

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

##### 2.1.1 Tanggul Tanah

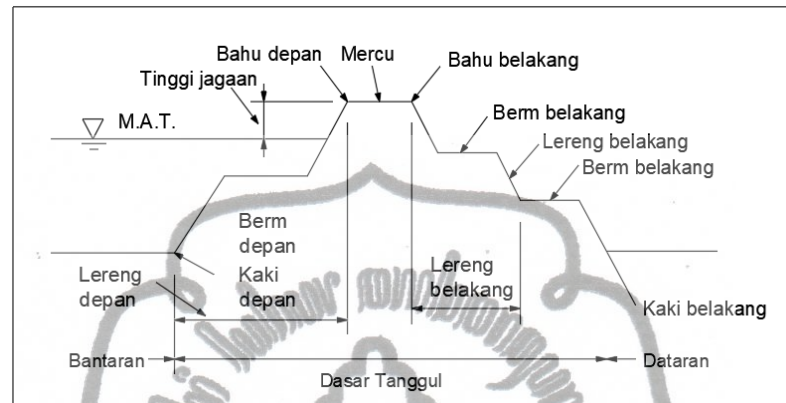
###### a. Pengertian

Tanggul (*flood embankment/levee/dyke*) dibangun untuk mengatur aliran agar tidak keluar alur atau bantaran dan berfungsi sebagai pelindung daerah sekitar aliran sungai dari genangan dan banjir (Sosrodarsono dkk, 1993). Tanggul seringkali merupakan komponen utama dari sistem pertahanan banjir yang mencakup struktur buatan manusia dan alam yang saling melengkapi untuk mengurangi risiko genangan di area yang ditentukan. Infrastruktur lainnya adalah saluran pelimpah, tembok banjir, pintu air, pengukuran rembesan, stasiun pompa dan bendungan (Bramley *et al*, 2013).

Tanggul dengan konstruksi urugan tanah merupakan jenis tanggul yang paling sering ditemukan di lapangan. Tanggul tanah merupakan bangunan menerus yang sangat panjang dan membutuhkan bahan urugan yang volumenya sangat besar. Tanah yang baik untuk tanggul adalah bahan tanah yang mempunyai sifat antara lain: kekedapan tinggi, nilai kohesi tinggi dalam keadaan jenuh air sudut geser dalam cukup tinggi, pekat dan angka porinya rendah. Tanah yang terdiri dari campuran pasir dan lempung dengan proporsi  $\pm 1/3$  bagian pasir dan  $\pm 2/3$  bagian lempung merupakan bahan tanggul yang cukup memadai. Material tanah urugan dapat ditemukan dari hasil pekerjaan normalisasi sungai yang biasanya dilaksanakan bersamaan dengan pembangunan tanggul. Bahan tanah yang kurang baik dipergunakan untuk urugan bagian dalam tubuh tanggul dan bagian luar digunakan bahan tanah yang kualitasnya lebih baik. Konstruksi urugan tanah mempunyai kelebihan karena tanah merupakan bahan bangunan yang sangat stabil dan setelah menjadi tanggul mudah menyesuaikan dengan lapisan tanah pondasi yang mendukungnya dan kemungkinan penurunan yang tidak rata (Sosrodarsono dkk, 1984). Jika tanggul tanah dipelihara dengan baik, tanah tanggul secara efektif

memiliki umur manfaat tak terbatas (*The State of Victoria Department of Environment, Land, Water and Planning, 2015*).

Tanggul terdiri atas beberapa bagian, yaitu mercu, bahu, *berm*, lereng dan kaki tanggul, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Bagian Tanggul  
(Sumber: Sosrodarsono dkk, 1993)

Kemiringan tanggul erat kaitannya dengan infiltrasi air dalam tubuh tanggul serta karakteristik mekanika tanah tubuh tanggul. Dalam keadaan tanpa perkuatan lereng, tanggul tanah direncanakan dengan kemiringan 1:2 atau lebih kecil. Hal lain yang perlu diperhitungkan dalam pembangunan tanggul tanah adalah stabilitas lereng dan rembesan. Untuk keperluan inspeksi, mercu tanggul seringkali dipergunakan sebagai jalan inspeksi untuk pemeliharaan tanggul. Oleh karena itu diperlukan mercu tanggul yang cukup lebar. Lebar standar mercu tanggul dengan pertimbangan debit banjir rencana, misalnya untuk debit banjir  $500 \text{ m}^3/\text{det}$  sampai dengan kurang dari  $2.000 \text{ m}^3/\text{det}$  diperlukan lebar mercu 4 meter. (Sosrodarsono dkk, 1993).

#### b. Tanggul di Lokasi Studi

Tanggul tanah di lokasi studi, yaitu Sungai Bengawan Solo ruas Dengkeng – Pusur, dibangun dengan menggunakan material tanah yang diambil dari wilayah sekitar sungai dengan syarat *liquid limit*  $< 70\%$ . Tinggi timbunan di sebagian besar lokasi kurang dari 3 m dan *unit density* sekitar  $1,85 \text{ ton/m}^3$ , *load intensity* timbunan dihitung sebesar  $7,3 \text{ ton/m}^2$  dengan kemiringan 1:2.0 pada dua sisi tanggul dan lebar puncak tanggul 3,0 m (BBWS Bengawan Solo, 2017). Berdasarkan data as-

*built drawing* lebar puncak tanggul rata-rata 4 m meter dan kemiringan tanggul 1:2 pada dua sisi tanggul. Sementara tinggi jagaan tanggul rata-rata 1,1 meter dan tambahan tinggi tanggul rata-rata 1,1 meter untuk mengantisipasi penurunan (*settlement*) tanah sehingga rata-rata elevasi puncak tanggul adalah 2,2 m dari muka air banjir tertinggi (Departemen Pekerjaan Umum, 1994). Tanggul didesain untuk meningkatkan kapasitas tampung sungai dari semula 400 m<sup>3</sup>/det menjadi 1.240 m<sup>3</sup>/det (JICA, 2002).

### c . Kondisi Fisik Tanggul

Kondisi fisik tanggul yang baik merupakan keadaan tanggul yang memenuhi syarat keamanan dalam fungsinya untuk mengatur aliran agar tidak keluar alur atau bantaran dan sebagai pelindung daerah sekitar aliran sungai dari genangan dan banjir. Kondisi tanggul perlu dijaga melalui kegiatan pemeliharaan dan rehabilitasi agar berfungsi dengan baik. Kerusakan struktur tanggul terjadi karena faktor-faktor yang bekerja pada komponen tanggul seperti zat fisik dan kimiawi, angin, arus, gelombang, temperatur, vegetasi, hewan dan aktivitas manusia. Kegagalan struktural tanggul dapat menyebabkan kegagalan hidrolis dan demikian sebaliknya (Vicker *et al*, 2013).

Kerusakan struktur tanggul meliputi erosi eksternal, erosi internal, dan instabilitas. Erosi eksternal adalah erosi pada lereng hulu akibat morfologi sungai, terjadinya gerakan lateral sungai serta gaya hidrodinamik serta pada lereng hilir. Erosi eksternal terjadi ketika kemiringan tanggul tidak mampu menahan muatan hidrolis. Erosi internal, dimulai oleh gaya hidrodinamik yang bekerja pada partikel tanah di dalam pondasi tanggul yang dibawa ke hilir oleh aliran rembesan. Rembesan juga meningkatkan kemungkinan ketidakstabilan karena perubahan distribusi tekanan pori di dalam tanggul. Tekanan angkat pada tanah pondasi dapat menyebabkan ketidakstabilan yang besar. Ketidakstabilan meliputi ketidakstabilan lereng hulu dan hilir, ketidakstabilan mikro, penurunan dan pergeseran horizontal. Ketidakstabilan lereng yang menyebabkan terjadinya longsor terjadi ketika gaya, yaitu tekanan pori berlebih pada tanggul lebih tinggi daripada tahanan geser yang ditentukan oleh kekuatan geser tanah. Ketidakstabilan lereng lereng terjadi karena adanya infiltrasi air ke badan tanggul dan pondasinya sehingga memaksa badan

tanggul dan kekuatan geser tanahnya turun (kuat geser) sedangkan ketidakstabilan lereng hulu sungai terjadi akibat penurunan muka air luar secara tiba-tiba setelah badan tanggul mengalami kejenuhan. Dalam situasi ini, tekanan pori di dasar bidang longsor potensial tetap tinggi, sedangkan tekanan horizontal atau dukungan dari air sungai berkurang. Jika gaya penahannya lebih besar dari gaya pendorongnya maka lereng tersebut dalam keadaan stabil. Tetapi bila gaya penahannya lebih kecil dari gaya pendorongnya, maka akan menyebabkan terjadinya kelongsoran. Faktor keamanan lereng kritis adalah sebesar 0,99 yaitu pada saat timbunan selesai dikonstruksi. Adapun kriteria faktor keamanan minimum untuk stabilitas lereng yang aman adalah sebesar 1,3 (Duncan dan Wright, 2005). Ketidakstabilan mikro terjadi ketika rembesan air menyebabkan permukaan freatik naik dan mencapai kemiringan tepi sungai dari tanggul. Istilah “mikro” digunakan untuk membedakan masalah stabilitas yang terkait dengan fenomena ini dari ketidakstabilan lereng yang pada dasarnya menyangkut seluruh badan tanggul secara langsung. Penurunan (*settlement*) adalah mekanisme deformasi dalam arah vertikal yang terutama dapat menyebabkan ketinggian puncak yang tidak mencukupi untuk mencegah mekanisme kegagalan akibat limpasan/luapan banjir. Sementara geser horizontal mirip dengan ketidakstabilan lereng hilir, yaitu longsor terjadi di sepanjang dasar badan tanggul. Dalam hal ini, gaya penggerak utama adalah gaya horizontal dari air yang bekerja di lereng hulu. Mekanisme ini biasanya menjadi masalah untuk tanggul yang terbuat dari material yang relatif ringan seperti gambut, di mana tegangan efektif di dasar sangat rendah (Damme & Jonkman, 2020).

Kerusakan struktur tanggul, sebagian dapat dilihat secara langsung tetapi beberapa penyebab lain khususnya internal erosion seperti *piping* dan *seepage* sulit dideteksi apalagi jika alat ukur hidrolik tidak tersedia, seperti *piezometer* (alat ukur tekanan pori), *weir box* (alat ukur debit rembesan). Oleh karena itu pengamatan visual terhadap gejala kerusakan pada tubuh tanggul yang berdampak terhadap kegagalan tanggul perlu dilakukan (Neutz *et al*, 2013). Pemantauan jenis kelemahan tanggul yang menyebabkan jebolnya tanggul dapat diamati berdasarkan gejala kerusakan tubuh tanggul, sebagai berikut: pada puncak tanggul, gejala kerusakan yang dapat dilihat adalah penurunan yang terjadi akibat proses konsolidasi, lintas ternak, lintas

manusia dan transportasi; terkikisnya permukaan karena erosi air hujan dan tidak adanya tutupan berupa gebalan rumput; retak memanjang akibat pengerutan; retak melintang karena terjadinya lubang-lubang melintang tanggul yang dibuat binatang kecil. Pada saat banjir, air sungai masuk melalui retak melintang dan mengerus dinding retakan yang menyebabkan retakan membesar dan menjebolkan tanggul. Pada lereng dan kaki depan atau hulu tanggul, gejala kerusakan yang dapat dilihat adalah tergerus akibat aliran banjir, retak karena tumbuhan dan alang-alang, lubang dibuat oleh binatang, dan bocor. Pada lereng belakang atau hilir tanggul, gejala kerusakan yang dapat dilihat adalah longsor akibat munculnya air rembesan di lereng belakang tanggul, retakan memanjang biasanya terjadi di musim kemarau, rembes. Pada depan atau hulu tanggul, gejala kerusakan yang dapat dilihat adalah longsor, gerusan, rembes. Pada pondasi adalah bocor yang menyebabkan timbulnya gejala *piping* (Sosrodarsono dkk, 1993).

Dalam Surat Edaran Dirjen SDA No. 05/SE/D/2016 tentang Penyelenggaraan Kegiatan Operasi dan Pemeliharaan Prasarana Sungai dan Pemeliharaan Sungai, disebutkan inspeksi tanggul dilakukan minimal 2 kali dalam 1 Tahun yaitu pada musim kemarau pada saat muka air rendah dan pada musim hujan saat kondisi muka air tinggi. Inspeksi terhadap tanggul perlu mencatat gejala kerusakan sebagai berikut: pada puncak tanggul adalah retak, ambles, berlubang, tumbuh semak liar; pada lereng tanggul adalah retak, longsor, berlubang, gebalan rumput botak, tumbuh semak liar; pada sistem drainase tanggul adalah tertutup semak, tertutup sampah; di sekitar kaki tanggul adalah longsor tanah; pada patok adalah miring, rusak, hilang dan pada portal tanggul adalah miring, rusak.

Pada bendungan urugan tanah yang secara struktur menyerupai tanggul tanah, inspeksi visual merupakan salah satu cara penting mengetahui penyebab keruntuhan bendungan termasuk pondasinya. Keruntuhan akibat pondasi terjadi karena sesar dan sisipan-sisipan dari batuan lapuk, serpih (*shils*) dan lapisan lempung lunak yang menyebabkan retakan-retakan pada puncak bendungan, dan penurunan (*ambles*) sehingga lereng bagian bawah bergerak ke arah luar dan terbentuk gelembung lumpur di depan tumit. Selain itu tekanan air pori yang berlebihan akan mengurangi kekuatan tanah sehingga tidak mampu menahan gaya



geser akibat beban tubuh bendungan. Keruntuhan akibat kerusakan tubuh bendungan urugan terjadi dapat diamati secara visual pada tubuh tanggul. Inspeksi visual pada puncak bendungan adalah pergeseran/penyimpangan dari permukaan yang seharusnya rata dan seragam (*uniform*), penurunan yang mengurangi tinggi jagaan, retakan yang menunjukkan pelepasan kandungan air dan mengkerutnya material dekat permukaan timbunan, erosi akibat hujan yang turun berlebihan dan/atau limpasan permukaan (*surface runoff*) yang terkonsentrasi dan/atau terdapatnya tanah yang mudah tererosi, liang binatang serta tumbuh-tumbuhan. Inspeksi visual pada lereng hulu adalah penonjolan (*bulging*), pergeseran/penyimpangan dari permukaan yang seharusnya rata dan seragam (*uniform*), retak yang menunjukkan penurunan pada timbunan dan dapat menjadi jalur bocoran di sepanjang bidang tersebut, erosi berlebihan akibat hujan yang turun berlebihan dan/atau limpasan permukaan liang binatang serta tumbuh-tumbuhan. Inspeksi visual bawah air pada lereng dan kaki hulu adalah longsor, lubang benam, kerusakan pelindung lereng. Inspeksi visual pada lereng hilir adalah penonjolan (*bulging*), pergeseran/penyimpangan dari permukaan yang seharusnya rata dan seragam (*uniform*), retak yang menunjukkan penurunan pada timbunan dan dapat menjadi jalur bocoran disepanjang bidang tersebut, basah, sembulan (*boils*), depresi/penurunan, lubang benam, mata air yang menunjukkan rembesan besar lewat bendungan. Air rembesan harus diperiksa adanya kandungan material yang terangkut dan apabila terdapat kecurigaan melarutnya bahan timbunan harus dilakukan analisa kimiawi. Selain itu perlu diamati erosi berlebihan akibat hujan yang turun berlebihan, liang binatang dan tumbuh-tumbuhan. Inspeksi visual pada kaki belakang adalah basah, sembulan (*boils*), depresi/penurunan, lubang benam, mata air yang menunjukkan rembesan besar, hambatan lubang drainase, liang binatang dan tumbuh-tumbuhan (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004).

Inspeksi pada bendungan urugan tanah perlu mencatat hal-hal gejala kerusakan sebagai berikut: pada mercu tanggul adalah kondisi jalan di atas mercu (retak dan lain-lain), tanda-tanda penurunan, tanda-tanda pergerakan, kondisi pembuang (drainase), kondisi pagar pengaman/guardrail. Pada lereng hulu (*upstream face*) adalah tanda-tanda pergerakan, tonjolan, lubang perosokan (*sink hole*), retakan,

erosi, penurunan, retakan (lokasi, kedalaman, lebar, panjang). Pada lereng hilir (*downstream face*) adalah tanda-tanda pergerakan, tonjolan, lubang perosokan (*sink hole*), retakan, erosi, penurunan, terkelupas, retakan (lokasi, kedalaman, lebar, panjang), longsor dibawah muka air buri (*tail water*), tanda-tanda rembesan (lokasi, kuantitas, warna), kondisi tumbuh-tumbuhan. Pada kaki adalah tanda-tanda erosi, gelembung luap (*boiling*), daerah basah (Kementerian PUPR, Direktorat Bina Operasi dan Pemeliharaan, 2020).

Indikator lain yang dapat digunakan dalam pengamatan kondisi tanggul, misalnya tanaman/pohon pada tanggul berasosiasi dengan erosi eksternal dan kestabilan lereng karena pohon yang tumbang menghilangkan banyak tanah dan menyebabkan lereng tanggul yang tidak terlindungi terkena erosi dan akhirnya menyebabkan ketidakstabilan lereng. Pohon juga berasosiasi dengan erosi internal karena akar pohon dapat menembus tanggul atau pondasi dan memicu terjadinya rembesan dan “*piping*” material pada tubuh tanggul dan/atau pondasi yang menyebabkan berkembangnya rongga dan kemudian runtuh yang mengarah ke penurunan puncak tanggul. Penurunan dan lubang pada puncak tanggul berasosiasi dengan erosi eksternal dan ketidakstabilan lereng karena deformasi pada puncak tanggul meningkatkan terjadinya luapan selama puncak banjir sementara cekungan menyebabkan air tertahan dalam jangka waktu lama dan secara perlahan dapat merusak keutuhan tanggul serta memicu terjadinya ketidakstabilan tanggul. Gerusan berasosiasi dengan erosi eksternal dan ketidakstabilan lereng karena erosi berkelanjutan menghilangkan cukup banyak tanah yang menyebabkan ketidakstabilan lereng. Longsor, terkelupas, penurunan, atau tonjolan pada lereng tanggul berasosiasi dengan ketidakstabilan lereng tanggul karena lereng tanggul yang tidak stabil meningkatkan kemungkinan kegagalan lereng selama proses hidrolis. Retakan pada puncak tanggul atau lereng tanggul berasosiasi dengan erosi internal karena retakan di tanggul menciptakan bidang lemah yang menyebabkan terjadinya infiltrasi air dan mendorong terjadinya kegagalan lereng tanggul. Liang hewan/serangga berasosiasi dengan erosi internal karena liang hewan dapat meluas dan mempengaruhi tanggul di beberapa ketinggian dan memberikan lebih dari satu titik masuk atau titik keluar yang mendorong terjadinya rembesan dan runtuhnya/penurunan puncak tanggul dan menyebabkan terjadinya kegagalan

lereng tanggul. Rembesan, mata air (*boils*), area basah pada lereng dan kaki hilir tanggul berasosiasi dengan ketidakstabilan lereng karena rembesan dapat menyebabkan *piping* tanah halus dan membentuk rongga yang dapat berlanjut sampai tepi sungai yang terhubung dengan lereng hilir. Runtuhnya rongga kosong kemudian bisa menyebabkan air melimpas tanggul. Untuk menentukan tingkat kerusakan bagian tanggul maka diperlukan kategori penilaian gejala kerusakan pada setiap bagian tanggul. Kategori penilaian umumnya dibagi atas 3 (tiga) kelas untuk ruas tanggul yang dinilai. Untuk gejala gerusan/erosi misalnya, terdiri atas kategori 1). tidak ada area erosi di dekat atau di dalam kaki tanggul; 2). Terdapat erosi kecil di dekat atau di dalam kaki tanggul; 3). Terdapat erosi cukup besar di dekat atau di dalam kaki tanggul yang mengurangi fungsi atau kegunaan tanggul (Neutz *et al*, 2013).

Telaahan pustaka di atas menunjukkan bahwa terdapat beberapa kesamaan pengamatan visual terhadap gejala kerusakan tanggul dan dapat dirangkum menjadi penilaian gejala kerusakan tanggul yang bersifat umum. Gejala kerusakan tersebut sekaligus menjadi indikasi kerusakan struktur tanggul baik pada puncak tanggul, lereng dan kaki hulu atau yang menghadap sungai, serta lereng dan kaki hilir atau yang menghadap daratan.

### **2.1.2 Kapasitas Tampung Sungai Bertanggul**

#### **a. Pengertian**

Kapasitas tampung sungai bertanggul adalah daya tampung sungai bertanggul melewati debit banjir. Kapasitas tampung merupakan salah satu faktor yang paling mempengaruhi terjadinya banjir, selain curah hujan yang tinggi, kondisi daerah aliran sungai, aliran air permukaan, kecepatan air, genangan air banjir, dan beban sedimen termasuk sampah. Banjir akan terjadi jika puncak banjir jauh melebihi dari kapasitas tampung palung sungai dan/atau melebihi kapasitas tampung prasarana pengendalian banjir yang ada (Kementerian PUPR, 2015).

#### **b. Debit Banjir Rencana**

Kapasitas tampung sungai bertanggul direncanakan berdasarkan debit banjir rencana dengan memperhatikan sisi teknis, ekonomi dan sosial kawasan yang dilindungi. Untuk tanggul di pedesaan debit periode ulang banjir rencana adalah 2



sampai dengan 50 Tahun dan di perkotaan 50 sampai dengan 200 Tahun (Chow *et al*, 1988). Di negara bagian Victoria, Australia, desain banjir tanggul berbeda-beda tergantung kawasan yang dilindungi, yaitu di daerah perkotaan debit banjir desain adalah 1% dari probabilitas Tahunan terlampaui atau debit periode ulang 100 Tahun sedangkan daerah pedesaan bervariasi antara debit periode ulang 10-20 Tahun (*The State of Victoria Department of Environment, Land, Water and Planning, 2015*). Di Indonesia, desain tanggul banjir disyaratkan mengikuti ketentuan bahwa dimensi bantaran dan tanggul kawasan ibukota Kabupaten/Kota untuk mengalirkan debit rencana  $Q_{10}$  sampai dengan  $Q_{20}$ ; ibukota Provinsi untuk mengalirkan debit rencana  $Q_{20}$  sampai dengan  $Q_{50}$ ; dan ibukota Negara/Metropolitan untuk mengalirkan debit rencana  $Q_{50}$  sampai dengan  $Q_{100}$ . Besaran debit rencana tersebut ditentukan dengan mempertimbangkan tingkat kemajuan ekonomi kawasan yang akan dilindungi (Kementerian PUPR, 2015). Aturan lain mengenai debit banjir rencana drainase di perkotaan ditentukan berdasarkan tipologi kota dan luas daerah tangkapan air dan bervariasi antara 2 sampai dengan 25 Tahun (Kementerian PU, 2014).

Perhitungan debit banjir rencana tanggul dilakukan berdasarkan analisa frekwensi data pengukuran debit lapangan. Namun jika data pengukuran debit lapangan tidak tersedia digunakan hidrograf satuan sintesis yang mentransformasikan hujan menjadi debit aliran. Penelitian mengenai perhitungan debit banjir rencana antara lain dilakukan oleh Ariyani dan Riadhi (2019) menggunakan Metode Hidrograf Satuan Sintetik Nakayashu dan Gama I di DAS Ciherang Hulu. Kristianto dkk (2019) membandingkan debit banjir dari hidrograf satuan sintetik mempergunakan Metode Snyder, Nakayasu, GAMA I, Limantara, ITB-1 dan ITB-2 dengan hidrograf satuan terukur di DAS Tukad Pakerisan di Kabupaten Gianyar-Bali dimana hasil penelitian menunjukkan bahwa Metode Snyder memiliki simpangan terbaik yaitu kurang dari 5%. Marthina dkk (2014) melakukan analisa debit banjir sungai Tondano menggunakan metode HSS Gama I DAN HSS Limantara dan analisa frekwensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa besaran debit banjir rencana metode HSS Limantara lebih mendekati hasil analisis menggunakan metode Analisis Frekuensi. Margini dkk (2017) mengkaji debit air Sungai Konto menggunakan metode Nakayasu dan ITB dan dibandingkan dengan hasil

pengukuran debit di lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai debit puncak ( $Q_p$ ) Metode ITB paling mendekati pengamatan lapangan sedangkan waktu mencapai puncak ( $T_p$ ) Metode Nakayasu yang paling mendekati pengamatan lapangan. Junia dkk (2015) mengkaji debit sungai Tapung Kanan dan Tapung kiri menggunakan Metode Soil Conservation Service, Nakayasu dan Snyder dan membandingkan dengan hasil perhitungan hidrograf satuan dengan kontrol volume atau direct runoff yang nilainya yang paling mendekati 1mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Metode Nakayasu yang paling mendekati nilai DRO 1 mm. Penelitian lain dilakukan untuk mengkaji keandalan tanggul pada berbagai debit banjir periode ulang dilakukan oleh Huang *et al* (2015) yang meneliti keandalan tanggul pada berbagai debit banjir periode ulang di Taiwan Selatan dengan parameter ketinggian muka air, kedalaman gerusan, dan sudut gesek setempat. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa pada debit banjir periode ulang lebih dari 2 tahun gaya gesek semakin meningkat sehingga mempengaruhi stabilitas tanggul. Sun, *et al* (2017) meneliti pengendalian banjir pada daerah perbukitan di China pada berbagai debit banjir periode ulang dan menyimpulkan bahwa pada daerah perbukitan diperlukan standar pengendalian banjir relatif tinggi yaitu banjir periode ulang 100 tahun sedangkan pada daerah yang lebih rendah, standar pengendalian banjir relatif lebih rendah.

Seiring perubahan waktu, kapasitas tampung sungai bertanggul dapat mengalami perubahan karena meningkatnya debit puncak banjir rencana akibat perubahan iklim. Penelitian yang dilakukan oleh Suripin dan Kurniani (2016) di DAS Kanal Banjir Timur Semarang menunjukkan bahwa dalam kurun waktu 30 tahun terakhir tinggi hujan tahunan dan harian maksimum DAS Kanal Banjir Timur cenderung meningkat masing-masing 22,64 mm/tahun, dan 2,56 mm/tahun sedangkan jumlah hari hujan cenderung berkurang rata-rata 4 hari/tahun. Akibat dari perubahan karakteristik hujan tersebut, debit banjir rencana DAS Kanal Banjir Timur diprediksi akan mengalami kenaikan berkisar antara dengan 15,10 m<sup>3</sup>/detik (31,5%) untuk periode ulang 2 tahun sampai 32,28 m<sup>3</sup>/detik (25,5%) untuk debit periode ulang 200 tahun. James *et al* (2017) menunjukkan pengaruh keadaan hidrologis yang kuat pada debit banjir baik lokasi maupun bentuk distribusi debit banjir maksimum disebabkan oleh peningkatan suhu udara dan penurunan curah hujan.

Farzad *et al* (2019) menunjukan kontribusi perubahan iklim terhadap debit harian maksimum, yaitu untuk periode 2016-2100 dimana simulasi aliran menunjukkan adanya penurunan debit harian maksimum karena berkurangnya curah hujan harian maksimum.

Faktor lain yang mempengaruhi perubahan debit banjir maksimum adalah perubahan tataguna lahan. Penelitian yang dilakukan oleh Maryono (2013) menunjukkan bahwa penurunan luas hutan sekunder di DAS Pangabuan Jambi telah meningkatkan debit banjir sungai. Liu *et al* (2014) menunjukkan pengaruh perubahan penggunaan lahan di Wuhan di Daerah Aliran Sungai Yangtze antara tahun 1954 dan 2020 khususnya distribusi daerah perkotaan terhadap meningkatnya debit banjir. Khare *et al* (2017) mengkaji data penggunaan lahan/tutupan lahan tahun 1990, 2000 dan 2009 dengan data debit di titik pantau debit di Mandaleswar di Madhya Pradesh, India dan menyimpulkan bahwa perubahan penggunaan lahan/tutupan lahan dan curah hujan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon hidrologi DAS. Cornelissen *et al* (2013) melakukan kalibrasi dan validasi model untuk mensimulasi debit pada masa yang akan datang akibat perubahan iklim dan penggunaan lahan dan menyimpulkan bahwa semua model mensimulasikan peningkatan permukaan limpasan akibat perubahan penggunaan lahan. Namun kelemahan utama dari semua model hidrologi adalah kurang merepresentasikan karakteristik tanah daerah tangkapan dan proses aliran.

Penelitian lain yang mengkaji kapasitas tampung sungai diantaranya adalah pengembangan pemodelan banjir Jakarta dengan mengintegrasikan antara model hidrologi dan model hidraulik. Model hidrologi didasarkan pada hubungan hujan-limpasan dengan menggunakan konsep Sacramento sedangkan model hidraulik menggunakan model hidraulik satu dimensi (1D) untuk perhitungan perambatan aliran di sungai dan model hidraulik dua dimensi (2D) untuk perhitungan perambatan aliran banjir di daerah genangan. Model banjir yang telah dibangun selanjutnya dikalibrasi dengan menggunakan data kejadian banjir pada Tahun 2007 dan divalidasi dengan data kejadian banjir Tahun 2008. Hasil kalibrasi dan validasi menunjukkan bahwa model banjir yang dikembangkan cukup baik untuk merespon perilaku banjir Jakarta dan dapat digunakan sebagai *framework* model banjir

Jakarta untuk mencari efektivitas berbagai alternatif pengendalian banjir dan sarana utama sistem peringatan dini banjir Jakarta (Putuhena dan Ginting, 2013).

Studi pemodelan banjir juga dilakukan dengan melakukan analisa hidrolika menggunakan perangkat lunak HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System*) yang dikembangkan oleh *the United States Army Corps of Engineers* dan dirilis sejak Tahun 1995 (*Hydrologic Engineering Center*, 2010). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi ini mampu mengkaji permasalahan banjir sungai melalui analisa tinggi jagaan sehingga dapat direkomendasikan model pengendalian banjir. Sun *et al* (2017) menggunakan perangkat lunak HEC-RAS untuk mensimulasi prakiraan banjir sungai dan risiko kegagalan tanggul di wilayah perbukitan di China dan merekomendasikan dukungan teknis untuk penahan banjir di daerah perbukitan dan beberapa referensi untuk perkuatan bantaran sungai. Ekawati (2017) menggunakan perangkat lunak HEC-RAS untuk menganalisis hidrologi debit puncak banjir sungai Jragung menggunakan debit periode ulang untuk mengetahui potensi limpasan dan merekomendasikan alternatif dengan upaya normalisasi untuk menambah kapasitas tampung sungai. Marhendi dkk (2017) mengkaji alternatif pengendalian banjir di Kali Juana menggunakan analisis model HEC-RAS dengan melakukan simulasi terhadap beberapa bentuk upaya pengendalian, guna mengurangi besaran banjir. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat 6 model alternatif yang muncul dalam pengendalian banjir Kali Juana. Dari beberapa model tersebut, terpilih model simulasi yang meliputi normalisasi, tanggul, waduk logung, 8 kolam retensi dan *floodway*. Pheaktra (2018) melakukan analisis hidrologi dengan mentransformasi metode rasional menjadi hidrograf aliran dengan curah hujan rencana kala ulang 25 tahun menggunakan perangkat lunak HEC-RAS 5.0.3 pada kondisi eksisting dan kondisi desain. Hasil analisa menunjukkan skenario desain dengan normalisasi sistem drainase dan peningkatan tanggul dengan freeboard hingga 0,75 m sebagai solusi genangan banjir di daerah rawan banjir tersebut.

Pemodelan banjir lainnya menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk menentukan skor dan bobot parameter kelas kerentanan banjir serta memetakan kelas kerawanan banjir kawasan di Kabupaten Maros. Faktor yang digunakan untuk menilai kelas kerawanan banjir adalah kemiringan lereng, curah



hujan, jenis tanah, penggunaan lahan dan topografi (Heryani dkk, 2012). Pemodelan banjir juga dapat menggunakan *fuzzy logic* dengan tinjauan pada bangunan air yaitu bendungan menghasilkan bobot yang sesuai dan praktis untuk operasi banjir. Terdapat tiga kriteria yang digunakan yaitu debit puncak, perbedaan antara level desain banjir dan level tertinggi bendungan serta sedimentasi pada bendungan. Pemodelan menghasilkan bobot yang sesuai dan praktis untuk operasi banjir (Chen dan Hou, 2004). Dampak banjir menimbulkan kerusakan dan kerugian. Faktor-faktor yang mempengaruhi probabilitas dan nilai kerusakan akibat bencana banjir dapat dilihat dari beberapa parameter. Parameter-parameter tersebut adalah ketinggian genangan, jenis rumah atau bangunan, serta pengalaman mengalami banjir (Zhai *et al*, 2005).

### **c . Tinggi Jagaan (*Freeboard*)**

Parameter yang dapat digunakan untuk menilai kapasitas tampung sungai bertanggung adalah tinggi jagaan (*freeboard*). Tinggi jagaan (*freeboard*) merupakan jarak vertikal antara muka air dan tepi atas sungai atau struktur hidrolis atau tepi bawah jembatan. *Freeboard* merupakan parameter hidrolis, untuk memperhitungkan ketidakpastian dalam perhitungan tinggi muka air akibat ketidakpastian perhitungan geometri penampang melintang sungai, perhitungan elevasi dasar sungai selama debit puncak, penentuan kekasaran saluran dan penentuan geometri saluran efektif dengan adanya vegetasi yang tumbuh. Tinggi jagaan (*freeboard*) digunakan untuk memastikan bahwa kapasitas debit aliran tidak terlampaui meskipun terjadi fenomena gelombang yang terbentuk oleh arus, kayu atau yang melayang dipermukaan air dan di pilar dan abutment jembatan, efek *backwater* pada hambatan lokal di sungai akibat pohon atau sudut dinding yang menjorok, serta adanya endapan sedimen di dasar sungai selama kejadian banjir (Hunzinger, 2014).

*Freeboard* dimasukkan ke dalam desain tanggul untuk memastikan tidak terjadi limpasan karena ketidakpastian dalam perhitungan profil tinggi muka air karena kesalahan model penyederhanaan fenomena aliran, efek dinamis dan operasi dan pemeliharaan tanggul (Huffinan, 1990 dalam Pridal & Sing, 1992). Selain tinggi jagaan, faktor lain yang dipertimbangkan dalam menentukan tinggi tanggul adalah muka air banjir dan tambahan tinggi untuk mengantisipasi penyusutan. Tambahan



tinggi untukantisipasi penyusutan diperoleh dengan memperhitungkan adanya penurunan tanggul yang disebabkan oleh proses konsolidasi tubuh tanggul dan lapisan tanah pondasinya, penurunan kompresi dan kemungkinan kerusakan bagian mercu tanggul oleh hujan atau angin. Tambahan tinggi untuk kemungkinan penyusutan tanggul biasanya diberikan sebesar + 10% dan kemiringan lereng biasanya lebih besar dari lereng rencana (Sosrodarsono dkk, 1993) sementara di daerah kritis dimana dampak kegagalan tanggul terhadap resiko kerugian harta benda dan jiwa tinggi maka disarankan untuk menambahkan tinggi jagaan sebesar 0,3 meter dan juga dilakukan jika tanggul lebih tinggi dari 3,5 meter (Kementerian PUPR, 2015). Tabel 2.1 menunjukkan tinggi jagaan tanggul berdasarkan debit banjir rancangan.

Tabel 2.1 Tinggi Jagaan Tanggul

| No. | Debit Banjir Rencana (m <sup>3</sup> /det) | Jagaan (m) |
|-----|--|------------|
| 1   | < 200                                      | 0,6        |
| 2   | 200-500                                    | 0,8        |
| 3   | 500-2.000                                  | 1,0        |
| 4   | 2.000-5.000                                | 1,2        |
| 5   | 5.000-10.000                               | 1,5        |
| 6   | >10/000                                    | 2,0        |

(Sumber: Sosrodarsono dkk, 1993)

Penelitian yang dilakukan untuk menghitung tinggi jagaan rencana, diantaranya dengan menghitung tinggi jagaan berdasarkan analisa distribusi probabilitas banjir yang sesuai, sehingga standar tinggi jagaan sebesar 0,915 meter atau 3 feet untuk banjir periode ulang 100 tahun perlu disesuaikan dengan tingkat resiko pada lokasi yang berbeda (Nolde dan Jakob, 2015). Penelitian lainnya adalah menghitung tinggi jagaan tanggul berdasarkan analisa probabilitas gabungan beberapa komponen yaitu gelombang sungai, gelombang air lokal, ketidakpastian dalam desain tingkat banjir, penurunan muka tanah tanggul pasca konstruksi dan perubahan iklim. Hasil analisa menunjukkan bahwa untuk tanggul utama Wagga Wagga, tinggi jagaan tanggul tanah adalah 0,9 meter dan untuk *retaining wall* 0,8 meter, sedangkan untuk North Wagaa Wagga tinggi jagaan tanggul tanah adalah

0,75 meter dan untuk retaining wall 0,70 meter (*New South Wales Government*, 2010).

### 2.1.3 Sedimentasi

Angkutan sedimen di Indonesia memiliki sifat lebih bervariasi dan spesifik yang disebabkan sifat sungai yang berbeda serta dipengaruhi keadaan musim yaitu musim hujan dan kemarau (Adinegara, 2005). Terdapat tiga macam angkutan sedimen yang terjadi dalam alur sungai yaitu *wash load*, *suspended load*, dan *bed load*. “*Wash load*” atau sedimen cuci terdiri dari partikel lanau dan debu yang terbawa masuk ke dalam sungai dan tetap tinggal melayang sampai mencapai laut, atau genangan air lainnya. Sedimen jenis ini hampir tidak mempengaruhi sifat-sifat sungai meskipun jumlahnya yang terbanyak dibanding jenis-jenis lainnya terutama pada saat-saat permulaan musim hujan datang. Sedimen ini berasal dari proses pelapukan Daerah Aliran Sungai yang terutama terjadi pada musim kemarau sebelumnya. “*Suspended load*” atau sedimen layang terutama terdiri dari pasir halus yang melayang di dalam aliran karena tersangga oleh turbulensi aliran air. Pengaruh sedimen ini terhadap sifat-sifat sungai tidak begitu besar. Tetapi bila terjadi perubahan kecepatan aliran, jenis ini dapat berubah menjadi angkutan jenis ketiga. Gaya gerak bagi angkutan jenis ini adalah turbulensi aliran dan kecepatan aliran itu sendiri. Dalam hal ini dikenal kecepatan pungut atau “*pick up velocity*”. Untuk besar butiran tertentu bila kecepatan pungutnya dilampaui, material akan melayang dan sebaliknya, bila kecepatan aliran yang mengangkutnya mengecil di bawah kecepatan pungutnya, material akan tenggelam ke dasar aliran. “*Bed load*” adalah tipe ketiga dari angkutan sedimen merupakan angkutan dasar di mana material dengan besar butiran yang lebih besar akan bergerak menggelincir atau *translate*, menggelinding atau *rotate* satu di atas lainnya pada dasar sungai; gerakannya mencapai kedalaman tertentu dari lapisan sungai. Tenaga penggeraknya adalah gaya seret *drag force* dari lapisan dasar sungai (Mulyanto, 2007).

Sedimentasi merupakan proses yang kompleks, meliputi erosi, transportasi (angkutan), pengendapan (*deposition*) dan pemadatan (*compaction*). Proses sedimentasi dimulai dari jatuhnya hujan yang menghasilkan energi kinetik yang

merupakan permulaan proses erosi. Partikel tanah yang terlepas menggelinding bersama aliran, sebagian akan tertinggal di atas tanah dan sebagian masuk ke sungai terbawa aliran menjadi angkutan sedimen (Loebis dkk, 1993). Faktor-faktor yang menentukan hasil sedimen DAS meliputi jumlah dan intensitas curah hujan; jenis tanah dan formasi geologi; tutupan lahan; penggunaan lahan; topografi; laju erosi dataran tinggi; kepadatan jaringan drainase, kemiringan, bentuk, ukuran, dan arah saluran; limpasan; karakteristik sedimen seperti ukuran butir dan mineralogy; karakteristik hidraulik saluran (Strand and Pemberton, 1982 dalam Yang dan Wu, 1996).

Angkutan sedimen yang terbawa oleh debit aliran sungai dan mengendap akan mempengaruhi bentuk dasar sungai. Material yang mengendap dapat terangkat kembali apabila terjadi kenaikan kecepatan aliran cukup tinggi. Besarnya volume angkutan sedimen tergantung pada perubahan kecepatan aliran dan adanya kegiatan di palung sungai. Sebagai akibat dari perubahan volume angkutan sedimen adalah terjadinya penggerusan di beberapa tempat dan pengendapan di tempat lain di dasar sungai sehingga dengan demikian bentuk dasar sungai akan selalu berubah (Loebis dkk, 1984). Proses naik turunnya elevasi dasar sungai akibat pengendapan sedimen dan gerusan aliran air berlangsung secara terus menerus (Sosrodarsono dkk, 1993). Perubahan kesetimbangan dasar sungai akibat degradasi atau penurunan dasar alur dan tebing sungai dapat mengganggu stabilitas tebing dan menyebabkan runtuh tebing. Untuk menanggulangi hal ini dapat dilakukan rekayasa dengan membentuk kelandaian setimbang atau *stable slope* dengan membuat aliran bertangga atau *cascade* dengan rangkaian ambang dasar atau *ground sills* di sepanjang dasar sungai serta dengan memasang lapisan *armour* atau lapisan perkuatan lainnya pada lapisan dasar sungai yang tergradasi. Perubahan kesetimbangan dasar sungai akibat aggradasi yaitu sungai mengendapkan sebagian sedimen yang diangkut akibat kapasitas transpornya dilampaui, terjadi antara lain akibat mengecilnya debit sungai, membesarnya rasio  $Q_{max}/Q_{min}$ , terjadinya pembendungan atau penyempitan alur di hilir, dan bertambahnya konsentrasi sedimen dari anak sungai di hulu. Permasalahan aggradasi dapat ditanggulangi, antara lain dengan pengerukan atau *dredging*, memperbaiki rasio  $Q_{max}/Q_{min}$  dengan menambah debit dari hulu,

perbaikan pengoperasian bendung dan bangunan pengatur muka air, membangun kantong penangkap sedimen (Mulyanto, 2007).

Untuk mengetahui degradasi dan aggradasi di alur dan tebing sungai maka perhitungan transpor sedimen sangat penting dilakukan karena sedimen adalah bagian dari keseimbangan antara energi, yaitu kuat aliran, tegangan geser atau jumlah energi dalam aliran serta beban yang akan menentukan stabilitas sungai. Sebuah sungai yang dapat mempertahankan dimensi penampang rata-rata yang sama dan karakteristik bentuk rencana sambil menyesuaikan posisinya di dataran banjir disebut memiliki keseimbangan dinamis (Mant and Soar, 2010).

Dalam transpor sedimen, sungai alam akan membawa air dan sedimentasi dengan variasi debit yang cukup besar dan bisa mencapai angka hingga 1.000 kali. Oleh karena itu perlu pengetahuan untuk melakukan justifikasi hubungan dan perbedaan tersebut karena dengan perbedaan debit yang besar akan menyulitkan penentuan sebuah debit yang representatif dalam mengkaji karakteristik aliran. Salah satu metode yang dikembangkan untuk pemilihan debit representatif adalah konsep debit dominan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembentukan geometrik hidraulik dari penampang suatu sungai ditentukan oleh debit dominan. Debit dominan adalah debit dan gradien (kemiringan) dominan yang mana saluran kembali setiap tahun. Pada kondisi ini keseimbangan terjadi dengan kecenderungan berubah relatif sangat kecil. Kondisi ini dapat dipandang sebagai efek yang integral dari semua kondisi yang bermacam-macam dalam tempo yang relatif panjang (Inggris, 1947 dalam Pusdiklat SDA dan Konstruksi, 2017). Definisi debit dominan lainnya adalah debit dengan kemungkinan terjadi sama atau lebih besar 50 % waktu atau dapat disebut debit dengan periode ulang 2 Tahunan (Blench, 1956 dalam Pusdiklat SDA dan Konstruksi, 2017). USBR mendefinisikan debit dominan sebagai debit yang akan membawa muatan sedimen terbesar untuk material lebih kasar dari 0.0625 mm berkenaan dengan waktu, sedangkan Wohl (1998) mendefinisikan debit dominan sebagai debit aliran dengan ketinggian memenuhi tebing (*bankfull discharge*) dan biasanya merupakan debit dengan periode ulang 1 - 2 Tahun. Dengan banyaknya definisi debit dominan, perbedaan iklim, topografi, geomorfologi sistem fluvial, sifat-sifat aliran laminar dan turbulen maka konsep debit



dominan masih perlu dikaji dan dikembangkan berkaitan dengan geometrik hidraulik, pola aliran dan laju sedimentasi (Pusdiklat SDA dan Konstruksi, 2017).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembentukan geometrik hidraulik dari penampang suatu sungai ditentukan oleh debit dominan. Debit dominan adalah debit dan gradien (kemiringan) dominan yang mana saluran kembali setiap Tahun. Pada kondisi ini keseimbangan terjadi dengan kecenderungan berubah relatif sangat kecil. Kondisi ini dapat dipandang sebagai efek yang integral dari semua kondisi yang bermacam-macam dalam tempo yang relatif panjang (Inglis, 1947 dalam Pusdiklat SDA dan Konstruksi, 2017). Definisi debit dominan lainnya adalah debit dengan kemungkinan terjadi sama atau lebih besar 50 % waktu (dapat disebut debit dengan periode ulang 2 Tahunan) sedangkan Wohl pada Tahun 1998 mendefinisikan debit dominan sebagai debit aliran dengan ketinggian memenuhi tebing (*bankfull discharge*) dan biasanya merupakan debit dengan periode ulang 1 - 2 Tahun (Blench, 1956 dalam Pusdiklat SDA dan Konstruksi, 2017).

Beberapa penelitian tentang transpor sedimen telah dilakukan dengan menggunakan persamaan angkutan sedimen, pengukuran pada stasiun pengukur sungai, studi eksperimen di laboratorium maupun menggunakan model numerik. Hidayah dkk (2013) mengkaji metode transport sedimen yang paling tepat digunakan di Sungai Bengawan Solo di titik pengamatan Serenan yaitu dengan mengambil data debit dan sedimen secara langsung pada Serenan di Bengawan Solo. Sedimen untuk diuji di laboratorium dan kemudian dibandingkan dengan hasil hitungan menggunakan metode transpor sedimen yaitu Ackers-White, Englund-Hansen, Laursen, Meyer-Peter Muller, Toffaleti dan Yang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Meyer Peter Muller dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya debit angkutan sedimen dengan tingkat kesalahan 4,12 %. Djirjize Abdul Hakim dkk (2015) mengkaji transport sedimen dasar dengan menggunakan Metode Ackers-White, Englund-Hansen dan Yang's di sungai Bengawan Solo ruas Serenan-Jurug dengan menggunakan data debit maksimum tahun 2009 sampai dengan 2013 dan menyimpulkan bahwa laju penggerusan dan laju pengendapan yang terjadi seimbang kecuali pada bulan Desember dimana sepanjang ruas tersebut lebih banyak mengalami pengendapan. Oktavia dkk (2019) mengkaji besarnya laju angkutan sedimen dasar pada Sungai Pondo- Poboya di



Kota Palu menggunakan Metode Meyer-Peter and Muller berdasarkan pada debit banjir rencana periode ulang 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun dan 100 tahun dan menyimpulkan bahwa nilai laju angkutan sedimen dasar terbesar terjadi pada saat debit banjir periode ulang 100 tahun. Analisa menggunakan persamaan Duboys untuk mengkaji kecepatan jatuh partikel sedimen dilakukan oleh Hambali dan Apriyanti (2016) sedangkan penelitian transpor sedimen dasar berdasarkan nilai parameter Shield dilakukan oleh Mustika dan Sarita (2017). Penelitian transpor sedimen juga dilakukan di laboratorium, seperti yang dilakukan oleh Wang *et al* (2019) menggunakan eksperimen saluran di laboratorium sementara Pallu dkk (2014) melakukan eksperimen pada saluran berbentuk trapezium. Penelitian transpor sedimen dengan pemodelan, antara lain dilakukan oleh Kiat *et al* (2008) yang menggunakan model The FLUVIAL-12 dan formula Engelund-Hansen sedangkan Mezin *et al* (2019) menggunakan model numerik *Shallow Water Hydrodynamic Finite Element Model (SHYFEM)* dan Model transpor sedimen *SEDTRANS05*. Penelitian lain dilakukan oleh Zheng *et al* (2015) yang mengembangkan persamaan untuk menghitung kesetimbangan volume sedimen terakumulasi berdasarkan karakteristik geometris. Sementara penelitian yang dilakukan oleh *Stockholm Environment Institute* (2017) di DAS Mekong menunjukkan berbagai faktor yang mempengaruhi transpor sedimen, antara lain pembangunan proyek PLTA skala besar, penambangan dasar sungai, penggundulan hutan dan pembangunan di dataran rendah dan Delta Mekong.

Penelitian lainnya untuk mengkaji dampak sedimentasi terhadap banjir dilakukan oleh Nofrizal (2017) pada Muara Sungai Batang Arau. Pendangkalan penampang sungai mengakibatkan naiknya muka air sehingga dapat menimbulkan banjir dan terhambatnya lalu lintas kapal nelayan saat air sungai surut dan saat air laut pasang. Hasil kajian menyimpulkan bahwa curah hujan, tata guna lahan sangat berpengaruh terhadap pertambahan volume sedimen yang terjadi pada Muara Sungai Batang Arau. Pertambahan volume sedimen pada Muara Sungai Batang Arau tidak linear menurut Tahun. Pertambahan sangat signifikan terjadi diantara Tahun 2012 ke Tahun 2013, sedangkan dari 2006-2007 terjadi penurunan yang signifikan. Jenis volume sedimen yang memiliki nilai paling tinggi tiap tahunnya yaitu kerikil.

Sudira dkk (2013) menunjukkan perubahan kapasitas tampung sungai akibat adanya fenomena erosi dan sedimentasi di Sungai Mansahan. Analisis angkutan sedimen dilakukan untuk mengetahui besaran sedimen serta pengaruhnya terhadap morfologi sungai dan cara pengendalian yang tepat untuk mengurangi efek daya rusak *air*. Perhitungan dibatasi pada laju angkutan sedimen dasar (*bed load*) pada lokasi terpilih. Perhitungan angkutan sedimen dasar (*bed load*) menggunakan metode Meyer-Peter and Müller (MPM), Van Rijn dan Rottner pada debit aliran yang dominan dari Tahun 2010 sampai dengan Tahun 2012. Hasil perbandingan antara simulasi dengan 3 metode terjadi perbedaan dengan hasil analisa pengukuran dan metode Rottner yang mendekati dengan hasil pengukuran.

Penelitian mengenai Pengendalian Banjir Sungai Jragung Kabupaten Demak dilakukan oleh Ekawati (2017) untuk mengevaluasi pengendalian banjir karena penampang sungai sebagian besar sudah berkurang kapasitasnya akibat sedimentasi. Hasil Studi yang dilakukan menunjukkan terjadi sedimentasi di lokasi Bendung Ploso khususnya di percabangan Sungai Jragung Lama serta endapan sedimen serta tumpukan sampah di depan pilar jembatan. Terdapat pula endapan sedimen pada bangunan pembagi di Bendung Ploso yang menuju ke arah Sungai Jragung Lama sehingga sebagian besar air banjir lebih banyak menuju ke arah Sungai Cabelan sehingga terjadi *overtopping* dikarenakan tidak terbaginya konsentrasi banjir. Analisa hidrolika dilakukan dengan bantuan perangkat lunak HEC-RAS dan merekomendasikan alternatif penanganan banjir dengan upaya normalisasi karena kondisi sungai sendiri yang sudah menyempit akibat sedimentasi.

Studi-studi di atas menunjukkan bahwa berkurangnya kapasitas tampung alur sungai akibat sedimentasi dapat menyebabkan *overtopping* dan menimbulkan resiko bencana. Skala resiko bencana akan bertambah jika faktor penyebab lainnya, misalnya kondisi fisik tanggul dalam kondisi rusak.

#### **2.1.4 Kinerja Layanan Tanggul**

Penilaian kinerja adalah suatu metode atau alat yang digunakan untuk mencatat dan menilai pencapaian pelaksanaan kegiatan berdasarkan tujuan, sasaran, dan strategi. Penilaian kinerja merupakan suatu sistem yang memerlukan indikator-indikator atau kriteria-kriteria sebagai alat ukur. Tanpa indikator dan kriteria yang jelas tidak

akan diperoleh informasi yang dapat dipergunakan untuk menentukan hal-hal mana yang perlu diperbaiki dan ditingkatkan kinerjanya, kebutuhan sumber daya serta prioritas penggunaannya. Dalam konteks ini, penilaian kinerja layanan tanggul adalah suatu sistem penilaian yang membandingkan hasil kerja tanggul terhadap standar atau target pembangunan tanggul yaitu mampu mengendalikan tinggi muka air pada debit rancangan periode ulang tertentu (Dessler, 2000).

Kinerja tanggul berkaitan dengan kinerja hidrolik, komponen fisik tanggul serta proses morfologi di alur dan tebing sungai yang menyebabkan terjadinya aggradasi dan degradasi sungai. Kinerja hidrolik yaitu kemampuan tanggul mengendalikan tinggi muka air banjir. Komponen fisik tanggul adalah struktur tanggul dimana komponen dan fungsi komponen tanggul menjalani mekanisme yang menyebabkan menurunnya kondisi dan kerusakan. Kegagalan hidrolik (non struktur) terjadi jika air menerobos masuk ke areal tanggul karena rembesan, *overflow* atau *overtopping*, sementara kegagalan struktur terjadi karena kebocoran yang mempengaruhi satu segmen sistem. Kegagalan hidrolik pada suatu segmen tanggul dapat bersumber dari kesalahan dalam proses perencanaan dan pembangunan tanggul, perubahan lingkungan sistem tanggul, seperti terjadi naiknya dasar sungai dan penurunan tanggul; kesalahan pengoperasian, misalnya pintu tidak ditutup saat banjir; desain yang buruk dan kegagalan struktur (Vicker *et al*, 2013).

Kerusakan struktur tanggul, sebagian dapat dilihat secara langsung tetapi beberapa penyebab lain khususnya erosi internal seperti *piping* dan *seepage* sulit dideteksi. Apalagi alat ukur hidrolik tidak tersedia, seperti *piezometer* (alat ukur tekanan pori), *weir box* (alat ukur debit rembesan). Oleh karena itu pengamatan visual gejala kerusakan pada tubuh tanggul yang berdampak terhadap kegagalan tanggul perlu dilakukan. Misalnya vegetasi/rumput, penurunan dan/atau terpotongnya puncak dan sisi tanggul, lubang, cekungan serta erosi di kaki tanggul berasosiasi dengan erosi eksternal dan stabilitas lereng tanggul. Retakan pada mahkota tanggul dan lereng, lubang binatang pada lereng serta daerah yang basah pada lereng atau kaki hilir berasosiasi dengan erosi internal dan kestabilan lereng (Neutz *et al*, 2013).

Pada sungai bertanggul, proses morfologi yaitu gerakan lateral dan vertikal di sungai turut mempengaruhi kinerja tanggul. Fenomena erosi akan mengikis saluran

sehingga mengurangi stabilitas kemiringan lereng hulu, mengurangi elevasi permukaan dan/atau kemiringan lereng, dan merusak lapisan impermeabel yang berpengaruh terhadap rembesan. Erosi akan meningkatkan kapasitas saluran dan mengurangi tinggi muka air selama banjir dan meningkatkan kedalaman air dan mengurangi efek gelombang. Sedimentasi di saluran akan meningkatkan stabilitas lereng hulu tanggul dan mengurangi ketinggian dan/atau kemiringan lereng, mengurangi tekanan air dan rembesan pada lereng dan dibawah tanggul, dan meningkatkan hambatan hidrolis pada zona di depan tanggul. Disisi lain, sedimentasi akan mengurangi kapasitas saluran dan meninggikan muka air selama banjir dan mengurangi kedalaman air sehingga meningkatkan efek gelombang air dan tinggi jagaan (Vicker *et al*, 2013).

Penelitian mengenai kinerja tanggul antara lain dilakukan oleh Serre *et al* (2008) yang mengembangkan metode penilaian kinerja tanggul yang terintegrasi ke dalam Sistem Informasi Geografis untuk mendukung perencanaan tindak pemeliharaan di Perancis. Indikator kinerja disusun berdasarkan kriteria-kriteria yang mempengaruhi erosi internal yang menjadi penyebab kegagalan tanggul. Kriteria tersebut meliputi vegetasi, liang hewan, dampak benda mengambang, geomorfologi sungai, dan perlindungan muka tanggul, sedangkan indikator masing-masing kriteria disusun berdasarkan jenis/tipe, kepadatan dan letak pada tanggul. Penyusunan indikator kinerja, kriteria dan indikator kriteria dilakukan berdasarkan diskusi dengan para ahli.

Penilaian kinerja prasarana sungai termasuk didalamnya kinerja tanggul berdasarkan Surat Edaran Direktur Jenderal Sumber Daya Air Nomor 05/SE/D/2016 tentang Pedoman Penyelenggaraan Kegiatan Operasi dan Pemeliharaan Prasarana Sungai Serta Pemeliharaan Sungai, dilaksanakan berdasarkan hasil pemantauan terhadap kondisi fisik dan fungsi tanggul. Kondisi fisik tanggul dikelompokkan atas sangat baik, baik, cukup baik dan jelek. Pengamatan kondisi fisik tanggul dilakukan terhadap gejala kerusakan pada puncak tanggul, lereng tanggul, sistem drainase tanggul, tanah di sekitar kaki tanggul, patok kilometer, dan portal tanggul. Fungsi tanggul dinilai berdasarkan informasi yang disajikan dalam bentuk foto dengan uraian kondisi yang meliputi obyek-obyek yang diamankan dan fenomena yang terjadi pada sungai dengan adanya prasarana



bersangkutan. Klasifikasi penilaian resiko kegagalan fungsi atau kondisi fungsi adalah sebagai berikut: resiko sangat kecil/kondisi fungsi sangat baik; resiko kecil/kondisi fungsi baik; resiko/kondisi fungsi cukup baik dan resiko besar/kondisi fungsi jelek. Penilaian kondisi fisik dan kondisi fungsi dijumlahkan untuk mendapatkan nilai kinerja bangunan, meliputi: kinerja baik dengan resiko rendah sehingga diperlukan pemeliharaan preventif; kinerja cukup dengan resiko sedang sehingga diperlukan pemeliharaan korektif; kinerja buruk dengan resiko tinggi sehingga membutuhkan rehabilitasi

### 2.1.5 Keamanan Tanggul

Keamanan tanggul didefinisikan sebagai keadaan tanggul bebas dari resiko bahaya jebol atau rusak parah sehingga gagal berfungsi. Keamanan tanggul dapat dinilai dari kinerja tanggul, yang terdiri atas kinerja hidrolik, kondisi fisik tanggul serta proses morfologi di alur dan tebing sungai yang menyebabkan terjadinya aggradasi dan degradasi sungai (Vicker *et al.*, 2013). Tanggul dikategorikan aman jika kinerja tanggul dalam keadaan baik, yaitu secara hidrolik mampu mengendalikan muka air atau tinggi jagaannya memadai, memiliki kondisi fisik tanggul yang baik serta transpor sedimen seimbang di sungai.

Dalam penilaian keamanan tanggul, dikenal faktor keamanan tanggul (*safety factor* atau  $F_s$ ) yang merupakan analisa stabilitas lereng untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial (Hardiyatmo, 2019). Penyebab longsor lereng adalah akibat pengaruh internal dan eksternal. Pengaruh internal misalnya akibat pengaruh bertambahnya tekanan air pori dalam lereng sedangkan pengaruh eksternal yaitu pengaruh yang menyebabkan bertambahnya gaya geser dengan tanpa adanya perubahan kuat geser tanah, misalnya akibat mempertajam kemiringan tebing, memperdalam galian tanah atau erosi sungai (Terzaghi, 1950 dalam Hardiyatmo, 2019). Kelongsoran lereng alam dapat terjadi karena beberapa hal, yaitu: penambahan beban pada lereng, penggalian atau pemotongan kaki lereng, penggalian yang mempertajam kemiringan lereng, perubahan muka air secara cepat (*rapid drawdown*), kenaikan tekanan lateral oleh air, gempa bumi atau getaran berlebihan dan penurunan tahanan geser tanah pembentuk lereng akibat kenaikan kadar air, kenaikan tekanan air pori, tekanan rembesan, tanah pada lereng mengandung lempung yang mudah kembang susut (Hardiyatmo, 2019). Angka



keamanan terhadap kekuatan tanah ( $F_s$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara kekuatan geser rata-rata dari tanah ( $\tau_f$ ) terhadap tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor ( $\tau_d$ ). Kekuatan geser tanah sendiri terdiri dari 2 (dua) komponen yaitu kohesi ( $c$ ) dan sudut geser tanah ( $\phi$ ). Jika  $F_s = 1$ , maka tanggul dalam keadaan akan longsor. Namun umumnya nilai 1,5 untuk angka keamanan terhadap kekuatan geser dapat diterima untuk merencanakan stabilitas tanggul (Das, 1994). Batasan angka keamanan lebih spesifik adalah lereng dikategorikan tidak stabil jika  $F_s < 1$ , agak stabil jika  $F_s$  antara 1 dan 1,25 dan kestabilannya sedang jika  $F_s$  antara 1,25 dan 1,5 dan stabil jika  $F_s > 1,5$  (Ray dan De Smitd, 2009 dalam Hardiyatmo, 2019). Pada tanah homogen, analisa stabilitas yang dapat digunakan adalah analisa stabilitas lereng dengan bidang longsor datar pada kondisi tanpa rembesan dan kondisi dengan rembesan serta analisa stabilitas dengan bidang longsor berbentuk lingkaran sedangkan jika tanah tidak homogen dan aliran rembesan terjadi di dalam tanah tidak menentu, digunakan metode irisan (*method of slice*). Dalam analisa ini metode yang digunakan, antara lain Metode Fellenius, Metode Bishop, Diagram Bishop dan Morgenstern, Diagram Spenser. Saat ini berkembang program komputer yang tersedia untuk analisa stabilitas lereng, antara lain program STABL, GEOSLOPE, GEOSOFT, GSLOPE SLOPE/W (Hardiyatmo, 2019). Penelitian yang dilakukan oleh Budijanto dan Alfionida (2017) menunjukkan bahwa faktor keamanan tanggul tidak statis namun berubah terhadap waktu. Penelitian yang dilakukan terhadap stabilitas lereng pada tanggul lumpur Sidoarjo pada titik P21 menunjukkan bahwa faktor keamanan memiliki nilai kritis pada saat konstruksi timbunan selesai dilakukan yaitu sebesar 0.99, kemudian meningkat setelah proses konsolidasi pada tahun ke-8 yaitu 1.59.

Faktor lain yang membahayakan keamanan tanggul adalah *piping*. *Piping* terjadi jika tekanan rembesan ke atas yang terjadi dalam tanah sama dengan gradien hidrolis kritis ( $i_c$ ) atau gradien hidrolis minimum yang akan menyebabkan kondisi mengapung pada jenis tanah tertentu. Keadaan ini menyebabkan terangkutnya butir-butir tanah halus sehingga terjadi pipa-pipa dalam tanah yang berbentuk rongga-rongga sehingga dapat menyebabkan pondasi bangunan mengalami penurunan sehingga mengganggu stabilitas bangunan. Faktor keamanan bangunan

air terhadap *piping* (SF) adalah perbandingan antara gradien hidrolik kritis ( $i_c$ ) dan gradien keluar maksimum ( $i_e$ ) dengan faktor aman minimum,  $SF = 3$  atau  $4$  (Harza, 1935 dalam Hardiyatmo, 2019). Selain Metode Harza, metode lain yang digunakan untuk menghitung faktor keamanan terhadap *piping* adalah Metode Lane dan Metode Terzaghi (Hardiyatmo, 2019). Rembesan merupakan penyebab lain yang mempengaruhi stabilitas bendungan urugan tanah dan tanggul tanah. Rembesan menyebabkan bahaya longsor, erosi lereng dan kehilangan air. Beberapa metode dapat digunakan untuk menghitung debit rembesan, seperti cara Dupuit, Schaffernak, A. Casagrande (Hardiyatmo, 2019).

Berdasarkan data statistik kegagalan fungsi tanggul diketahui bahwa kegagalan tanggul disebabkan oleh berbagai faktor. Di Jepang, kegagalan fungsi tanggul sungai 82 % diakibatkan oleh limpasan, 11% karena tergerus, 5% akibat kebocoran dan keretakan permukaan lereng dan 2% akibat lain-lain (Sosrodarsono dkk, 1993). Kegagalan utama 128 tanggul di Jerman yang terjadi Tahun 2002 and 2013 yaitu akibat erosi eksternal 50%, instabilitas 25%, erosi internal 14,8%, *overflow/overtopping* 7,8%, tidak diketahui 2,4%. Kegagalan utama tersebut terjadi karena adanya pemicu atau mekanisme awal, dimana mekanisme awal kegagalan terbesar adalah akibat limpasan. Limpasan menyumbang 90% terhadap erosi eksternal, 66% terhadap ketidakstabilan dan 37% terhadap erosi internal (Damme & Jonkman, 2020). Data kegagalan bendungan urugan tanah di Amerika Serikat yang secara struktur memiliki kemiripan dengan tanggul tanah menunjukkan 35% kegagalan diakibatkan oleh limpas, 38% kegagalan diakibatkan oleh *piping* dan *seepage*, 21% akibat adanya cacat pada pondasi, serta 6% akibat mode kegagalan lainnya (Costa, 1985). Data kegagalan 900 bendungan urugan tanah di dunia menunjukkan prosentase, sebagai berikut: masalah kualitas, seperti *piping* di tubuh bendungan, pondasi dan sekitar *spillway*, longsor di tubuh bendungan serta isu kualitas di bagian struktur lainnya sebesar 42,5%, *overtopping* sebesar 36,4%, kegagalan yang tidak diketahui penyebabnya sebesar 11,6%, penyebab lainnya, seperti penyumbatan *spillway* akibat longsor tebing di waduk, kerusakan akibat penggalian di bendungan dan perencanaan tata letak yang buruk sebesar 5,2%, bencana sebesar 3%, dan pengelolaan yg buruk 1,3%. Khusus masalah kualitas, jika dirinci adalah *piping* di tubuh dan fondasi 58,3%, sliding di tubuh/pondasi 21,7%, *overtopping* 11,6%, masalah pondasi 11,6%, masalah lain 1,3%.

Tidasi 18,3%, tidak diketahui 14,4%, isu kualitas di *spillway* 6,3% dan *piping* sekitar *spillway* 2,8% (Zhang *et al*, 2011). Kegagalan pada timbunan besar untuk tanggul/dam sampai dengan Tahun 1986 adalah akibat *overtopping* termasuk di pintu *spillway* sebesar 37%, *piping* sebesar 38,7% baik *piping* pada tanggul, *piping* pada pondasi dan *piping* dari tanggul masuk ke fondasi, *slides* sebesar 3,3% baik *slides* pada bagian bawah tanggul dan bagian atas tanggul serta akibat gempa bumi dan liquefaksi sebesar 1,7% (Fell dkk, 2000, dalam Sargawi dan Junaidi, 2013).

Untuk menjaga keamanan tanggul maka operasi dan pemeliharaan tanggul penting dilakukan untuk memastikan bahwa kinerja yang ditetapkan tercapai (Wielputz *et al*, 2013). Termasuk dalam kegiatan ini adalah inspeksi bagian tanggul dan sistem tanggul untuk melihat gejala kerusakan tanggul, investigasi dan pengukuran instrumen yaitu penilaian teknis yang dilakukan untuk proses penilaian, serta monitoring yaitu pengukuran teknis atau pengamatan yang dilakukan secara berkala. Data-data tersebut perlu dikelola dalam sistem pengelolaan data sebagai dasar untuk menilai resiko kegagalan tanggul serta dampak yang ditimbulkan (Neutz *et al*, 2013).

#### 2.1.6 *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

*Analytic Hierarchy Process (AHP)* merupakan metode pengukuran melalui perbandingan berpasangan diskrit dan kontinu dan mengandalkan penilaian para ahli untuk mendapatkan skala prioritas. Perbandingan ini dapat diambil dari pengukuran aktual atau dari skala fundamental yang mencerminkan kekuatan relatif preferensi dan perasaan. *Analytic Hierarchy Process (AHP)* menaruh perhatian pada konsistensi, pengukurannya, dan ketergantungan di dalam dan di antara kelompok elemen strukturnya. Hasil penilaian yang tidak konsisten, dapat diukur ketidakkonsistenan dan jika memungkinkan, meningkatkan hasil penilaian untuk mendapatkan konsistensi yang lebih baik. *Analytic Hierarchy Process (AHP)* digunakan secara luas dalam pengambilan keputusan multikriteria, perencanaan dan alokasi sumber daya dan dalam resolusi konflik (Saaty, 2008). Dalam *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, faktor-faktor terpilih disusun dalam struktur hierarki yang menurun dari tujuan keseluruhan ke kriteria, sub kriteria, dan alternatif dalam tingkat yang berurutan. Menyusun tujuan, atribut, masalah, dan pemangku

kepentingan dalam hierarki memiliki dua tujuan, yaitu memberikan pandangan keseluruhan tentang hubungan kompleks yang melekat dalam situasi tersebut; dan membantu pengambil keputusan menilai apakah masalah di setiap tingkat besarnya sama, jadi pengambil keputusan bisa membandingkan elemen homogen tersebut secara akurat (Saaty, 1990).

Ada 3 (tiga) prinsip dasar *Analytic Hierarchy Process* (AHP):

1. Menyusun secara hirarkis, yaitu memecah persoalan menjadi unsur yang terpisah-pisah secara hirarki.
2. Penetapan prioritas, yaitu menentukan peringkat elemen-elemen yang secara relatif penting.
3. Konsistensi logis, yaitu menjamin bahwa semua elemen dikelompokkan secara logis dan diperingkatkan secara konsisten sesuai dengan suatu kriteria yang logis (Saaty, 1993)

*Analytic Hierarchy Process* (AHP) adalah metode *Multi-Attribute Decision Method* (MADM) yang paling banyak digunakan. *Analytic Hierarchy Process* (AHP) digunakan sebagai alat untuk pengelolaan DAS terpadu karena memiliki sejumlah atribut yang diinginkan, seperti: 1) *Analytic Hierarchy Process* (AHP) adalah proses pengambilan keputusan terstruktur yaitu proses kuantitatif yang dapat didokumentasikan dan direplikasi, 2) dapat diterapkan pada situasi pengambilan keputusan yang melibatkan multi kriteria, 3) *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dapat diterapkan pada situasi pengambilan keputusan yang melibatkan penilaian subjektif, 4) menggunakan data kualitatif dan kuantitatif, 5) memberikan ukuran konsistensi preferensi, 6) terdapat dokumentasi yang cukup dari aplikasi *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dalam literatur akademik, 7) perangkat lunak *Analytic Hierarchy Process* (AHP) tersedia dengan dukungan teknis dan pendidikan, dan 8) *Analytic Hierarchy Process* (AHP) cocok untuk pengambilan keputusan kelompok (Steiguer *et al*, 2003).

Meskipun digunakan secara luas sebagai metode pengambilan keputusan, beberapa kritik terhadap AHP, adalah sebagai berikut: yaitu : 1) karena tidak ada dasar teoritis untuk pembentukan hierarki, maka pengambil keputusan ketika dihadapkan dengan situasi keputusan yang identik, dapat mengambil hierarki yang berbeda, sehingga solusinya berbeda, 2) peringkat yang dihasilkan oleh AHP adalah



sewenang-wenang karena dihasilkan oleh opini subjektif menggunakan skala rasio dan peringkat sewenang-wenang ini dapat menyebabkan "pembalikan peringkat," 3) ada kekurangan dalam metode untuk menggabungkan bobot individu menjadi bobot komposit, dan 4) tidak adanya teori statistik yang mendasarinya. Namun terlepas dari hal-hal tersebut, AHP tetap sangat populer di kalangan pengambil keputusan sektor publik (Hill dan Zammit 2000 dalam Steiguer *et al*, 2003).

Beberapa penelitian dalam pengelolaan sumber daya air menggunakan AHP telah dilakukan, antara lain oleh Seejata (2018) yang memodelkan daerah rawan banjir di Sukhothai, Thailand. Enam parameter fisik dipilih untuk menentukan bobot kepentingan relatif menggunakan perbandingan matriks berpasangan yaitu jumlah curah hujan, kemiringan, elevasi, kepadatan sungai, penggunaan lahan dan permeabilitas tanah. Pemodelan spasial dilakukan menggunakan GIS selama periode 2009-2014. Hasil penelitian menunjukkan bahwa provinsi bagian selatan rentan terhadap banjir yang terutama disebabkan oleh intensitas curah hujan sebagai skor tertinggi dari AHP. Tiga kabupaten dari provinsi tersebut yaitu Muang, Kongkrait, dan Khirimat merupakan daerah rawan banjir yang sangat berisiko tinggi. Hasil analisa menggunakan GIS yang menunjukkan luas banjir di kabupaten yang sama, namun dengan pola spasial banjir yang berbeda.

Jabbar *et al*, 2019 mengidentifikasi parameter utama yang mempengaruhi kerentanan DAS di Eagle Creek Watershed, Indiana dan menyarankan faktor pembobotan baru untuk setiap parameter menggunakan analisa AHP. Metode yang diusulkan diimplementasikan dengan menggunakan enam faktor utama yang sesuai yaitu penggunaan lahan, jenis tanah, curah hujan, kemiringan, kedalaman air tanah, dan jenis batuan dasar. Selanjutnya kombinasi dari penilaian kerentanan DAS dan GIS sebagai alat analisa spasial digunakan untuk menghasilkan peta yang menunjukkan zona rentan untuk DAS.

Mangare (2016) menggunakan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) ini akan membantu pemecahan untuk pemilihan bangunan pengaman pantai. Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) merupakan metode yang cukup representatif dalam membantu proses pengambilan keputusan terhadap beberapa alternatif yang memiliki posisi yang mendekati satu sama lain. penerapan metode ini menghasilkan



keputusan bahwa pemilihan jenis bangunan pengaman pantai Likupang sebagai berikut *Seawall* 42,25 %, *Groin* 20,78 %, dan *Jetty* 36,97 %. Kinanti (2018) menggunakan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) untuk menentukan kriteria yang paling berpengaruh dalam memilih teknologi pembangunan drainase di Bandung dan pemilihan tipe/jenis konstruksi, dengan responden pemegang kepentingan dalam proyek pembangunan drainase di Kota Bandung. Hasil *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dapat menunjukkan kriteria yang paling berpengaruh yaitu biaya dan waktu pelaksanaan sedangkan alternatif pilihan teknologi pembangunan drainase adalah menggunakan teknologi cor ditempat. Wahyudi dkk (2017) menggunakan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) untuk menilai kondisi dan fungsi sungai sungai. Komponen yang digunakan sebagai indikator dalam penilaian fungsi dan kondisi sungai. Bobot penilaian untuk masing-masing komponen adalah 15,6% untuk bangunan konservasi; 65,9% untuk bangunan pengendalian daya rusak air dan 18,5% untuk bangunan pendayagunaan. Masing-masing bagian bangunan selanjutnya dianalisa untuk mendapatkan bobot, dimana yang terbesar adalah perkuatan lereng 46,2% dan terkecil bantaran 1,95%. Berdasarkan analisa AHP, penilaian komponen Sungai Pepe untuk bangunan konservasi sebesar 49,55% dan dikategorikan Baik, bangunan pengendalian daya rusak air sebesar 88,17% dan dikategorikan Baik, bangunan pendayagunaan sebesar 54,27% dan dikategorikan Baik, sehingga didapatkan penilaian fungsi dan kondisi Sungai Pepe secara keseluruhan saat ini adalah 75,88% dengan kategori Baik.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Analisis Debit Banjir Rencana

Analisa debit banjir rencana dilakukan untuk mendapatkan debit banjir rancangan pada periode ulang tertentu, yaitu pada periode ulang 5 Tahun ( $Q_5$ ), 10 Tahun ( $Q_{10}$ ), 20 Tahun ( $Q_{20}$ ) dan 50 Tahun ( $Q_{50}$ ) berdasarkan hasil pengamatan lapangan dan berdasarkan analisa hidrograf satuan sintesis menggunakan data curah hujan. Hidrograf adalah kurva yang memberi hubungan antara parameter aliran dan waktu. Parameter tersebut bisa berupa kedalaman aliran (elevasi) atau debit aliran; sehingga terdapat dua macam hidrograf yaitu hidrograf muka air dan hidrograf debit (Triatmodjo, 2009). Analisis debit banjir menggunakan hidrograf satuan diperkenalkan oleh Sherman (1932) yang mentransformasikan hujan menjadi debit

aliran. Hidrograf satuan didefinisikan sebagai hidrograf limpasan langsung yang dihasilkan dari 1 cm curah hujan yang jatuh secara merata di permukaan DAS dengan intensitas tetap dalam suatu durasi efektif (Chow *et al*, 1988). Ada tiga jenis hidrograf satuan sintesis, yaitu (1) yang berhubungan dengan karakteristik hidrograf, yaitu laju aliran puncak, waktu dasar, dan lain-lain terhadap karakteristik DAS, misalnya hidrograf satuan sintesis Snyder; (2) berdasarkan hidrograf satuan tanpa dimensi, misalnya hidrograf satuan sintesis Soil Conservation Service; dan (3) yang didasarkan pada model penyimpanan DAS (Chow *et al*, 1988). Unit hidrograf satuan sintetik dapat pula dikembangkan dengan menggunakan algoritma genetika (Rai, R.K *et al*, 2009; Sarkar *et al*, 2010).

Analisis debit banjir rencana dimulai dari pengolahan data hujan, uji validasi data, perhitungan hujan wilayah, analisa statistik, uji kecocokan, perhitungan curah hujan rencana, perhitungan pola hujan jam-jaman dan perhitungan debit banjir.

Tahapan analisa hidrologi banjir adalah sebagai berikut:

1). Pengolahan Data Hujan

Persyaratan data dalam perhitungan banjir rencana meliputi ketersediaan dan kualitas datanya. Data curah hujan yang digunakan adalah data dalam kurun waktu 20 Tahun terakhir (SNI 2415:2016).

2). Uji Validitas Data

Data hujan sebelum digunakan untuk perhitungan dilakukan uji validasi dengan kurva masa ganda yaitu dengan membuat grafik antara sumbu X yang merupakan nilai kumulatif hujan tahunan setiap pos hujan dan sumbu Y yang merupakan nilai kumulatif hujan rerata dari pos hujan. Syarat data dikatakan konsisten apabila sebaran data hujan membentuk linear dan nilai koefisien deterministik ( $R^2$ )  $\sim 1$ .

Koefisien deterministik menunjukkan seberapa jauh kesalahan dalam memperkirakan besarnya variabel terikat y dapat direduksi menggunakan informasi yang dimiliki variabel bebas x. Model regresi dikatakan sempurna apabila  $r^2 = 1$ . Adapun koefisien deterministik antara variabel x dan y dapat dicari dengan Persamaan 2.1. (Asdak, 1995).

$$r^2 = \frac{[\sum(x_i y_i) - \{\sum(x_i) \sum(y_i)\} / n]^2}{[\sum(x_i)^2 - \{\sum(x_i)^2 / n\}][\sum(y_i)^2 - \{\sum(y_i)^2 / n\}]} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

$i$  : data ke,

$n$  : jumlah data.

Dalam penelitian ini variabel  $x$  yang digunakan berupa jumlah kumulatif data hujan satu stasiun, sedangkan variabel  $y$  yang digunakan berupa jumlah kumulatif rata-rata data hujan semua stasiun. Data hujan stasiun dikatakan konsisten apabila  $r^2 \sim 1$ .

### 3). Hujan Wilayah

Data hujan yang terukur pada stasiun hujan hanya meliputi curah hujan di suatu stasiun tertentu. Jika akan menghitung curah hujan dalam suatu areal luasan maka dibutuhkan data dari beberapa stasiun. Setiap stasiun memiliki data hujan yang berbeda-beda, sehingga diperlukan nilai rata-rata untuk mendapatkan nilai hujan wilayah. Untuk mengetahui hujan wilayah, penelitian ini menggunakan metode *Thiessen*.

Metode *Thiessen* adalah metode yang ditentukan dengan cara membuat poligon antar stasiun pada suatu wilayah kemudian tinggi hujan rata-rata dihitung dari jumlah perkalian antara setiap luas poligon dan tinggi hujan dibagi dengan seluruh luas wilayah.

Prosedur penerapan Metode *Thiessen* meliputi langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Lokasi pos penakar hujan diplot pada peta DAS. Antar pos penakar dibuat garis lurus penghubung.
- b. Tarik garis tegak lurus di tengah-tengah tiap garis penghubung sedemikian rupa, sehingga membentuk poligon *Thiessen* (Gambar 2.1). Semua titik dalam satu poligon akan mempunyai jarak terdekat dengan pos penakar yang ada di dalamnya dibandingkan dengan jarak terhadap pos lainnya. Selanjutnya, curah hujan pada pos tersebut dianggap representasi hujan pada kawasan dalam poligon yang bersangkutan.
- c. Luas areal pada tiap-tiap poligon dapat diukur dan luas total DAS dapat diketahui dengan menjumlahkan semua luasan poligon.
- d. Hujan rata-rata DAS dapat dihitung dengan Persamaan 2.2. (Chow *et al*, 1988).

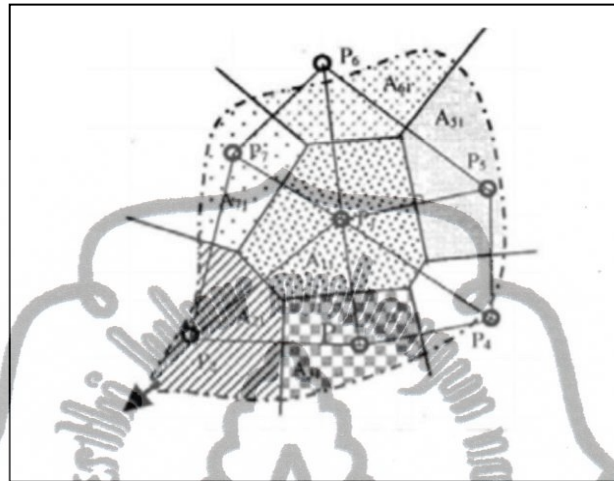
$$P = \frac{P_1 \cdot A_1 + P_2 \cdot A_2 + \dots + P_{n_p} \cdot A_{n_p}}{A_1 + A_2 + \dots + A_{n_p}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} P_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^{n_p} A_i} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan:

$P_1, P_2, \dots, P_n$  : curah yang tercatat di pos penakar hujan 1, 2, ..., n (mm),

$A_1, A_2, \dots, A_n$  : luar areal poligon 1, 2, ..., n (km<sup>2</sup>),

$n_p$  : banyaknya pos penakar hujan.



Gambar 2.2 *Polygon Thiessen DAS*

Sumber: Chow *et al*, 1988

#### 4). Analisis Frekuensi

Analisis frekuensi merupakan prosedur untuk memperkirakan frekuensi kejadian atau kemungkinan kejadian masa lalu dan/atau peristiwa masa depan (Haan, 1977). Tujuan dari analisis frekuensi data hidrologi adalah untuk menghubungkan besarnya kejadian ekstrem dengan frekuensi kejadian melalui penggunaan distribusi probabilitas (Chow *et al*, 1988). Analisa frekwensi data hidrologi mensyaratkan data homogen dan independen. Dengan menghitung parameter statistik seperti nilai rerata, standard deviasi, koefisien variasi, dan koefisien skewness dari data yang ada serta diikuti dengan uji statistik, maka distribusi probabilitas hujan yang sesuai dapat ditentukan. Tahapan analisa frekuensi adalah sebagai berikut:

##### a. Perhitungan Parameter Statistik

Parameter statistik dari perhitungan adalah Standar Deviasi (Sd), Koefisien Variaasi (Cv), Pengukuran Kurtosis (Ck) dan Koefisien Kemencengan (Cs). Besarnya parameter statistik diawali dengan menghitung  $(X_i - \bar{X})$ ,  $(X_i - \bar{X})^2$ ,  $(X_i - \bar{X})^3$ ,  $(X_i - \bar{X})^4$  terlebih dahulu.

*commit to user*



dengan:

$X_i$  : besarnya curah hujan daerah (mm),

$\bar{X}$  : rata-rata curah hujan maksimum daerah (mm).

Macam parameter statistik yang digunakan sebagaimana pada Persamaan 2.3 – 2.6 (Chow *et al*, 1988).

1. Standar Deviasi (Sd)

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (2.3)$$

2. Koefisien *Skewness* ( $C_s$ )

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)Sd^3} \dots\dots\dots (2.4)$$

3. Pengukuran Kurtosis ( $C_k$ )

$$C_k = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)Sd^4} \dots\dots\dots (2.5)$$

4. Koefisien Variasi ( $C_v$ )

$$C_v = \frac{Sd}{\bar{X}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Penentuan jenis analisa distribusi berdasarkan parameter statistik dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Parameter Statistik untuk Menentukan Jenis Distribusi

| No. | Jenis Distribusi | Syarat   |
|-----|------------------|--|
| 1.  | Normal           | $C_s = 0$<br>$C_k = 3$   |
| 2.  | Log Normal       | $C_s = C_v^3 + 3 C_v$<br>$C_k = 3 C_v^8 + 6 C_v^6 + 15 C_v^4 + 16 C_v^2 + 3$ |
| 3.  | Gumbell          | $C_s = 1,14$<br>$C_k = 5,4$  |
| 4.  | Log Pearson III  | Jika semua syarat tidak terpenuhi  |

Sumber: Chow *et al*, 1988

b. Pemilihan Jenis Distribusi Sebaran

Penentuan jenis analisa distribusi sebaran dilakukan berdasarkan parameter statistik yang dapat dilihat pada Tabel 2.2 Persamaan-persamaan untuk melakukan analisa dari masing-masing jenis distribusi tersebut adalah sebagai berikut:

1. Distribusi Normal

$$X_t = X_{rt} + k.Sd \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan:

$X_t$  : curah hujan rencana,  
 $X_{rt}$  : curah hujan rata-rata,  
 $k$  : koefisien distribusi normal,  
 $S_d$  : standar deviasi.

## 2. Distribusi Log Normal

$$\text{Log } X_t = \text{Log } X_{rt} + k_l \cdot S \dots\dots\dots (2.8)$$

$$X_t = 10^{\text{Log } X_t} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan:

$X_t$  : curah hujan rencana,  
 $X_{rt}$  : curah hujan rata-rata,  
 $k_l$  : koefisien distribusi log normal,  
 $S_d$  : standar deviasi.

## 3. Distribusi Gumbell

$$X_t = X_{rt} + \left( \frac{Y_g - Y_n}{S_n} \right) \cdot S \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan:

$X_t$  : curah hujan rencana,  
 $X_{rt}$  : curah hujan rata-rata,  
 $Y_g$  : koefisien distribusi Gumbell,  
 $Y_n$  : koefisien distribusi Gumbell ke n,  
 $S_d$  : standar deviasi.  
 $S_n$  : standar deviasi ke n.

## 4. Distribusi Log Pearson Tipe III

$$\text{Log } X_t = \text{Log } X_{rt} + k_p \cdot S \dots\dots\dots (2.11)$$

$$X_t = 10^{\text{Log } X_t} \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan:

$X_t$  : curah hujan rencana,  
 $X_{rt}$  : curah hujan rata-rata,  
 $k_p$  : koefisien distribusi pearson,  
 $S_d$  : standar deviasi.

### c. Uji Kecocokan

Uji kecocokan distribusi hujan dilakukan untuk mengetahui apakah metode distribusi hujan cocok dengan data hujan yang dipakai. Uji kecocokan distribusi dilakukan dengan menggunakan metode Smirnov-Kolmogorov untuk distribusi hujan Log Person III dengan tingkat ketelitian 5%, dengan pertimbangan bahwa pengujian metode Smirnov-Kolmogorov tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu, namun dengan memperhatikan kurva

(Bambang Triatmodjo, 2008). Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan nilai maksimum, yaitu selisih maksimum antara plot data dengan garis teoritis pada kertas probabilitas. Nilai kritis ( $\Delta_{cr}$ , *Smirnov-Kolmogorov Test*) tergantung dari jumlah data ( $n$ ) dan derajat kegagalan ( $\alpha$ ). Nilai  $\Delta_{cr}$  ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai  $\Delta_{cr}$  Smirnov – Kolmogorov

| $\alpha$<br>$n$ | 0,20                    | 0,10                    | 0,05                    | 0,01                    |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 5               | 0,45                    | 0,51                    | 0,56                    | 0,67                    |
| 10              | 0,32                    | 0,37                    | 0,41                    | 0,49                    |
| 15              | 0,27                    | 0,30                    | 0,34                    | 0,40                    |
| 20              | 0,23                    | 0,26                    | 0,29                    | 0,36                    |
| 25              | 0,21                    | 0,24                    | 0,27                    | 0,32                    |
| 30              | 0,19                    | 0,22                    | 0,24                    | 0,29                    |
| 35              | 0,18                    | 0,20                    | 0,23                    | 0,27                    |
| 40              | 0,17                    | 0,19                    | 0,21                    | 0,25                    |
| 45              | 0,16                    | 0,18                    | 0,20                    | 0,24                    |
| 50              | 0,15                    | 0,17                    | 0,19                    | 0,23                    |
| $n > 50$        | $\frac{1,07}{\sqrt{n}}$ | $\frac{1,22}{\sqrt{n}}$ | $\frac{1,36}{\sqrt{n}}$ | $\frac{1,63}{\sqrt{n}}$ |

Sumber: Justel, Peña dan Zamar, 1997 dalam Triatmodjo, 2009

#### 5). Hujan Efektif

Hujan efektif merupakan hasil perkalian dari koefisien limpasan dengan hujan total seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.13.

$$H_{eff} = X_T \times c \dots\dots\dots (2.13)$$

dengan:

$H_{eff}$  : hujan efektif,  
 $X_t$  : curah hujan rencana,  
 $c$  : koefisien limpasan.

#### 6). Koefisien Limpasan

Koefisien Limpasan merupakan perbandingan laju debit puncak dengan intensitas hujan yang dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti laju infiltrasi, tata guna lahan dan kemampuan tanah untuk menahan air. Nilai koefisien limpasan dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Koefisien Limpasan (C)

| Tipe Daerah Aliran          | C           |
|-----------------------------|-------------|
| <b>Rerumputan</b>           |             |
| Tanah pasir, datar, 2%      | 0,50 – 0,10 |
| Tanah pasir, sedang, 2-7%   | 0,20 – 0,15 |
| Tanah pasir, curam, 7%      | 0,15 – 0,20 |
| Tanah gemuk, datar, 2%      | 0,13 – 0,17 |
| Tanah gemuk, sedang, 2-7%   | 0,18 – 0,22 |
| Tanah gemuk, curam, 7%      | 0,25 – 0,35 |
| <b>Perdagangan</b>          |             |
| Daerah kota lama            | 0,75 – 0,95 |
| Daerah pinggiran            | 0,50 – 0,70 |
| <b>Perumahan</b>            |             |
| Daerah <i>single family</i> | 0,30 – 0,50 |
| Multi unit terpisah         | 0,40 – 0,60 |
| Multi unit tertutup         | 0,60 – 0,75 |
| Suburban                    | 0,25 – 0,40 |
| Daerah apartemen            | 0,50 – 0,70 |
| <b>Industri</b>             |             |
| Daerah ringan               | 0,50 – 0,80 |
| Daerah berat                | 0,60 – 0,90 |
| Taman, kuburan              | 0,10 – 0,25 |
| Tempat bermain              | 0,20 – 0,35 |
| Halaman kereta api          | 0,20 – 0,40 |
| Daerah tidak dikerjakan     | 0,10 – 0,30 |
| <b>Jalan</b>                |             |
| Beraspal                    | 0,70 – 0,95 |
| Beton                       | 0,80 – 0,95 |
| Batu                        | 0,70 – 0,85 |
| Atap                        | 0,75 – 0,95 |

Sumber: Chow *et al*, 1988

## 7). Analisa Hujan Jam-jaman dan Hujan Efektif

Dalam perhitungan banjir rancangan, diperlukan masukan berupa hujan rencana yang didistribusikan kedalam hujan jam-jaman (hyetograph). Untuk dapat mengubah hujan rencana ke dalam besaran hujan jam-jaman diperlukan pola distribusi hujan jam-jaman yang bisa didapatkan dengan menggunakan model distribusi hujan. Pada penelitian ini analisa hujan jam-jaman menggunakan model distribusi hujan Tadashi Tanimoto (1969), dengan pertimbangan bahwa model ini dikembangkan berdasarkan penelitian distribusi hujan yang ada di Pulau Jawa. Model ini menggunakan lama hujan 8 (delapan) jam (Triatmodjo, 2009).



Tabel 2.5 Distribusi Hujan Jam-jaman Tadashi Tanimoto

| T (jam) | %    | Kumulatif (%) |
|---------|------|---------------|
| 1       | 26,0 | 26,0          |
| 2       | 23,0 | 50,0          |
| 3       | 17,0 | 67,0          |
| 3       | 13,0 | 80,0          |
| 5       | 7,0  | 87,0          |
| 6       | 5,5  | 92,5          |
| 7       | 3,0  | 96,5          |
| 8       | 3,5  | 100,0         |

Sumber : Triatmodjo, 2009

## 8). Hidrograf Satuan Sintesis Soil Conservation Service (SCS)

Hidrograf Satuan Sintesis *Soil Conservation Service* (SCS) dikembangkan oleh Victor Maockus pada tahun 1957. *The US Soil Conservation Service* menggunakan hidrograf tak berdimensi yang dibuat berdasarkan analisis sejumlah besar hidrograf satuan yang diperoleh dari data lapangan pada DAS dengan berbagai ukuran dan lokasi geografis yang berbeda. Hidrograf linear tak berdimensi ini mempertimbangkan rasio tanpa dimensi  $q/q_p$  atau  $Q_a/Q$  (aliran/aliran puncak) pada sumbu ordinatnya dan  $t/T_p$  (waktu/waktu ke puncak) pada sumbu absisnya. Unit hidrograf memiliki titik infleksi pada 1,7 kali dari waktu untuk mencapai puncaknya (*United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service*, 2007). Formula yang digunakan yaitu:

$$Q_p = q_p \cdot P_e \cdot 0,0028 \dots \dots \dots (2.16)$$

$$q_p = \frac{A}{T_0 \text{ terkoreksi}} \times 48 \dots \dots \dots (2.17)$$

$$T_0 \text{ terkoreksi} = \frac{\text{Time Ratio} \times 1,5}{1,5} \dots \dots \dots (2.18)$$

$$T_c = 0,06628 \times L^{0,77} \times S^{0,38} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$T_p = \frac{0,24 T_c}{2} + t_p \dots \dots \dots (2.20)$$

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$S_p = \frac{25400}{CN} - 254 \dots \dots \dots (2.22)$$

dengan:

Qp: debit puncak banjir ( $\text{m}^3$  detik),

qp : tinggi debit puncak ( $\text{m}^3$  detik),

Tp: waktu naik (jam),

Tc: waktu konsentrasi HSS SCS (jam),

Pe : kedalaman hujan efektif (mm),

S<sub>p</sub> : retensi potensial maksimum air oleh tanah, yang sebagian besar adalah karena infiltrasi (mm).

#### 9). Hidrograf Satuan Sintesis Gama I

Hidrograf Satuan Sintetis Gama I dikembangkan oleh Harto tahun 1983 berdasarkan hasil pengamatan terhadap perilaku hidrologik 30 DAS di Pulau Jawa (Harto, 2000). Belakangan Hidrograf Satuan Sintetis Gama I terbukti berfungsi dengan baik pula untuk berbagai daerah lain di Indonesia (Triatmodjo, 2009). Dengan tidak mengabaikan parameter-parameter DAS yang telah dikembangkan sebelumnya, HSS Gama I mengusulkan beberapa parameter DAS baru yang ternyata pengaruhnya sangat menonjol dalam proses pengalihan hujan menjadi aliran. Komponen hidrograf satuan sintetis Gama I terdiri dari 4 (empat) variabel pokok, yaitu: waktu naik/time to rise (TR), debit puncak/peak discharge (QP), waktu dasar/time to base (TB), dan koefisien tampungan ( $k_t$ ). Persamaan-persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

##### 1 Waktu Puncak HSS Gama I (TR)

$$TR = 0,43 \left( \frac{L}{100 SF} \right)^3 + 1,0665 S_r IM + 1,2775 \dots \dots \dots (2.23)$$

##### 2 Debit Puncak banjir (QP)

$$QP = 0,1836 A^{0,5887} TR^{-0,4008} JN^{0,2381} \dots \dots \dots (2.24)$$

##### 3 Waktu Dasar (TB)

$$TB = 27,4132 TR^{0,1457} S_r^{-0,0986} SN^{0,7344} RUA^{0,2574}, \dots \dots \dots (2.25)$$

##### 4 Koefisien Resesi (tampung) ( $k_t$ )

$$k_t = 0,5617 A^{0,1798} S_r^{-0,1446} SF^{-1,0897} D^{0,0452} \dots \dots \dots (2.26)$$

##### 5 Aliran Dasar (QB)

$$QB = 0,4715 A^{0,6444} D^{0,9430} \dots \dots \dots (2.27)$$

dengan:

L : panjang saluran utama (km),

SF : faktor sumber,

SIM : faktor simetri,

A : luas DAS (km<sup>2</sup>),

JN : jumlah titik pertemuan sungai,

S<sub>r</sub> : kemiringan rata – rata DAS,

SN : frekuensi sumber,

RUA : rasio luas DAS bagian hulu,

D : kerapatan jaringan drainase (km),

Sedangkan sisi resesi dinyatakan dalam bentuk persamaan eksponensial ditunjukkan pada Persamaan dibawah.

$$Q_t = Q_p e^{-t/k} \dots\dots\dots(2.28)$$

dengan:

Q<sub>t</sub> : debit hitung setelah Q<sub>p</sub> (m<sup>3</sup>/detik),

Q<sub>p</sub> : debit puncak banjir (m<sup>3</sup>/detik),

T : waktu dari saat terjadinya debit puncak (jam),

k : koefisien tampung.

#### 10). Hidrograf Satuan Sintesis Nakayasu

Hidrograf adalah kurva yang memberi hubungan antara parameter aliran dan waktu. Parameter tersebut bisa berupa kedalaman aliran (elevasi) atau debit aliran; sehingga terdapat dua macam hidrograf yaitu hidrograf muka air dan hidrograf debit (Triatmodjo, 2009). Hidrograf satuan sintetis Nakayasu dikembangkan berdasarkan hasil penelitian pada beberapa sungai di Jepang (Soemarto dalam Triatmodjo, 2009). Penggunaan metode ini memerlukan beberapa karakteristik parameter daerah alirannya, seperti :

- a) Tenggang waktu dari permukaan hujan sampai puncak hidrograf (time of peak/ T<sub>p</sub>)
- b) Tenggang waktu dari titik berat hujan sampai titik berat hidrograf (time lag/T<sub>0,3</sub>)
- c) Tenggang waktu hidrograf (time base of hydrograph/t<sub>g</sub>)
- d) Luas daerah aliran sungai (A)

e) Panjang alur sungai utama terpanjang (length of the longest channel/L)  
Bentuk HSS Nakayasu diberikan oleh Gambar 2.4. dan Persamaan 2.29 – 2.34 (Triatmodjo, 2009):

$$Q_p = \frac{1}{36} \left( \frac{ARef}{0,3 T_p + T_{0,3}} \right) \dots\dots\dots (2.29)$$

$$T_p = t_g + 0,8 T_r \dots \dots \dots (2.30)$$

$$t_g = 0,4 + 0,058 L \text{ Untuk } L > 15 \text{ km} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$t_g = 0,21 L^{0,7} \text{ untuk } L < 15 \text{ km} \dots\dots\dots(2.32)$$

$$T_{0,3} = \alpha_c t_g \dots\dots\dots (2.33)$$

$$T_r = 0,5 t_g \text{ sampai } t_g \dots\dots\dots (2.34)$$

dengan:

$Q_p$  : debit puncak banjir ( $m^3/d$ ),

A : luas DAS ( $\text{km}^2$ ),

$R_{ef}$  : curah hujan efektif (1 mm),

$T_p$  : waktu naik (jam),

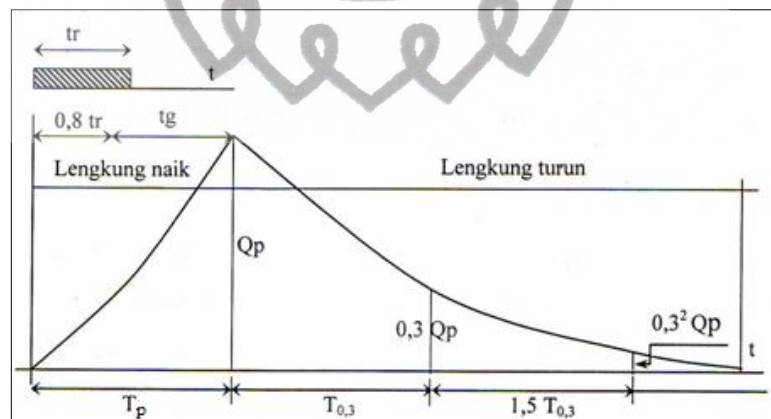
$T_{0,3}$  : waktu dari puncak banjir sampai 0,3 kali debit puncak banjir (jam),

$t_g$  : waktu konsentrasi HSS Nakayasu (jam),

$T_r$  : satuan waktu dari curah hujan (jam),

$\alpha_c$  : koefisien karakteristik DAS biasanya diambil 2,

$L$  : panjang saluran utama (km).



Gambar 2.3 Hidrograf Satuan Sintesis Nakayasu (Chow *et al*, 1988)

Bentuk hidrograf satuan diberikan oleh Persamaan 2.22 – 2.25 (Triatmodjo, 2009):

a. Pada kurva naik ( $0 < t < T_p$ )

$$Q_t = Q_p \left( \frac{t}{T_n} \right)^{2,4} \dots\dots\dots (2.35)$$



- b. Pada kurva turun ( $T_p < t < T_p + T_{0,3}$ )

$$Q_r = Q_p \times 0,3^{(t-T_p)/T_{0,3}} \dots\dots\dots (2.36)$$

- c. Pada kurva turun ( $T_p + T_{0,3} < t < T_p + T_{0,3} + 1,5 T_{0,3}$ )

$$Q_t = Q_p \times 0,3^{[(t-T_p)+(0,5T_{0,3})]/(1,5T_{0,3})} \dots\dots\dots (2.37)$$

- d. Pada kurva turun ( $t > T_p + T_{0,3} + 1,5T_{0,3}$ )

$$Q_t = Q_p \times 0,3^{[(t-T_p)+(1,5T_{0,3})]/(2T_{0,3})} \dots\dots\dots (2.38)$$

#### 11). Metode Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Model dan simulasi perlu diverifikasi dan divalidasi terutama untuk menilai tingkat keakuratan yang merupakan salah satu indikator kualitas aplikasi model dan simulasi (Balci, 2004). *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) merupakan metode sederhana untuk menganalisa tingkat keakuratan data hasil peramalan dengan data aktual (Makridakis and Wheelwrigth, 1999). Metode ini menghitung kesalahan absolut pada tiap periode dibagi dengan nilai observasi dan kemudian merata-rata kesalahan persentase absolut. Metode ini digunakan untuk menemukan metode peramalan terbaik dan digunakan di berbagai bidang keilmuan, seperti yang dilakukan oleh Heriansyah dan Hasibuan (2018), Zainun *et al* (2019), dan Margi dan Pendawa (2015). Kemampuan model peramalan adalah sangat baik jika nilai MAPE berada di bawah 10% dan baik jika nilai MAPE berada di antara 10% sampai dengan 20% (Lewis, 1982 dalam Montano *et al*, 2013). Rumus MAPE adalah sebagai berikut:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t}}{n} \times 100 \% \quad (2.39)$$

dengan:

$Y_t$  : hasil prediksi,

$\hat{Y}_t$  : data aktual,

$n$  : jumlah data.

### 2.2.2 Analisis Hidrolika

Analisa hidrolika bertujuan untuk mengetahui fenomena perilaku hidraulik aliran di dalam saluran khususnya kapasitas penampang saluran. Pada kasus sungai alam, tipe aliran yang ada adalah aliran tidak seragam (*non uniform flow*). Aliran sungai alam bisa dianggap sebagai aliran mantap (*steady flow*) maupun aliran tak mantap (*unsteady flow*). Profil muka air dihitung dengan cara membagi saluran menjadi bagian-bagian saluran yang pendek, lalu menghitung secara bertahap dari satu ujung ke ujung saluran lainnya. Cara atau metode ini biasa disebut sebagai Metode Tahapan Langsung atau *Direct Step Methods*. Gambar 2.5 menggambarkan bagian saluran sepanjang  $\Delta x$ , tinggi energi total di kedua ujung penampang 1 dan penampang 2 dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_0 \Delta x + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + S_f \Delta x \quad (2.40)$$

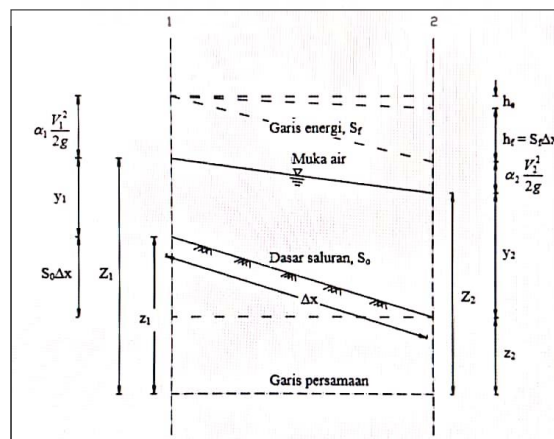
$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - S_f} = \frac{\Delta E}{S_0 - S_f} \quad (2.41)$$

Dengan  $E$  energi spesifik, dan dianggap  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_e$ ,

$$E = y + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2.42)$$

dengan:

- $y$  : kedalaman aliran (m),
- $v$  : kecepatan rata-rata (m/dt),
- $\alpha_e$  : koefisien energi,
- $S_0$  : kemiringan dasar,
- $S_f$  : kemiringan geser.



Gambar 2.4 Bagian Saluran Sepanjang  $\Delta x$   
(Sumber: Chow, 1985)

Bila dipakai rumus *Manning*, kemiringan geser dinyatakan sebagai berikut:

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{2,22 R^{4/3}} \quad (2.43)$$

dengan  $R$  adalah jari-jari hidrolis.

Besarnya nilai  $V$  pada kedua penampang dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_1 = \frac{Q}{A_1}; V_2 = \frac{Q}{A_2} \dots\dots\dots(2.44)$$

dengan :

$V_1$  : kecepatan aliran pada penampang 1 (m/dt),

$V_2$  : kecepatan aliran pada penampang 2 (m/dt),

$Q$  : debit aliran ( $m^3/dt$ ),

$A_1$  : luas basah penampang 1 ( $m^2$ ),

$A_2$  : luas basah penampang 2 ( $m^2$ ).

Analisa hidrolika dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System*) untuk mensimulasi dan membuat analisa numerik yang mampu menggambarkan kondisi saluran eksisting maupun rencana. HEC-RAS dikembangkan oleh *the United States Army Corps of Engineers* dan dirilis sejak Tahun 1995. *HEC-RAS* memuat 4 (empat) komponen analisa hidrolika satu dimensi untuk: 1). Perhitungan profil muka air aliran seragam (*steady flow*); 2). Simulasi aliran tidak seragam (*unsteady flow*); 3). Perhitungan transpor sedimen dengan batas yang bisa dipindahkan dan 4). pemodelan transportasi unsur kualitas air dan temperatur.

Modul *Steady Flow Water Surface Component* berfungsi untuk menghitung profil muka air aliran permanen berubah beraturan (*steady gradually varied flow*). *Regime* aliran yang dapat dimodelkan adalah aliran sub-kritik, super-kritik, maupun campuran antara keduanya. Langkah hitungan profil muka air didasarkan pada penyelesaian persamaan energi (satu-dimensi). Kehilangan energi dianggap diakibatkan oleh gesekan (persamaan *Manning*) dan kontraksi/ekspansi (koefisien dikalikan beda tinggi kecepatan). Persamaan momentum dipakai manakala dijumpai aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*), misalnya campuran *regime* aliran sub-kritik dan super-kritik (*hydraulic jump*), aliran melalui jembatan, aliran di percabangan sungai (*stream junctions*). Modul aliran permanen mampu memperhitungkan pengaruh berbagai hambatan aliran, seperti jembatan (*bridges*), gorong-gorong (*culverts*), bendung (*weirs*), ataupun hambatan di bantaran sungai. Modul aliran permanen dirancang untuk dipakai pada permasalahan pengelolaan bantaran sungai dan penetapan asuransi risiko banjir berkenaan dengan penetapan bantaran sungai dan dataran banjir. Modul aliran permanen dapat pula dipakai

untuk perkiraan perubahan muka air akibat perbaikan alur atau pembangunan tanggul.

Modul *Unsteady Flow Simulation* mampu mensimulasikan aliran tak permanen satu dimensi pada sungai yang memiliki alur kompleks dan dapat pula mensimulasikan regime aliran campuran (sub-kritik, super-kritik, loncat air, dan *draw-downs*). Fitur spesial modul aliran tak permanen mencakup analisa dam-break, limpasan melalui tanggul dan tanggul jebol, pompa, operasi dam navigasi, serta aliran tekan dalam pipa.

*Steady flow* merupakan pemodelan dengan komponen aliran yang tetap sama di setiap tempat dan waktunya. Ketika terjadi kendala pada pemodelan *unsteady flow*, maka dilakukan pemodelan *steady flow*. Penggunaan model analisa banjir *unsteady flow* dan *steady flow* mempunyai perbedaan hasil. Simulasi aliran tidak permanen dilakukan untuk melakukan penelusuran banjir (*flood routing*) di sungai. Jika hanya ingin memperkirakan muka air banjir di sungai, dapat dilakukan dengan model aliran permanen. Dengan catatan elevasi muka air yang dihasilkan melebihi daripada seharusnya (*over estimate*).

Langkah-langkah pemodelan adalah sebagai berikut:

- a. Membuat skematik jaringan saluran yang akan dimodelkan berdasarkan hasil pengukuran lapangan
- b. Memasukkan data geometri saluran
- c. Mendefinisikan kondisi-kondisi batas/*boundary conditions* yang akan digunakan dalam analisa
- d. Menjalankan program pemodelan
- e. Mencetak hasil/ *output*

### 2.2.3 Sedimentasi di Sungai

Sedimentasi terjadi akibat adanya erosi dan membawa banyak dampak di sungai, saluran, waduk, bendungan atau pintu-pintu air dan di sepanjang sungai (Soemarto, 1995). Sedimentasi terjadi melalui proses pengendapan material yang di transpor oleh media air. Sedimen yang terdapat di mulut-mulut sungai adalah hasil dan proses pengendapan material-material yang diangkut oleh air sungai. Sedimen yang dihasilkan oleh proses erosi dan terbawa oleh aliran air akan diendapkan pada suatu



tempat ketika kecepatan air melambat atau terhenti. Peristiwa pengendapan ini dikenal dengan peristiwa atau proses sedimentasi, yaitu proses yang bertanggung jawab atas terbentuknya daratan-daratan alluvial yang luas. Dampak lain dari sedimentasi di sungai adalah terjadinya pengendapan sedimen di dasar sungai yang menyebabkan naiknya dasar sungai, kemudian menyebabkan tingginya muka air sehingga berakibat seringnya terjadi banjir yang menimpa lahan-lahan yang tidak dilindungi.

Dalam penelitian ini digunakan fungsi angkutan sedimen Meyer-Peter and Müller mengacu pada hasil penelitian sebelumnya pada lokasi yang sama, yaitu penelitian yang dilakukan oleh Hidayah, dkk (2013). Dalam Studi tersebut dilakukan pengambilan data debit dan sedimen secara langsung di Bengawan Solo pada titik Serenan dan Jurug dan diuji di laboratorium. Hasil uji selanjutnya dibandingkan dengan hasil hitungan menggunakan metode angkutan sedimen yaitu Ackers-White, Englund-Hansen, Laursen, Meyer-Peter and Müller, Toffaleti dan Yang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Metode Meyer-Peter and Müller dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya debit angkutan sedimen pada sungai Bengawan Solo pada titik Serenan dengan tingkat kesalahan 4,12 %.

Metode Meyer-Peter and Müller (1938) merupakan pengembangan dari metode Meyer-Peter (1933) (Yang, 1996). Pengembangan rumus Meyer-Peter and Müller berdasarkan hasil eksperimen lanjutan terhadap rumus Meyer-Petter dengan memperluas beberapa variable seperti kemiringan dan ukuran sedimen. Meyer-Peter and Müller menyatakan secara bahwa rumus tersebut adalah untuk perhitungan angkutan muatan dasar, yaitu gerakan sedimen yang menggulung atau melompat di sepanjang dasar saluran sedangkan angkutan material tersuspensi tidak termasuk didalamnya (United States Department of Agriculture, 1972). Metode Meyer-Peter and Müller sesuai digunakan pada diameter butir sedimen 0,4-30 mm, *energy gradient* 0,0004-0,02. Rumus Meyer-Peter and Müller (1948) adalah sebagai berikut :

$$\gamma \left( \frac{K_r}{K_r'} \right)^{\frac{3}{2}} R_h S_e = 0,047 (\gamma_s - \gamma) d + 0,25 \rho^{\frac{1}{3}} (q_b^{\frac{2}{3}}) \dots\dots\dots (2.45)$$

dengan:

- $\gamma_s$  dan  $\gamma$  : berat jenis air dan sedimen ( $\text{ton/m}^3$ ),
- $R_h$  : radius hidrolis (m),
- $S_e$  : kemiringan energi (m),
- $\rho$  : massa air ( $\text{ton-s/m}^3$ ),
- $d$  : diameter partikel rata-rata,
- $q_b$  : laju sedimen dasar di bawah air dalam berat per satuan waktu dan lebar ( $\text{ton/s/m}$ ),
- ( $K_s/K_r$ ) : jenis kemiringan, yang disesuaikan sedemikian rupa sehingga hanya sebagian dari total energi yang hilang, yaitu, bahwa karena resistensi butir  $S_r$ , bertanggung jawab atas gerakan sedimen dasar.

Saat ini perhitungan sedimentasi dapat dilakukan menggunakan aplikasi HEC-RAS. Komponen angkutan sedimen pada HEC-RAS dimaksudkan untuk mensimulasi angkutan sedimen satu dimensi yang dihasilkan dari gerusan dan pengendapan selama periode waktu sedang, dan dapat dilakukan untuk kurun waktu panjang selama beberapa tahun serta untuk kejadian banjir tunggal. Modul yang digunakan adalah *Quasi-Unsteady Flow* yaitu fungsi HEC-RAS yang digunakan untuk pemodelan analisa sedimen dengan input data geometri, input *Quasi-Unsteady Flow* dan input data sedimen. Input data geometri adalah data aliran sungai, *cross section* dan nilai *Manning* sesuai karakteristik lokasi penelitian. Input *Quasi-Unsteady Flow* adalah data aliran (*flow series*) pada hulu (*upstream*) aliran sungai sedangkan input data sedimen adalah karakteristik sedimen berdasarkan hasil uji laboratorium, yaitu ukuran butiran sedimen, *specific gravity* (Hydrologic Engineering Center, 2016).

#### 2.2.4 Analytic Hierarchial Process (AHP)

Metode proses *Analytical Hierarchy Process* (AHP), didasarkan pada 3 prinsip yaitu dekomposisi prioritas, penilaian komparatif dan sintesis prioritas.

##### a. Prinsip dekomposisi

Permasalahan didekomposisi ke dalam bentuk hirarki sedemikian rupa sehingga mencakup unsur-unsur terpenting dari permasalahan.

##### b. Prinsip penilaian komparatif

Penilaian komparatif dilakukan dengan cara membandingkan pasangan parameter di setiap level hirarki yang sederajat dengan tetap mempertimbangkan hirarki di atasnya.

c. Prinsip sintesis prioritas

Prioritas penilaian ditentukan dalam skala rasio untuk setiap level. Pada level hirarki terendah disusun himpunan semesta prioritas sehingga diperoleh sejumlah alternatif terbaik.

Skala yang digunakan yaitu skala 1 yang menunjukkan tingkat yang paling rendah (*equal important*) sampai dengan 9 yang menunjukkan tingkatan paling tinggi.

Skala penilaian perbandingan berpasangan dapat dilihat pada tabel 2.6

Tabel 2.6 Skala Penilaian Perbandingan Berpasangan

| Angka   | Definisi  | Penjelasan   |
|---------|---|--|
| 1       | Sama pentingnya   | Kedua faktor sama pentingnya untuk diperhatikan dalam menjaga struktur dan fungsi tanggul      |
| 3       | Agak lebih penting yang satu atas lainnya                 | Salah satu faktor penilaian agak lebih lebih penting dari yang lain.                           |
| 5       | Lebih penting   | Salah satu faktor penilaian lebih penting dari yang lain.                                      |
| 7       | Sangat penting dan bedanya jauh                           | Salah satu faktor penilaian sangat penting dan bedanya jauh dibanding faktor penilaian lainnya |
| 9       | Kepentingan yang ekstrim                                  | Salah satu faktor penilaian secara ekstrim lebih penting dibanding faktor penilaian lainnya    |
| 2,4,6,8 | Nilai tengah diantara dua nilai keputusan yang berdekatan | Bila rekomendasi dan kompromi dibutuhkan   |

(Sumber : Saaty, 1993)

Untuk mendapatkan keputusan yang rasional dengan menggunakan AHP, perlu melakukan beberapa tahapan.yaitu sebagai berikut :

- Mendefinisikan masalah dan menentukan solusi yang diinginkan.
- Membuat struktur hirarki yang diawali dengan tujuan utama sebagai level teratas, dilanjutkan dengan kriteria-kriteria yang cocok untuk dipertimbangkan dan menilai alternatif - alternatif pilihan yang ingin di rangking

- c. Menilai bobot kriteria yang ada pada hirarki tersebut dengan cara membentuk matriks perbandingan berpasangan.
- d. Mendefinisikan perbandingan berpasangan dengan menentukan prioritas. Perbandingan tersebut kemudian ditransformasikan dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan untuk analisis numerik. Nilai numerik yang dikenakan untuk seluruh perbandingan diperoleh dari skala perbandingan 1 sampai 9 yang telah ditetapkan oleh Saaty. Matriks yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.46)$$

dengan:

$k_{11}$  : nilai dari kriteria 1 dibandingkan dengan kriteria 1,

$k_{12}$  : nilai dari kriteria 1 dibandingkan dengan kriteria 2,

$k_{ij}$  : nilai dari kriteria ke i dibandingkan kriteria ke j.

untuk setiap kriteria ke i dan j, berlaku:  $k_{ii} = 1$ , dan  $k_{ij} = k_{ji}^{-1}$

- e. Menormalkan data yaitu dengan membagi nilai dari setiap elemen didalam matriks yang berpasangan dengan nilai total dari setiap kolom.

$$N = \begin{bmatrix} n_1 = \frac{s_1}{\sum_{i=1}^n s_i} \\ n_2 = \frac{s_2}{\sum_{i=1}^n s_i} \\ n_3 = \frac{s_3}{\sum_{i=1}^n s_i} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.47)$$

- f. Menghitung nilai eigenvector dan menguji nilai konsistensinya. Pengukuran konsistensi dari suatu matriks didasarkan atas eigenvalue maksimum, dimana nilai index konsistensi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \dots\dots\dots (2.48)$$

dengan :

CI : rasio penyimpangan (deviasi) konsistensi (indeks konsistensi),

$n$  : orde matriks (banyaknya alternatif),

$\lambda_{\max}$  : nilai eigen terbesar dari matriks berordo n.

Apabila CI bernilai nol, maka matriks perbandingan berpasangan tersebut konsisten. Untuk mengetahui batas ketidakkonsistenan suatu matriks perbandingan berpasangan yaitu dengan menghitung Rasio Konsistensi (CR). Nilai Rasio

Konsisten (CR) adalah perbandingan Indeks Konsisten (CI) dengan nilai Random Indeks (RI) yang didapat dari suatu eksperimen oleh Oak Ridge National Laboratory yang dikembangkan oleh Wharton School. Nilai ini bergantung pada ordo matriks n.

Tabel 2.7 Nilai Random Indeks (RI)

| N  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |

Sehingga didapatkan rumus Rasio Konsistensi yaitu :

$$CR = \frac{CI}{RI} \dots \dots \dots (2.49)$$

dengan :

CR : rasio konsistensi,

CI : rasio penyimpangan (deviasi) konsistensi (indeks konsistensi),

RI : indeks random.

Apabila nilai CR lebih kecil dari 0,1 maka ketidakkonsistenan pendapat dari hasil kuesioner masih dapat diterima, namun jika nilai CR lebih besar dari 0,1 maka penilaian perlu diulang.

Dalam penilaian gejala kerusakan bagian tanggul, analisa yang dilakukan tidak dengan membandingkan satu gejala kerusakan dengan gejala kerusakan yang lain secara langsung tetapi dengan memberi nilai di setiap gejala kerusakan. Hal ini dilakukan karena perbandingan langsung akan menjadi sangat panjang, dan waktu yang dibutuhkan untuk pengisian kuesioner oleh responden menjadi lebih lama, hal ini akan berdampak pada kekonsistenan responden saat mengisi kuesioner. Tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

#### 1). Uji Validitas dan Realibilitas

Data yang didapat diuji validitas dan realibilitas dengan signifikansi 5% terlebih dahulu sebelum dianalisis nilai nilai lokal dan indeks resiko.

$$r_{xy} = \frac{n \sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{\{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2\} \{n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2\}}} \dots \dots \dots (2.50)$$

dengan :

n : jumlah responden,

X : skor setiap item, *commit to user*



- $Y_1$  : skor total,  
 $(\sum X)^2$  : kuadrat jumlah skor item,  
 $\sum X^2$  : jumlah kuadrat skor item,  
 $\sum Y^2$  : jumlah kuadrat skor total,  
 $(\sum Y)^2$  : kuadrat jumlah skor total,  
 $r_{xy}$  : koefisien korelasi variabel x dan y.

Selanjutnya menghitung Uji-t dengan rumus :

$$t_{hitung} = \frac{r_{xy}\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \dots\dots\dots (2.51)$$

dengan:

- $t_{hitung}$  : nilai  $t_{hitung}$ ,  
 $n$  : jumlah responden,  
 $r_{xy}$  : koefisien korelasi variabel x dan y.

Kemudian membuat keputusan dengan membandingkan  $t$  hitung dengan  $t$  tabel dimana kaidah keputusannya adalah :

- Jika :  $t$  hitung  $>$   $t$  tabel berarti Valid  
 $t$  hitung  $<$   $t$  tabel berarti Tidak Valid

Rumus yang digunakan untuk uji Realibitas sebagai berikut :

$$r_{hitung} = \frac{n_{pe}}{n_{pe}-1} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{pe}} s_i^2}{s_t^2} \right) \dots\dots\dots (2.52)$$

dengan :

- $r_{hitung}$  : koefisien reliabilitas,  
 $n_{pe}$  : banyaknya butir pertanyaan,  
 $s_i^2$  : varians skor pertanyaan ke  $-I$ ,  
 $s_t^2$  : varians skor total.

Selanjutnya untuk menentukan reliabilitas tidaknya instrumen didasarkan pada ujicoba hipotesa dengan kriteria sebagai berikut:

- Jika :  $r$  hitung  $>$   $r$  tabel berarti Reliable  
 $t$  hitung  $<$   $t$  tabel berarti Tidak Reliable

## 2). Nilai lokal dan indeks resiko

Nilai lokal dari setiap gejala kerusakan di dapat dari rata-rata nilai kepentingan yang didapat dari responden pada gejala kerusakan tersebut. Sedangkan untuk indeks

resiko didapat dari perkalian nilai lokal dengan bobot bagian tanggul yang sudah dianalisis sebelumnya menggunakan metode AHP. Dari nilai lokal, dapat dilihat nilai kepentingan gejala kerusakan tersebut mempengaruhi setiap bagian tanggul. Sedangkan indeks resiko memperlihatkan gejala kerusakan yang paling berdampak pada kondisi fisik tanggul secara keseluruhan.

Kelebihan proses analitik hirarki (AHP) adalah sebagai berikut:

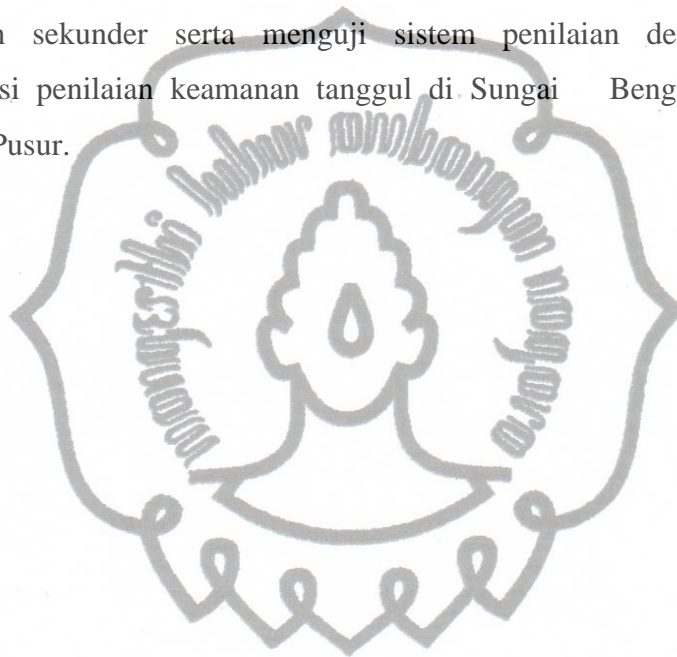
- a. Fleksibel - AHP dapat secara fleksibel digunakan untuk menyelesaikan beragam jenis masalah yang tidak terstruktur.
- b. Mereduksi Komplektisitas - AHP menggabungkan pendekatan deduktif dan sistem untuk digunakan secara komprehensif dalam meninjau masalah yang kompleks.
- c. Melihat Ketergantungan Elemen - AHP dapat menyelesaikan masalah dengan elemen-elemen yang saling bergantung.
- d. Penyusunan Hierarki - AHP dapat meniru kemampuan manusia dalam menyusun struktur masalah ke dalam hierarki.
- e. Pengukuran - AHP dapat menghasilkan skala pengukuran (bobot) untuk elemen-elemen kualitatif dan abstrak.
- f. Konsistensi - AHP memberikan analisa konsistensi dalam penilaian kesesuaian data dan hierarki yang merupakan refleksi atas logika manusia.
- g. Sintesis - AHP menghasilkan pertimbangan dan penilaian menyeluruh untuk setiap alternatif.

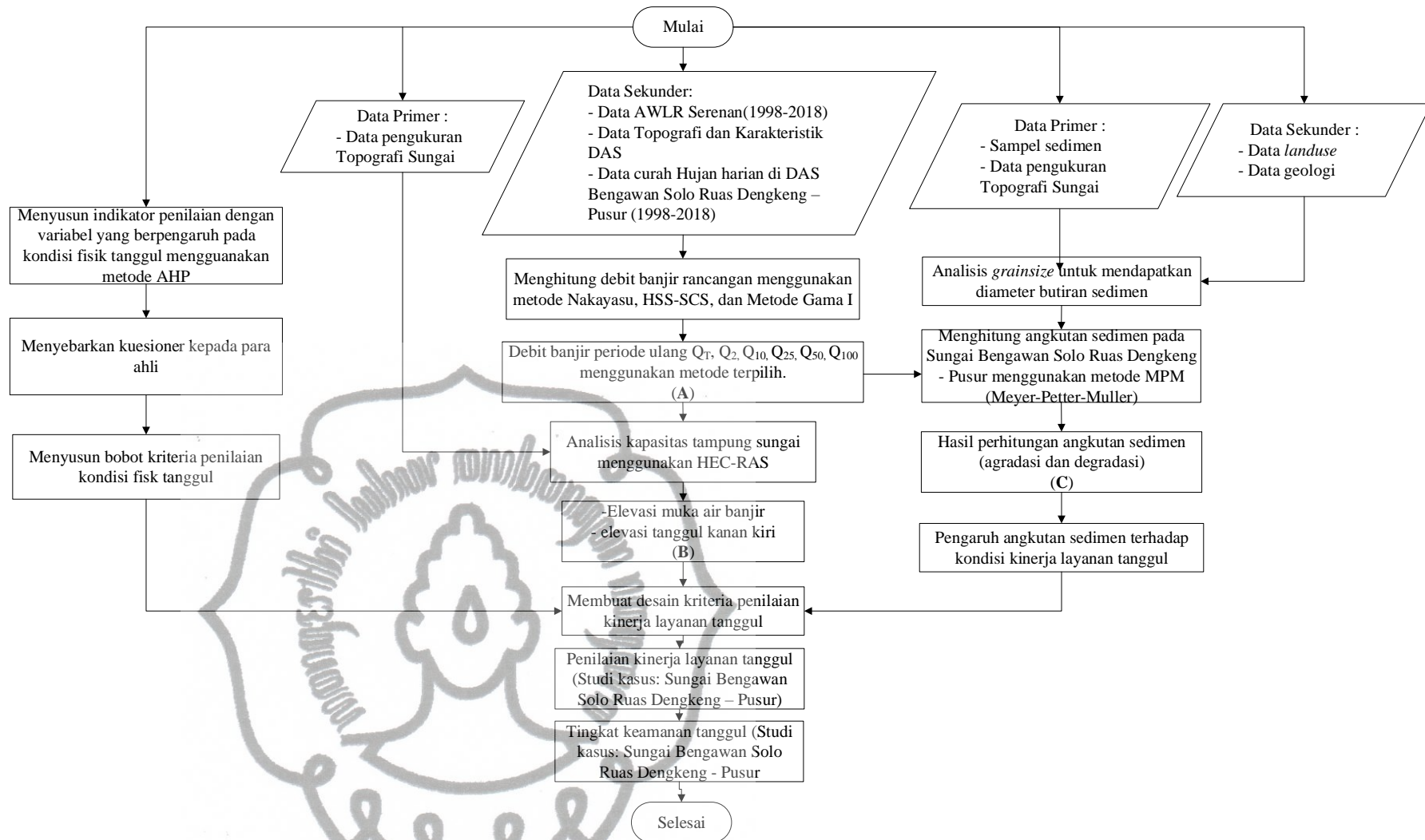
Kekurangan proses analitik hirarki (AHP) adalah sebagai berikut:

- a. Membutuhkan partisipasi pihak yang benar-benar mengetahui permasalahan yang real yang ada, khususnya dalam membangun hierarki permasalahan.
- b. Jika dalam pengambilan masalah multipartisipan terdapat perbedaan yang sangat ekstrim (dapat dilihat dari hasil analisa konsistensi), maka AHP tidak dapat langsung diterapkan dan perlu dilakukan suatu usaha untuk menyatukan pendapat/masalah.
- c. AHP tidak dapat ditinjau dari segi statistik murni atau distribusi peluang karena pengambilan sampel tidak acak dan dapat dilakukan secara partisipan tunggal maupun multipartisipan (Saaty, 1990).

### 2.3 Kerangka Berpikir Penelitian

Berdasarkan tinjauan pustaka dan landasan teori di atas maka langkah-langkah untuk pengembangan model prediksi keamanan tanggul berdasarkan kinerja layanan tanggul dapat dilihat pada Gambar 2.6. Tingkat keamanan tanggul diasumsikan linear dengan kinerja layanan tanggul, yaitu semakin baik kinerja layanan tanggul maka semakin tinggi tingkat keamanan tanggul dan sebaliknya. Kinerja layanan tanggul merupakan fungsi dari kondisi tanggul, sedimentasi dan kapasitas tampung sungai. Penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil analisa data primer dan sekunder serta menguji sistem penilaian dengan melakukan implementasi penilaian keamanan tanggul di Sungai Bengawan Solo ruas Dengkeng-Pusur.





Gambar 2.5 Bagan Alir Penelitian