\text{Hb}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t)] \times b_0 \quad (2.61)$$

$$\text{Sed}_{0c}(t) = [(\text{Hc}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_N(t)] \times c_0 \quad (2.62)$$

Total limpasan aliran sedimen melalui outlet-outlet di sisi kanan tangki =

$$\text{Sed}_{\text{total}} = \text{Sed}_4(t) + \text{Sed}_5(t) \quad (2.63)$$

4). Model Tangki 4

$$\text{Sed}_1(t) = [((\text{Ha}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t)) - \text{ha}_1] \times a_1 \quad (2.64)$$

$$\text{Sed}_2(t) = [((\text{Ha}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t)) - \text{ha}_2] \times a_2 \quad (2.65)$$

$$\text{Sed}_{0a}(t) = [(\text{Ha}(t)+\text{P}(t)) \times \text{C}_h(t)] \times a_0 \quad (2.66)$$

Total limpasan aliran sedimen melalui outlet-outlet di sisi kanan tangki =

$$\text{Sed}_{\text{total}} = \text{Sed}_1(t) + \text{Sed}_2(t) \quad (2.67)$$

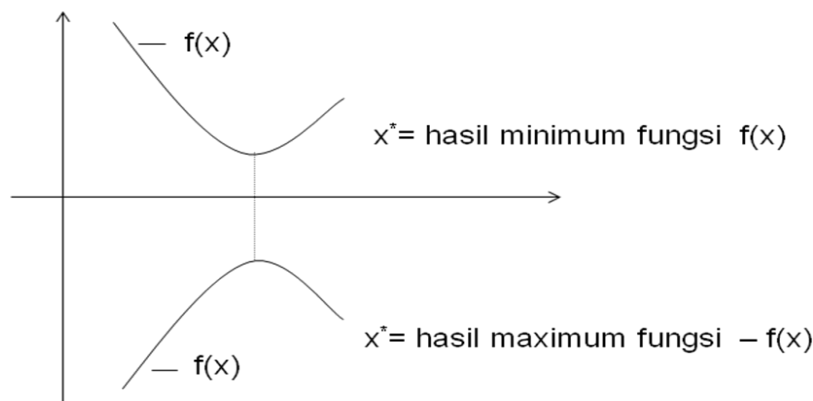
Rumusan Model Tangki tersebut di atas meliputi data masukan model yaitu hujan $\text{P}(t)$, konstanta yang terdiri dari konsentrasi sedimen $\text{C}_h(t)$, $\text{C}_N(t)$, tinggi tampungan sedimen $\text{Ha}(t)$, $\text{Hb}(t)$, $\text{Hc}(t)$, dan parameter model yang terdiri dari koefisien lobang a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , a_0 , b_0 , c_0 dan tinggi lobang ha_1 , ha_2 , hb_1 , hb_2 , hc_1 , hc_2 .

2.4 Optimasi Parameter Model

2.4.1 Pengertian Optimasi

Optimasi pada penelitian yang akan dilakukan ini adalah untuk mendapatkan nilai yang terbaik yaitu nilai selisih minimum antara nilai debit sedimen hasil keluaran model dan nilai debit sedimen terukur. Perlu diketahui bahwa pemodelan ini adalah untuk mencari besaran nilai parameter yang memenuhi hasil yang dihitung dengan optimasi, sehingga diketahui parameternya. Metode optimasi yang digunakan adalah Algoritma Genetika, hal ini dikarenakan parameter model yang dioptimasi pada model tangki cukup banyak antara 5 sampai 12 parameter yang terdiri dari koefisien lobang $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, a_0, b_0, c_0$ dan tinggi lobang $ha_1, ha_2, hb_1, hb_2, hc_1, hc_2$, dan alur proses optimasi dilakukan seperti pada sub bab 3.6.1. dan Gambar 3.26.

Optimasi adalah suatu kegiatan untuk mendapatkan hasil terbaik yang dilakukan berulang-ulang dan saling mempengaruhi. Hasil terbaik yang akan didapat berupa nilai minimum atau nilai maksimum. Jika dinyatakan sebagai suatu fungsi dari beberapa variabel maka optimasi dapat didefinisikan sebagai suatu proses untuk mendapatkan suatu kondisi yang memberikan hasil minimum atau hasil maksimum fungsi tersebut (Rao, 1977), seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Hasil Minimum dan Maksimum (Rao, 1977)

Dalam tahun-tahun ini, ada beberapa tipe variasi metode optimasi global diterapkan dalam kalibrasi model tangki secara otomatis, Cooper et al. (1997) menerapkan metode *Shuffle Complex Evolution* (SCE), metode *simulated annealing* (SA) dan *Genetic Algorithm* (GA) untuk optimasi parameter model tangki dalam susunan dua tangki, Chen et al. (2005) menerapkan metode *Shuffle Complex Evolution* (SCE) dan *multistart Powell* untuk kalibrasi model tangki di Taiwan, kemudian Setiawan et al. (2003), memverifikasi dengan algoritma *Marquardt* bahwa menunjukkan efisiensi dan efektif dalam menentukan

optimasi parameter model tangki untuk dua daerah aliran sungai di Jepang dan di Indonesia, dan Kuok et al. (2010) menerapkan metode optimasi global (GOMs) yaitu metode *Shuffle Complex Evolution* (SCE), metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Genetic Algorithm* (GA) untuk kalibrasi dan optimasi parameter model tangki.

Dari pernyataan diatas, tidak ada kesepakatan umum di antara peneliti metode mana yang paling sesuai untuk kalibrasi model tangki. Oleh karena itu dalam penelitian yang akan dilakukan ini, optimasi parameter model tangki untuk prediksi debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai (DAS) menggunakan metode *Genetic Algorithm* (GA) dengan bantuan Matlab.

2.4.2 Optimasi Parameter Model dengan metode Algoritma Genetika

Algoritma Genetika adalah algoritma pencarian *heuristik* yang didasarkan pada mekanisme evolusi biologis. Keberagaman pada evolusi biologis adalah variasi dari kromosom antar-individu organisme. Variasi kromosom ini akan mempengaruhi laju reproduksi dan tingkat kemampuan organisme untuk tetap hidup.

Individu yang lebih *fit* akan memiliki tingkat *survival* dan tingkat reproduksi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan individu yang kurang *fit*. Pada kurun waktu tertentu (sering dikenal dengan istilah generasi), populasi secara keseluruhan akan lebih banyak memuat organisme yang *fit*.

Algoritma Genetik pertama kali dikembangkan oleh John Holland (1975) cit Suyanto (2005) mengatakan setiap masalah yang berbentuk adaptasi (alami atau buatan) dapat diformulasikan dalam terminologi genetika. Algoritma Genetik adalah simulasi dari proses evolusi Darwin dan operasi genetika atas kromosom.

2.4.2.1 Struktur Umum Algoritma Genetik

Algoritma Genetik ini didasarkan proses genetik yang ada dalam makhluk hidup, yaitu: perkembangan generasi dalam sebuah populasi yang alami, secara lambat laun mengikuti prinsip “siapa yang kuat dia yang bertahan (*survive*)”. Dengan meniru teori evolusi ini, Algoritma Genetik dapat digunakan untuk mencari solusi optimum permasalahan-permasalahan dalam dunia nyata.

Algoritma Genetik menggunakan analogi secara langsung dari kebiasaan yang alami yaitu seleksi alam. Algoritma ini bekerja dengan sebuah populasi yang terdiri dari individu-individu yang memiliki kromosom yang terbentuk dari gen. Setiap kromosom mempresentasikan sebuah solusi yang mungkin bagi persoalan yang ada. Dalam hal ini,

individu dilambangkan dengan sebuah nilai *fitness* yang akan digunakan untuk mencari solusi terbaik dari persoalan yang ada.

Sebelum Algoritma Genetik dapat dijalankan maka sebuah kode yang sesuai (*representative*) untuk persoalan harus dirancang. Untuk ini, maka titik solusi dalam permasalahan dikodekan dalam bentuk kromosom yang terdiri dari komponen genetik terkecil yaitu gen. Kromosom ini merupakan suatu solusi yang masih berbentuk simbol.

Populasi dibangun secara acak, sedangkan populasi berikutnya merupakan evolusi kromosom-kromosom melalui iterasi yang disebut dengan istilah generasi. Pada setiap generasi, kromosom akan melalui proses evaluasi dengan menggunakan alat ukur yang disebut dengan fungsi *fitness*. Nilai *fitness* dari suatu kromosom akan menunjukkan kualitas kromosom dari populasi tersebut.

Generasi berikutnya dikenal dengan istilah anak (*offspring*) yang terbentuk dari gabungan 2 (dua) kromosom. Kromosom yang bertindak sebagai induk (*parent*) menggunakan operator penyilangan (*crossover*) dalam pembentukan *offspring*. Selain operator penyilangan, suatu kromosom dapat dimodifikasi dengan menggunakan operator mutasi. Populasi generasi yang baru tersebut dibentuk dengan cara menyeleksi nilai *fitness* dari kromosom induk (*parent*) dan nilai *fitness* dari kromosom anak (*offspring*), dan menyisihkan sejumlah kromosom yang nilai *fitness*nya rendah sehingga ukuran populasi konstan. Setelah melalui beberapa generasi, maka algoritma ini akan konvergen menjadikan setiap individu dalam populasi memiliki kromosom terbaik.

2.4.2.2 Komponen utama Algoritma Genetik

Ada 6 komponen utama dalam Algoritma Genetik, yaitu Teknik Penyandian, Prosedur Inisialisasi, Fungsi Evaluasi, Seleksi, Operator Genetika dan Penentuan Parameter.

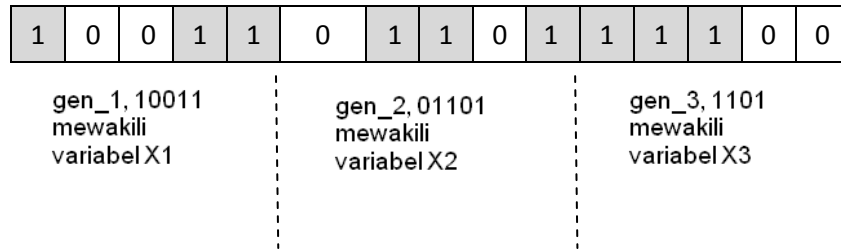
A. Teknik Penyandian

Teknik penyandian meliputi penyandian gen dan kromosom. Gen merupakan bagian dari kromosom. Satu gen akan mewakili satu variabel. Apabila ada 3 variabel maka akan ada 3 gen dan ketiga gen tersebut membentuk kromosom, seperti terlihat pada Gambar 2.13. dan Gambar 2.14. Gen dapat direpresentasikan dalam bentuk: *string biner*, pohon, *array* bilangan riil, daftar aturan, elemen permutasi, elemen program, atau representasi lainnya yang dapat diimplementasikan untuk operator genetika.

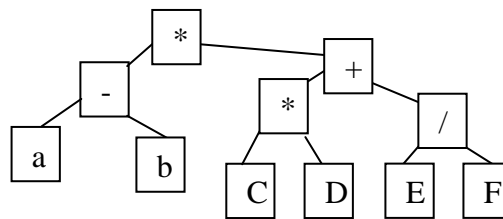
Demikian juga, kromosom dapat direpresentasikan dengan menggunakan :

- *String biner* : 10011,01101,11011, dst
- Bilangan riil : 65.65 , -67,98, 562,88 dst

- Elemen permutasi : E2, E10, E5 dst
- Daftar aturan : R1,R2,R3, dst
- Elemen program : Pemrograman genetika



Gambar 2.13. Ilustrasi penyandian Gen dan Kromosom
- Representasi *String Biner*



Gambar 2.14. Ilustrasi penyandian Gen (*(-(ab))*(CD))/(EF)))
- Representasi Pohon

B. Prosedur Pembangkitan Populasi Awal dan Inisialisasi

Ukuran populasi tergantung pada masalah yang akan dipecahkan dan jenis operator genetika yang akan diimplementasikan. Panjang kromosom (L) ditentukan berdasarkan nilai presisi yang diinginkan untuk sebuah variabel, dan selanjutnya panjang *string biner* untuk setiap variabel $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{\text{var}}}$ dapat ditentukan dengan Persamaan 2.68.

$$\text{Panjang_bit_gen} = \lceil \log_2[(p_{\max} - p_{\min}) \times 10^{\text{presisi}} + 1] \rceil, \text{ dibulatkan} \quad (2.68)$$

Dalam proses pengkodean variabel menggunakan kode biner, setiap nilai variabel akan dikuantisasi dengan Persamaan 2.69.

$$\text{kuantitas} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2^L - 1} \quad (2.69)$$

Nilai desimal dari suatu level kuantisasi setiap nilai variabel p , dihitung dengan rumus Persamaan 2.70.

$$\text{desimal}_{\text{string}} = \frac{P - P_{\min}}{\text{kuantisasi}} \quad (2.70)$$

Pengkodean biner untuk setiap variabel dapat mengikuti Persamaan 2.71.

$$biner_p = nilai_biner(desimal_{string}) \quad (2.71)$$

Dalam proses operasinya algoritma genetik menggunakan kode biner pada kromosom-kromosomnya, namun dalam perhitungan nilai *fitness* dilakukan terhadap nilai riil dari variabel yang diwakili oleh suatu kromosom. Pendekodean kromosom tersebut dapat mengikuti Persamaan 2.72.

$$riil_p = (desimal_{string} * kuantisasi) + p_{min} \quad (2.72)$$

Setelah nilai *riil* dihitung dalam pendekodean kromosom, maka setiap kromosom memiliki nilai *fitness* hasil evaluasi fungsi terhadap $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{Nvar}$ yang dihitung dengan Persamaan 2.73.

$$nilai_{fitness} = f(kromosom) = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{Nvar}) \quad (2.73)$$

Setelah ukuran populasi ditentukan, kemudian harus dilakukan pembangkitan populasi awal dan inisialisasi terhadap kromosom yang terdapat pada populasi tersebut. Inisialisasi kromosom dilakukan secara acak, namun demikian harus tetap memperhatikan *domain* solusi dan kendala (*constraint*) permasalahan yang ada.

C. Fungsi Evaluasi

Ada 3 (tiga) hal yang harus dilakukan dalam melakukan evaluasi yaitu: evaluasi fungsi objektif (fungsi tujuan), konversi fungsi tujuan dan kendala (*constraint*) ke dalam fungsi *fitness*. Secara umum, fungsi *fitness* diturunkan dari konversi fungsi tujuan dan kendala (*constraints*). Permasalahan utama dari aplikasi Algoritma Genetik pada optimasi dengan kendala (*constrained optimization*) adalah bagaimana operator genetika digunakan untuk memanipulasi kromosom yang sering menghasilkan *offspring* yang tidak layak (*infeasible*).

Pada umumnya evaluasi fungsi *fitness* dengan teknik penalti dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.74 berikut :

$$f_fitness = F(x) + p(x) \quad (2.74)$$

di mana :

x = representasi dari kromosom

$f_fitness$ = evaluasi fungsi *fitness*

$F(x)$ = fungsi tujuan

$p(x)$ = *constraints* atau kendala.

Untuk permasalahan maksimalisasi, teknik penalti dinyatakan pada Persamaan 2.75a dan 2.75b adalah :

$$p(x) = 0, \text{ jika } x \text{ feasible} \quad (2.75a)$$

$$p(x) < 0, \text{ jika } x \text{ infeasible} \quad (2.75b)$$

Untuk permasalahan minimalisasi, teknik penalti dinyatakan pada Persamaan 2.76a dan 2.76b adalah :

$$p(x) = 0, \text{ jika } x \text{ feasible} \quad (2.76a)$$

$$p(x) > 0, \text{ jika } x \text{ infeasible} \quad (2.76b)$$

Pada penelitian yang akan dilakukan ini pendekatan optimasi parameter model menggunakan metode Algoritma Genetika pada program MatLab. Penelusuran nilai optimal ditentukan oleh rumusan fungsi tujuan dengan beberapa pembatas atau rumusan kendala. Sebagai fungsi tujuan untuk mencari nilai optimum parameter model tangki akan dipilih salah satu fungsi tujuan di bawah ini (Persamaan 2.77 sampai dengan Persamaan 2.82) dengan pembatas nilai fungsi tujuan terkecil dan hasil ketelitian yang diharapkan yaitu :

$$(1) \quad F_{(x)} = \text{Min} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |sed_{obs}^i - sed_{sim}^i| \right] \quad (2.77)$$

$$(2) \quad F_{(x)} = \text{Min} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{sed_{obs}^i - sed_{sim}^i}{sed_{obs}^i} \right| \right] \quad (2.78)$$

$$(3) \quad F_{(x)} = \text{Min} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{sed_{obs}^i - sed_{sim}^i}{\sqrt{sed_{obs}^i}} \right| \right] \quad (2.79)$$

$$(4) \quad F_{(x)} = \text{Min} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (sed_{obs}^i - sed_{sim}^i)^2 \right] \quad (2.80)$$

$$(5) \quad F_{(x)} = \text{Min} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{sed_{obs}^i - sed_{sim}^i}{sed_{obs}^i} \right)^2 \right] \quad (2.81)$$

$$(6) \quad F_{(x)} = \text{Min} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{sed_{obs}^i - sed_{sim}^i}{\sqrt{sed_{obs}^i}} \right)^2 \right] \quad (2.82)$$

dimana :

F = Fungsi tujuan

sed_{obs}^i = Debit sedimen terukur

sed_{sim}^i = Debit sedimen simulasi

$X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$, dengan n adalah jumlah parameter model, dalam penelitian ini parameter model tangki adalah $a_i, b_i, c_i, ha_i, hb_i, hc_i$

N = Jumlah data

D. Seleksi

Seleksi ini bertujuan untuk memberikan kesempatan reproduksi yang besar bagi anggota populasi yang paling *fit*. Seleksi akan menentukan individu-individu yang akan dipilih untuk dikenai rekombinasi dan bagaimana *offspring* terbentuk dari individu-individu terpilih tersebut. Langkah pertama yang dilakukan dalam seleksi ini adalah pencarian nilai *fitness*. Setiap individu dalam suatu wadah seleksi akan menerima probabilitas reproduksi yang tergantung pada nilai objektif dirinya sendiri terhadap nilai objektif dari semua individu dalam wadah seleksi tersebut. Nilai *fitness* ini akan digunakan pada tahap-tahap seleksi berikutnya.

Ada beberapa metode seleksi dari induk, antara lain:

- (1) *Rank-based fitness assignment*. Populasi diurutkan menurut nilai objektifnya. Nilai *fitness* dan tiap-tiap individu hanya tergantung pada posisi individu tersebut dalam urutan, dan tidak dipengaruhi oleh nilai objektifnya.
- (2) *Roulette wheel selection*. Metode yang paling sederhana, dan sering juga dikenal dengan nama *stochastic sampling with replacement*. Pada metode ini individu-individu dipetakan dalam suatu segmen garis secara berurutan sedemikian hingga tiap-tiap segmen individu memiliki ukuran yang sama dengan ukuran *fitness*nya. Sebuah bilangan *random* dibangkitkan dan individu yang memiliki segmen dalam kawasan bilangan *random* tersebut akan terseleksi. Proses ini diulang hingga diperoleh sejumlah individu yang layak atau *feasible*.
- (3) *Stochastic universal sampling* memiliki nilai bias nol dan penyebaran yang minimum. Pada metode ini, individu-individu dipetakan dalam suatu segmen garis secara berurutan sehingga tiap-tiap segmen individu memiliki ukuran yang sama dengan ukuran *fitness*nya seperti halnya pada seleksi roda *roulette*. Kemudian, hal itu diberi sejumlah *pointer* sebanyak individu yang ingin diseleksi pada garis tersebut.
- (4) *Local selection*. Setiap individu yang berada di dalam konstrain tertentu disebut dengan nama lingkungan lokal. Interaksi antar individu hanya dilakukan di dalam wilayah tersebut. Lingkungan tersebut ditetapkan sebagai struktur yang populasinya

tersebut terdistribusi. Lingkungan tersebut juga dapat dipandang sebagai kelompok pasangan-pasangan yang potensial.

- (5) *Truncation selection*. Seleksi ini biasanya digunakan oleh populasi yang jumlahnya sangat besar. Pada metode ini, individu-individu diurutkan berdasarkan nilai *fitness*-nya. Hanya individu-individu yang terbaik saja yang akan diseleksi sebagai induk. Parameter yang digunakan dalam metode ini adalah suatu nilai ambang *trunc* yang mengindikasikan ukuran populasi yang akan diseleksi sebagai induk, jumlahnya berkisar 10%-50%. Individu-individu yang ada di bawah nilai ambang ini tidak akan menghasilkan keturunan.
- (6) *Tournament selection*. Pada metode seleksi dengan turnamen ini, akan ditetapkan suatu nilai *tour* untuk individu-individu yang dipilih secara *random* dari suatu populasi. Individu-individu yang terbaik dalam kelompok ini akan diseleksi sebagai induk. Parameter yang digunakan pada metode ini adalah ukuran *tour* yang bernilai antara 2 sampai N (jumlah individu dalam suatu populasi).

Dalam penelitian yang akan dilakukan ini metode seleksi yang digunakan adalah metode seleksi dengan mesin *roulette* dan sering dikenal dengan nama *stochastic sampling with replacement* seperti diuraikan di atas. Cara kerja metode tersebut dalam penelitian ini adalah :

- (1) Perhitungan nilai fitness dari setiap individu $f_fitness(i)$. Dalam metode Algoritma Genetik fungsi *fitness* merupakan gabungan dari fungsi tujuan (dalam hal ini fungsi yang ingin dioptimasi yaitu parameter-parameter model tangki) dan *constraint* (dalam hal ini penjumlahan nilai-nilai parameter-parameter dalam satu model tangki sama dengan 1(satu) dan nilai parameter model kurang dan sama dengan 1 (satu)),
- (2) Dihitung nilai *total fitness* $Tot_fitness(i)$ dari semua individu,
- (3) Dihitung *running sum of fitness*, $run_f(i)$ yang merupakan akumulasi dari nilai $f_fitness$ yang berurutan,
- (4) Bangkitkan bilangan *random* antara 1 sampai dengan *total fitness* untuk masing-masing *running sum of fitness* tersebut,
- (5) Dari bilangan *random* yang dihasilkan, ditentukan individu mana yang terpilih dalam proses seleksi.

E. Operator Genetika

Ada 2 (dua) operator genetika, yakni sebagai berikut.

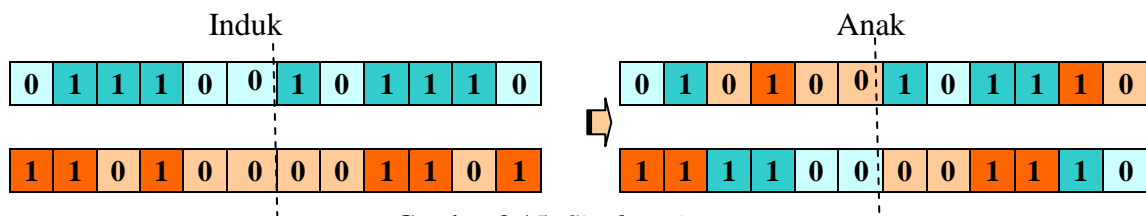
- (1). Operator untuk melakukan rekombinasi, yang terdiri dari:

- a. Rekombinasi bernilai *real*
 - a) Rekombinasi diskret akan menukar nilai variabel antar kromosom induk.
 - b) Rekombinasi *intermediate* (menengah) merupakan metode rekombinasi yang hanya dapat digunakan untuk variabel riil. Nilai variabel anak dipilih di sekitar nilai-nilai variabel induk.
 - c) Rekombinasi garis ini pada dasarnya sama dengan rekombinasi menengah, hanya saja nilai probabilitas untuk semua variabel sama.
- b. Rekombinasi bernilai biner (*crossover*)

Penelitian ini menggunakan rekombinasi biner satu titik (*one point crossover*) dan tentang jenis dan ilustrasi operasi genetik rekombinasi bernilai biner dapat diuraikan sebagai berikut ini.

a) *Crossover* satu titik

Pada penyilangan satu titik, posisi penyilangan k ($k = 1, 2, \dots, N - 1$), dengan N adalah panjang kromosom diseleksi secara *random* dan dilakukan sama untuk semua pasangan kromosom dalam populasi. Variabel-variabel ditukar antar kromosom pada titik tersebut untuk menghasilkan anak, seperti terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. *Single-point cross over*

Misalkan ada 2 kromosom dengan panjang 12 :

Induk 1 : **0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0**

Induk 2 : **1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1**

Posisi penyilangan yang terpilih secara *random* misalkan 5

Setelah penyilangan, diperoleh kromosom-kromosom baru :

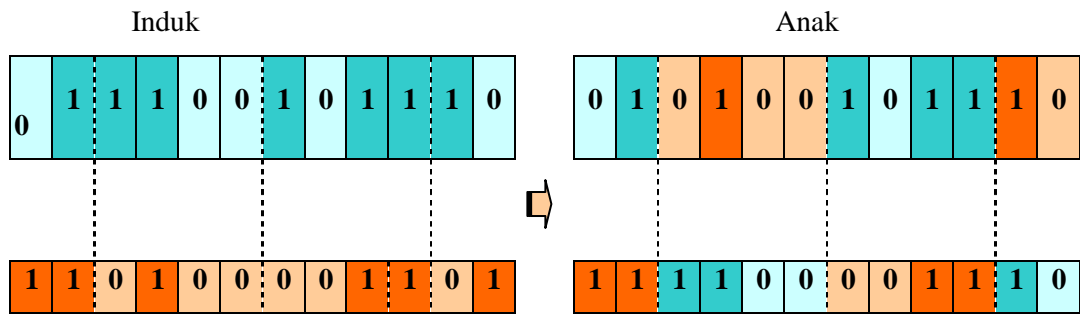
Anak 1 : **0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1**

Anak 2 : **1 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 0**

b) *Crossover* banyak titik (*Multi-point crossover*)

Pada penyilangan banyak titik, m posisi penyilangan k , ($k=1, 2, \dots, N-1$, $1 = 1, 2 \dots m$) dengan $N =$ panjang kromosom diseleksi secara *random* dan tidak diperbolehkan ada posisi yang sama, serta diurutkan naik. Proses penyilangan

ini berlaku sama untuk semua pasangan kromosom dalam populasi. Variabel-variabel ditukar antar kromosom pada titik tersebut untuk menghasilkan anak seperti terlihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. *Multi-point crossover*

Misalkan ada 2 kromosom dengan panjang 12 :

Induk 1 : **0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0**

Induk 2 : **1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1**

Posisi penyilangan yang terpilih :

misalkan ($m = 3$) : 2 6 10

Setelah penyilangan, diperoleh kromosom-kromosom baru :

Anak 1 : **0 1 0 1 0 0 1 0 1 1 0 1**

Anak 2 : **1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0**

c) *Crossover* seragam

Pada penyilangan seragam, setiap lokasi memiliki potensi sebagai tempat penyilangan. Sebuah *mask* penyilangan dibuat sepanjang *bit-bit* kromosom secara *random* yang menunjukkan *bit-bit* dalam *mask* yang induknya akan meng-*supply* anak dengan *bit-bit* yang ada. Proses penyilangan ini berlaku sama untuk semua pasangan kromosom dalam populasi.

Induk mana yang akan menyumbangkan *bit* ke anak dipilih secara *random* dengan probabilitas yang sama. Di sini, anak₁ akan dihasilkan dari induk₁ jika *bit mask* bernilai 1, atau sebaliknya, anak₁ akan dihasilkan dari induk₂ jika *bit* masuk bernilai 0, sedangkan anak₂ dihasilkan dan kebalikan *mask*.

Misalkan ada 2 kromosom dengan panjang 12:

Induk 1: **0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0**

Induk 2 : **1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1**

Mask bit:

Sampel 1: 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 0 1

Sampel 2: 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0

Setelah penyilangan, diperoleh kromosom-kromosom baru:

Anak 1 : 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0

Anak 2 : 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1

d) *Crossover* dengan permutasi

Pada penyilangan dengan permutasi ini, kromosom-kromosom anak diperoleh dengan cara memilih sub-barisan suatu *tour* dan satu induk dengan tetap menjaga urutan dan posisi sejumlah *node* yang mungkin terhadap induk yang lainnya. Proses penyilangan ini berlaku sama untuk semua pasangan kromosom dalam populasi.

(2) Operator untuk melakukan mutasi

Setelah mengalami proses rekombinasi, pada anak (*offspring*) dapat dilakukan mutasi. Variabel *offspring* dimutasi dengan menambahkan nilai *random* yang sangat kecil (ukuran langkah mutasi), dengan probabilitas yang rendah. Peluang mutasi (P_m) didefinisikan sebagai persentase dan jumlah total gen pada populasi yang mengalami mutasi. Peluang mutasi mengendalikan banyaknya gen baru yang akan dimunculkan untuk dievaluasi. Jika peluang mutasi terlalu kecil, banyak gen yang mungkin berguna tidak pernah dievaluasi. Akan tetapi bila peluang mutasi ini terlalu besar, maka akan terlalu banyak gangguan acak, sehingga anak akan kehilangan kemiripan dari induknya, dan juga algoritma akan kehilangan kemampuan untuk belajar dari histori pencarian. Ada beberapa pendapat mengenai laju mutasi ini. Ada yang berpendapat bahwa, laju mutasi sebesar $1/(\text{banyak } bit \text{ dalam semua gen})$ akan memberikan hasil yang cukup baik. Ada juga yang beranggapan bahwa laju mutasi tidak tergantung pada ukuran populasinya. Kromosom hasil mutasi harus diperiksa, apakah masih berada pada *domain* solusi, dan bila perlu dapat dilakukan perbaikan. Mutasi ini berperan untuk menggantikan gen yang hilang dan populasi akibat proses seleksi yang memungkinkan munculnya kembali gen yang tidak muncul pada inisialisasi populasi.

a. Mutasi bernilai *real*

Pada mutasi bilangan *real*, ukuran langkah mutasi biasanya sangat sulit ditentukan. Ukuran yang kecil biasanya sering mengalami kesuksesan, namun adakalanya ukuran yang lebih besar akan berjalan lebih cepat. Operator mutasi untuk bilangan *real* ini dapat ditetapkan sebagai:

- a) variabel yang dimutasi = variabel \pm range*delta; (\div atau $-$ memiliki probabilitas yang sama).
- b) range = 0.5 * domain variabel; (interval pencarian).
- c) delta = $\sum (a_i * 2^i)$; $a_i = 1$ dengan probabilitas $1/rn$, selain itu $a_i = 0$, dengan $m = 20$.

b. Mutasi bernilai *biner*

Cara sederhana untuk mendapatkan mutasi biner adalah dengan mengganti satu atau beberapa nilai gen dari kromosom. Langkah-langkah mutasi ini adalah:

- a) Hitung jumlah gen pada populasi (panjang kromosom dikalikan dengan ukuran populasi).
- b) Pilih secara acak gen yang akan dimutasi.
- c) Tentukan kromosom dan gen yang terpilih untuk dimutasi.
- d) Ganti nilai gen (0 ke 1, atau 1 ke 0) dan kromosom yang akan dimutasi tersebut

Operasi genetika mutasi ini selalu dilakukan mengikuti proses *crossover* apabila memenuhi persyaratan parameter probabilitas mutasi (p_m).

F. Penentuan Parameter

Parameter yang dimaksud di sini adalah parameter kontrol Algoritma Genetik, yaitu: ukuran populasi (*popsize*), probabilitas *crossover* (p_c), dan probabilitas mutasi (p_m). Nilai parameter ini ditentukan berdasarkan permasalahan yang akan dipecahkan. Menurut Suyanto (2005), ada beberapa rekomendasi yang dapat digunakan untuk menentukan parameter kontrol Algoritma Genetik, antara lain:

- (1) Untuk permasalahan yang memiliki kawasan solusi cukup besar, De Jong merekomendasikan untuk nilai parameter sebagai berikut:

$$(popsize; p_c, p_m) = (50; 0,6; 0,001).$$

- (2) Bila rata-rata *fitness* setiap generasi digunakan sebagai indikator, maka Grefenstette merekomendasikan:

$$(popsize; p_c, p_m) = (30; 0,95; 0,01).$$

- (3) Bila *fitness* dari individu terbaik dipantau pada setiap generasi, maka usulannya adalah:

$$(popsize; p_c, p_m) = (80; 0,45; 0.01).$$

Menurut Suyanto (2005), ukuran populasi sebaiknya tidak lebih kecil dari 30 untuk sembarang jenis permasalahan agar terhindari tercapainya nilai optimum semu.

Constraints proses optimasi pada penelitian ini adalah koefisien lobang tangki dan tinggi lobang tangki. Analisis optimasi parameter model tangki untuk prediksi debit sedimen yang diasumsikan sebagai representatif proses debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai diuraikan dalam Sub Bab 2.4.2 dan Sub Bab 3.2.2.

2.5 Analisis Pengolahan Data

Langkah dalam metode penelitian pengembangan model tangki untuk prediksi debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai adalah pengumpulan dan pengolahan data. Pengumpulan data meliputi data sekunder seperti peta Daerah Aliran Sungai (DAS), peta tata guna lahan, peta stasiun curah hujan. Kemudian data primer atau data observasi di sub DAS Kreo meliputi pengamatan dan pengukuran data hujan, data debit sedimen layang, data debit dengan periode waktu harus sama dan dilakukan di pos duga atau stasiun pengamatan arus sungai (SPAS). Selanjutnya dilakukan pengolahan data meliputi pencatatan data, analisis dan interpretasi hasil.

Analisis pengolahan data dalam penelitian yang akan dilakukan ini adalah analisis hasil pengukuran data primer berupa data hujan, data debit, data debit sedimen dan analisis pengujian data sampel di laboratorium.

Data hujan diukur dan dicatat dengan menggunakan bantuan alat telemetri yaitu alat ukur hujan *automatic rainfall raingauge* (ARR) yang dihubungkan dengan komputer melalui internet, sehingga data hujan langsung terbaca pada komputer.

Data debit diawali dengan mengukur tinggi muka air berdasarkan alat tinggi muka air otomatis dikenal dengan *Automatic Water Level Recorder* (AWLR). Setelah diketahui tinggi muka air diukur luas penampang basah sungai. Kemudian diukur kecepatan arus sungai dengan alat *Current meter* maka dapat dihitung debit dengan mengalikan luas penampang dengan kecepatan arus, seperti pada Persamaan 2.83.

$$Q = A \times V \quad (2.83)$$

dengan : Q = debit (m³/detik)

A = Luas penampang basah (m²)

V = kecepatan arus (m/detik)

Sedangkan data debit sedimen, dalam penelitian ini metode pengukuran debit sedimen layang menggunakan metode *Equal Discharge Increment* (EDI), dimana pada

suatu penampang melintang dibagi menjadi beberapa sub penampang, dimana setiap sub penampang harus mempunyai debit yang sama. Kemudian pengukuran sedimen dengan cara ini dilaksanakan pada bagian tengah setiap sub penampang tersebut. Suripin, (2002^b) persamaan dasar Laju sedimen (debit sedimen layang) menggunakan Persamaan 2.84 dan Persamaan 2.85.

$$Q_s = 0,0864 \times C \times Q_w \quad (2.84)$$

$$C = aQ_w^b \quad (2.85)$$

dimana :

Q_s = debit sedimen layang harian (ton/hari)

C = konsentrasi sedimen layang (mg/liter)

Q_w = debit (m^3 / detik)

a dan b = konstanta yang diperoleh dari regresi

Debit potensi kesalahan yang serius yang timbul pada penggunaan lengkung laju sedimen untuk menghitung beban sedimen adalah digunakannya data debit harian rata-rata, apalagi kalau yang digunakan debit harian rata-rata dari rerata tiga pengukuran (jam 06.00 pagi, 12.00 siang dan 17.00 sore). Hal ini disebabkan hujan deras terjadi pada malam tengah hari, sehingga puncak banjir yang ditimbulkannya terjadi pada malam hari (Suripin, 2002^b). Sedangkan menurut Simons and Senturk (1992), Yang (1996) *cit* Kodoatie (2002) persamaan-persamaan transpor sedimen dapat diklasifikasikan dalam bentuk dasar seperti pada Persamaan 2.86.

$$Q_s = A(B-B_c)^D \quad (2.86)$$

dimana :

Q_s = debit sedimen

A = parameter yang berhubungan dengan aliran dan karakteristik sedimen

B = parameter yang bisa berupa debit Q , kecepatan aliran rata-rata u , kemiringan muka air S_w , kemiringan energi S_f , kemiringan dasar sungai S_o , tegangan geser τ , kuat arus τ_u , kuat arus satuan uS dll.

B_c = parameter kondisi kritis yang berhubungan dengan B pada gerakan awal (*incipien motion*)

D = parameter yang berhubungan dengan aliran dan karakteristik sedimen

Menurut Soewarno (1991), Konsentrasi sedimen dari suatu penampang sungai merupakan perbandingan antara debit sedimen dan debit aliran sungai. Nilai ini dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 2.87.

$$Q_s = C \times Q \quad (2.87)$$

dimana:

Q_s = debit sedimen

C = konsentrasi sedimen

Q = debit aliran

Untuk pengukuran cara EDI ini Persamaan 2.87 dapat diubah menjadi Persamaan 2.88. dengan memasukkan Persamaan 2.89.

$$Q_s = \sum_1^n \bar{C}_i q_i \Delta x_i \quad (2.88)$$

Apabila, $Q = \sum_1^n q_i \Delta x_i$ (2.89)

Maka konsentrasi rata-ratanya seperti pada Persamaan 2.90.

$$\bar{C}_i = \frac{\sum_1^n \bar{C}_i q_i \Delta x_i}{\sum_1^n q_i \Delta x_i} \quad (2.90)$$

dimana:

\bar{C}_i = konsentrasi rata-rata sedimen pada suatu penampang sungai

C_i = konsentrasi sedimen pada sub penampang ke i

Δx_i = lebar sub penampang sungai ke i

q_i = debit per lebar sub penampang

n = jumlah vertikal pengukuran

karena pada cara EDI nilai $q_1, q_2 = \dots = q_n = Q/n$ maka Persamaan 2.90 dapat diubah menjadi Persamaan 2.91 atau Persamaan 2.92.

$$\bar{C} = \frac{\frac{Q}{n} \sum_1^n C_i}{Q} \quad (2.91)$$

$$\bar{C} = \frac{\sum_1^n C_i}{n} \quad (2.92)$$

Persamaan 2.92 adalah merupakan konsentrasi sedimen rata-rata pada penampang sungai yang diukur.

Analisis pengujian data sampel di laboratorium adalah analisis berat sedimen dan dapat dilakukan sebagai berikut :

Sampel yang berupa air dan partikel tanah erosi, yang telah dimasukkan dalam botol diberi label: nomor urut dan lokasi serta tanggal kejadian, mula-mula ditiriskan ± 24 jam agar partikel tanah mengendap, setelah itu air di buang. Partikel tanah dan sisa air kemudian dimasukkan ke dalam cawan porselin yang sudah diketahui beratnya dan diberi label yang sesuai (tanggal dan nomor). Pada tahap ini, dilakukan pencatatan: nomor kode cawan, tanggal kejadian hujan, nomor urut, dan berat cawan yang digunakan. Dari sebuah sampel telah tercatat berat cawan yang digunakan, seperti pada Persamaan 2.93.

$$W_m = \dots \text{ gram} \quad (2.93).$$

Selanjutnya cawan beserta isinya dimasukkan ke dalam oven pada suhu 110°C selama ± 24 jam, sehingga tanah menjadi kering (mutlak). Setelah itu cawan yang berisi tanah kering (tanah tererosi) dikeluarkan dari oven, ditiriskan ± 15 menit setelah itu dimasukkan ke desikator dan setelah dingin baru dilakukan penimbangan. Dari sebuah sampel, telah tercatat berat cawan W_m , dan berat (cawan + tanah tererosi) dalam satuan gram, seperti pada Persamaan 2.94.

$$W(m + s) = \dots \text{ gram} \quad (2.94).$$

$$W(m + s) = \text{berat (cawan + tanah tererosi)} \dots \text{ gram}$$

Maka W_s = menyatakan berat tanah kering atau tanah tererosi per sampel per lokasi per kejadian hujan, besarnya dapat dihitung : $W_s = [W(m+s) - W_m]$ gram untuk 500 CC volume air. Maka jumlah tanah tererosi per lokasi per kejadian hujan, dapat dihitung seperti pada Persamaan 2.95.

$$W_{tot} = (V_{tot}/500) \times W_s = \dots \text{ gram} \quad (2.95).$$

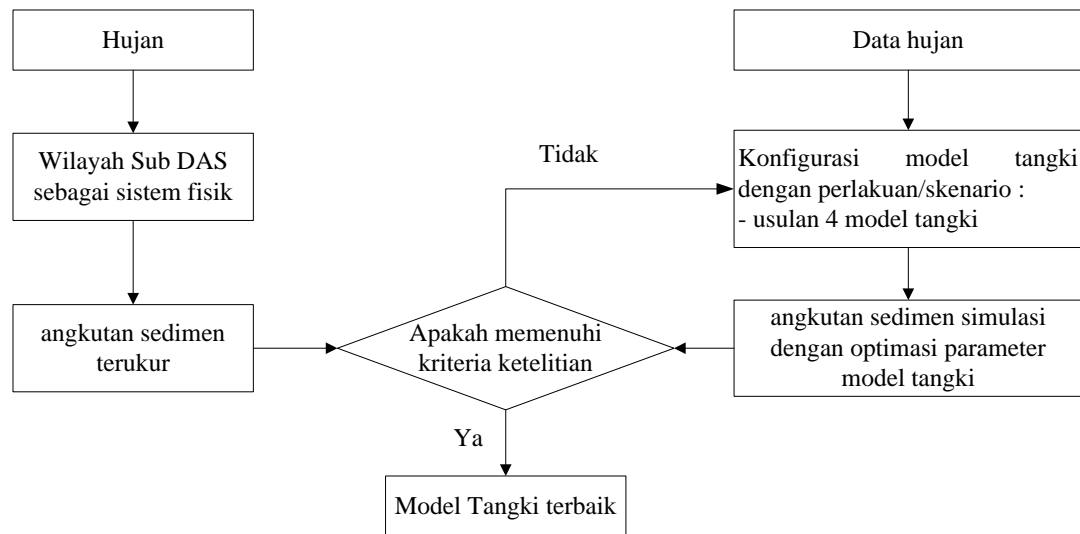
2.6 Kriteria Uji Ketelitian Model

Model yang disusun untuk mensimulasikan proses di alam merupakan model yang harus mampu mendekati proses yang sebenarnya terjadi. Dalam kaitan ini, apapun bentuk model, pendekatan apapun yang digunakan, maka keluaran dari suatu model harus mampu mendekati proses yang terjadi sesungguhnya di alam. Akan tetapi hampir tidak mungkin proses alam yang terjadi dapat disamai dengan tepat. Oleh sebab itu akan selalu ada penyimpangan antara keluaran terukur (*observed*) dan keluaran yang dihitung (*simulated*) yang dijelaskan pada Gambar 2.17. Untuk melihat sejauh mana hasil pendekatan optimasi nilai parameter Sub Daerah Aliran Sungai, maka keluaran hitungan

kalibrasi dengan cara optimasi perlu dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dengan cara terukur.

Ketelitian model tergantung pada tiga faktor yaitu ketelitian data masukan, keefektifitasan pada penilaian parameter dan kesalahan-kesalahan pada model itu sendiri (Linsley et al., 1986). Pengujian ketelitian model dapat dilakukan dengan melakukan tes terhadap data terukur dan data hasil simulasi. Model dikatakan teliti jika terdapat korelasi yang tinggi antara data terukur dan data hasil simulasi serta mempunyai penyimpangan nilai sekecil mungkin.

Pada penelitian ini digunakan koefisien korelasi (R), kesalahan volume (VE), rerata kesalahan relatif (RE) dan kesalahan rata-rata kuadrat terkecil (RMSE) sebagai kriteria ketelitian uji model, dan dihitung dalam program bantu. Batasan nilai kriteria ketelitian uji model dalam penelitian ini adalah $VE < \%5$, $-10\% < RE < -10\%$, $R > 0,7$ dan RMSE mendekati nilai 0 (nol).



Gambar 2.17. Skema Kalibrasi Model

Koefisien korelasi (R) adalah harga yang menunjukkan besarnya keterikatan antara nilai terukur dengan nilai simulasi. Jika harga R bernilai 1, maka dapat dikatakan bahwa korelasi antara keduanya sangat erat, namun jika R bernilai nol maka kedua nilai dikatakan tidak mempunyai hubungan sama sekali. Koefisien korelasi dirumuskan seperti pada Persamaan 2.71. (Solaimani, 2009)

$$R = \sqrt{\frac{Dt^2 - D^2}{Dt^2}} \quad (2.71)$$

$$Dt^2 = \sum_{i=1}^N (Sed_{obs}^i - \overline{Sed})^2$$

$$D^2 = \sum_{i=1}^N (Sed_{obs}^i - Sed_{sim}^i)$$

dimana :

Sed_{sim}^i = debit sedimen simulasi periode ke-i (ton/hari)

Sed_{obs}^i = debit sedimen terukur periode ke-i (ton/hari)

N = jumlah data

Kesalahan volume (*volume error*, VE) adalah nilai yang menunjukkan perbedaan volume hasil simulasi dan terukur selama periode simulasi. Jika nilai VE sangat kecil berarti jumlah volume nilai simulasi dan terukur hampir sama. Sebaliknya jika VE sangat besar maka terjadi penyimpangan hasil simulasi dan terukur. Kesalahan volume dirumuskan seperti pada Persamaan 2.72. (Lee and Singh, 2005)

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^N Sed_{obs}^i - \sum_{i=1}^N Sed_{sim}^i}{\sum_{i=1}^N Sed_{obs}^i} \times 100 \quad (2.72)$$

dimana :

VE = selisih volume konsentrasi sedimen

Sed_{sim}^i = debit sedimen simulasi periode ke-i (ton/hari)

Sed_{obs}^i = debit sedimen terukur periode ke-i (ton/hari)

N = Jumlah data

Kesalahan relatif rerata (*Relatif Error*, RE) berfungsi untuk mengetahui penyimpangan relatif rerata dari debit sedimen simulasi terhadap debit sedimen terukur. Keuntungan menggunakan RE adalah kemudahan dalam pengecekan hasil simulasi, karena jika berharga mendekati nol berarti penyimpangan debit sedimen simulasi terhadap debit sedimen terukur sangat kecil. Kesalahan relatif rerata dirumuskan seperti pada Persamaan 2.73. (Chen and Pi, 2004)

$$RE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Sed_{sim}^i - Sed_{obs}^i|}{Sed_{obs}^i} \quad (2.73)$$

dimana :

RE = kesalahan relatif

Sed_{sim}^i = debit sedimen simulasi periode ke-i (ton/hari)

Sed_{obs}^i = debit sedimen terukur periode ke-i (ton/hari)

N = Jumlah data

Akar rata-rata jumlah kuadrat kesalahan (*Root Mean Squared Error*, RMSE) adalah ukuran perbedaan antara nilai debit sedimen simulasi dengan nilai debit sedimen terukur. RMSE dirumuskan seperti pada Persamaan 2.74. (Solaimani, 2009)

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\sum Sed_{sim}^i - Sed_{obs}^i)^2}{N}} \quad (2.74)$$

dimana :

RMSE = akar rata-rata jumlah kuadrat kesalahan

Sed_{sim}^i = debit sedimen simulasi periode ke-i (ton/hari)

Sed_{obs}^i = debit sedimen terukur periode ke-i (ton/hari)

N = Jumlah data

2.7 Analisis Sensitifitas

Analisis *sensitifitas* pada model tangki untuk prediksi debit sedimen, dimaksudkan untuk mengetahui parameter-parameter yang paling berpengaruh terhadap hasil keluaran model, yang akan digunakan sebagai pedoman terhadap prediksi debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai dan untuk mencari parameter yang paling *sensitive* terhadap debit sedimen, maka perlu dilakukan langkah dengan cara menambahkan dan mengurangi nilai masing-masing parameter sebesar 10 %, kemudian dilakukan *running*, selanjutnya dilihat hasil keluaran pada model tersebut.

Untuk mendapatkan indeks *sensitifitas* (S), digunakan rumus seperti pada Persamaan 2.75.

$$S = \left[\frac{P_{10} - M_{10}}{Baseline} \right] \quad (2.75)$$

dimana:

S = indeks *sensitifitas* dengan satuan %

P_{10} = hasil simulasi dengan mengadakan penambahan 10%

M_{10} = hasil simulasi dengan mengadakan pengurangan 10%

BASELINE = hasil simulasi awal (dasar)

Masing-masing indeks *sensifitas* (S) yang terjadi, kemudian dibandingkan dengan nilai indeks *sensitifitas* terbesar dan selanjutnya hasil tersebut dibuat dalam bentuk persen. Untuk Uji *sensitifitas* model tangki untuk prediksi debit sedimen diterapkan pada Sub Daerah Aliran Sungai Kreo.

2.8 Kerangka Pikir

Erosi dan sedimentasi tidak terkendali menimbulkan kerugian yang cukup besar, baik berupa menurunnya produktivitas tanah serta rusaknya bangunan-bangunan air dan terjadinya sedimentasi waduk (Suripin, 2002^a). Oleh karena itu perkiraan atau prediksi erosi, debit sedimen pada skala daerah aliran sungai sangat diperlukan untuk perencanaan bendungan dan reservoir, desain konservasi tanah, perencanaan tata guna lahan, manajemen kualitas air dan strategi pengendalian yang efektif mengurangi resiko aliran air, dan melindungi terhadap erosi. Pada umumnya permasalahan erosi dan sedimen pada Daerah Aliran Sungai meliputi :

- 1) Data sedimen sangat diperlukan untuk perencanaan, namun data sedimen tersebut ketersediaan sangat terbatas
- 2) Model yang ada untuk analisis erosi dan sedimen membutuhkan input data dengan variabel cukup banyak beragam dan ekstensif
- 3) Model sederhana sangat diperlukan untuk analisis debit sedimen, salah satunya model tangki sebagai model hujan-aliran dengan perkembangannya selain untuk analisis debit juga untuk analisis hasil sedimen dan penelitian yang ada adalah:
 - (1) Model tangki untuk hasil sedimen (Lee and Singh, 2005, 2007)
 - (2) Model tangki untuk hasil sedimen menggunakan Kalman Filter (Lee, 2007)
 - (3) Model hujan –aliran dengan memasukkan unsur sedimen (Apip, 2007)
 - (4) Model aliran sedimen menggunakan metode Lumped berbasis Distributed dengan analisis aliran sedimen mencakup wilayah lahan berlereng dan saluran atau sungai (Apip, 2005, 2007)

Meskipun hasil sedimen dapat dianalisis dengan model tangki (Lee and Singh, 2005 dan 2007), tetapi penerapan model tangki belum menjelaskan berdasar representasi proses erosi dan debit sedimen pada wilayah Daerah Aliran Sungai. Kemudian analisis debit sedimen berdasar model hujan- aliran (model tangki) dengan memasukkan unsur sedimen belum dilakukan (Apip, 2007).

Berdasarkan uraian beberapa konsep model di atas, perlu diadakan penelitian lanjut guna memperoleh temuan susunan model tangki dan rumusannya berdasarkan proses erosi dan sedimentasi yang dapat memprediksi debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai. Dalam penelitian lanjut ini perlu dikaji dan diteliti hal-hal sebagai berikut:

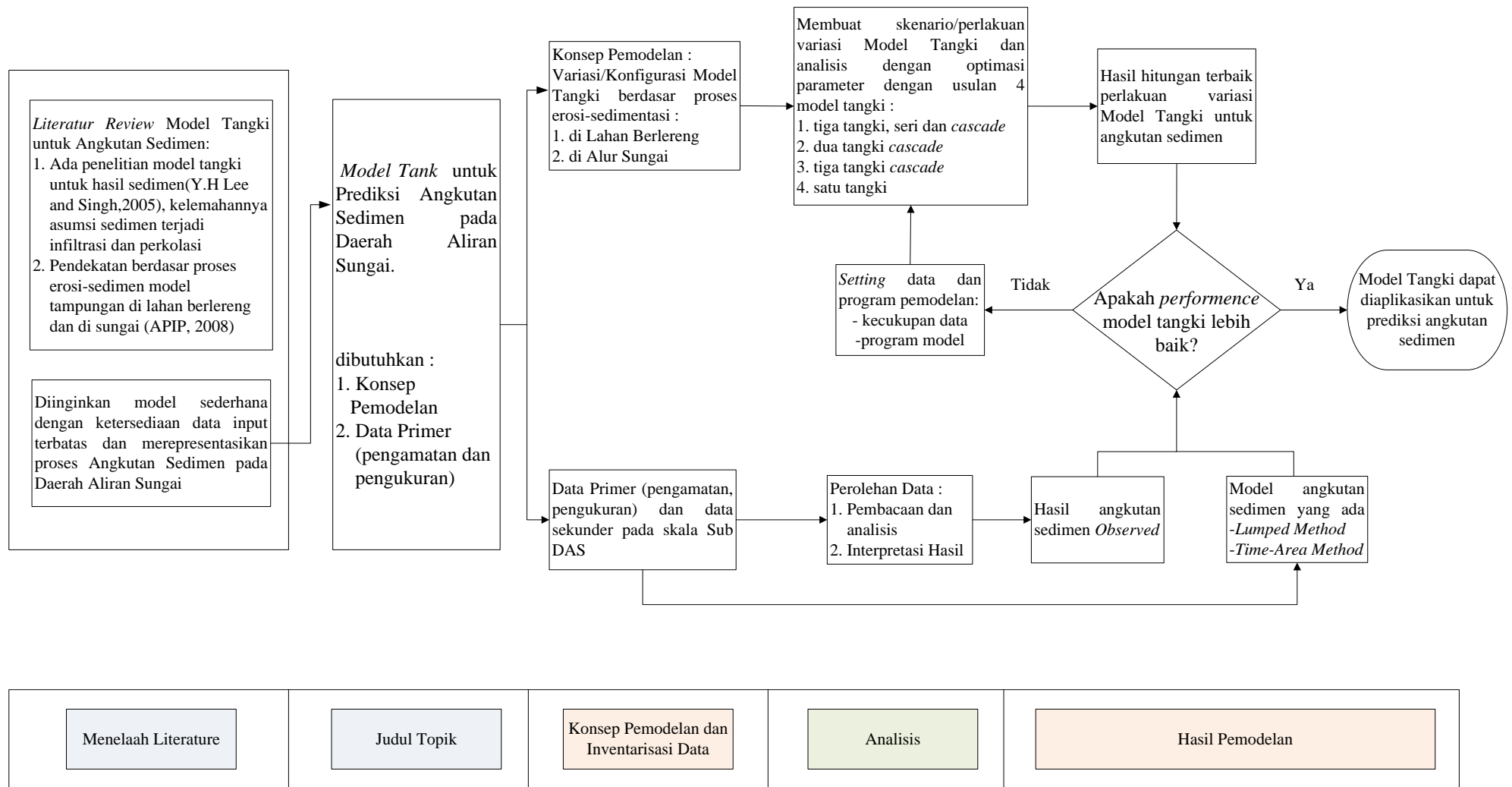
- 1) Kajian lebih lanjut susunan variasi atau konfigurasi model tangki dan rumusannya berdasar proses erosi sedimentasi pada Daerah Aliran Sungai (DAS) di lahan berlereng dan saluran atau sungai. Dalam hal ini *setting* analisis model tangki dengan membuat struktur dan rumusan model tangki. ada 4 model tangki yang diusulkan yaitu Model Tangki 1 (tiga tangki, seri dan *cascade*), Model Tangki 2 (dua tangki *cascade*), Model Tangki 3 (tiga tangki *cascade*), dan Model Tangki 4 (satu tangki), dengan input data model meliputi data hipotetik, data observasi, dan data DAS lain. Optimasi parameter model ditentukan dengan menggunakan pendekatan optimasi metode Algoritma Genetika (AG) dengan bantuan program MatLab.
- 2) Perlu uji eksperimental di lapangan melalui *setting* eksperimen lapangan untuk pengambilan data sebagai input data model dan mengolah data dengan pembacaan dan analisis serta interpretasi hasil, untuk validasi dengan analisis struktur hasil simulasi komputasi.

Dari uraian di atas bagan alir kerangka berpikir (*logical flow*) seperti terlihat pada Gambar 2.18.

2.9 Hipotesa

Dalam proses hidrologi, langsung atau tidak langsung akan mempengaruhi erosi, debit sedimen, deposisi sedimen di daerah hilir, yang terjadi dalam Daerah Aliran Sungai (DAS). DAS dalam model konseptual direpresentasikan oleh sistem tampungan (Hafzullah Aksoy *et.al*, 2005). Pendekatan *Lumped* berbasis model distribusi telah diterapkan untuk prediksi aliran sedimen pada DAS, yaitu mengembangkan model hujan-aliran dengan memasukkan unsur sedimen (Apip, 2012).

Dengan mengacu pada studi tersebut, maka dapat diturunkan hipotesa, bahwa debit sedimen pada Daerah Aliran Sungai dapat direspon dan diprediksi dengan model hidrologi berupa model tangki.



Gambar 2.18. Kerangka Pikir