

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pembilasan sedimen pada kanal-banjir (*floodway*) maupun bendung gerak yang berlokasi di muara sungai atau dekat dengan tepi pantai telah cukup banyak dilakukan. Tiga di antaranya adalah oleh Ji et al. (2011), Muntolib (2006), dan Isnugroho (2008). Dengan menggunakan model numerik, Ji et al. (2011) menganalisa pembilasan sedimen pada bendung gerak/karet yang berada di muara Sungai Nakdong, Korea Selatan, pada saat air laut pada kondisi surut minimum. Pada penelitian tersebut Ji et al. (2011) tidak menggunakan saluran pembilas.

Muntolib (2006) mensimulasikan bukaan pintu pengendali banjir pada kanal-banjir Dombo, Sayung, Jawa Tengah, pada 4 kondisi. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa pintu pengendali banjir pada kanal-banjir tersebut tidak efektif untuk membilas sedimen. Pada penelitian tersebut Muntolib (2006) tidak menggunakan saluran pembilas dan tidak memperhitungkan pengaruh pasang surut air laut. Dengan menggunakan model hidraulik, Isnugroho (2008) menganalisa pembilasan sedimen di bendung gerak/karet Bojonegoro, Jawa Timur. Pada penelitian tersebut Isnugroho (2008) tidak menggunakan saluran pembilas dan tidak memperhitungkan pengaruh pasang surut air laut.

Hingga saat ini, belum ada penelitian mengenai pembilasan sedimen pada kanal-banjir yang menggunakan bendung gerak/karet, yang berlokasi di pantai utara Pulau Jawa, yang menggunakan saluran pembilas, dan yang memperhitungkan pengaruh pasang surut air laut. Untuk mengisi kesenjangan tersebut maka perlu dilakukan penelitian tentang sistem pembilas sedimen yang efektif pada bendung gerak di kanal-banjir.

#### 2.2 Kanal-banjir

Salah satu alternatif untuk mengurangi beban banjir di pusat kota adalah dengan menerapkan sistem kanal-banjir. Hal ini sangat efektif guna mengurai permasalahan banjir di perkotaan. Pada umumnya untuk meningkatkan kapasitas alur di pusat kota sangat sulit untuk direalisasikan karena terbentur berbagai kendala sosial. Seiring dengan perluasan daerah permukiman yang disebabkan oleh cepatnya pertumbuhan

penduduk perkotaan, dan kurangnya kesadaran masyarakat untuk menjaga kebersihan sungai, maka sungai-sungai yang melewati pusat kota, akan semakin sempit dan tidak mampu lagi menampung beban debit yang harus disalurkan.

Normalisasi sungai yaitu suatu proses teknik untuk meningkatkan kapasitas sungai dengan membuat sungai menjadi lebih dalam dan atau lebih lebar (Hilhorst, 2013), bukan lagi menjadi cara yang tepat untuk menanggulangi banjir di daerah perkotaan. Dampak sosialnya sangat kompleks dan rumit, karena menyangkut pembebasan lahan dan pemindahan penduduk. Dalam kondisi yang demikian, normalisasi sungai hanya dapat dilaksanakan untuk mengatasi banjir lokal, sementara banjir kiriman dari hulu harus dialihkan ke luar atau pinggiran kota melalui saluran yang disebut kanal banjir (Suripin, 2004).

Berbagai keuntungan dapat diperoleh dari konsep kanal-banjir karena dapat direncanakan lebih leluasa dengan kapasitas yang lebih besar dan dapat berfungsi sebagai saluran bebas hambatan. Hal tersebut disebabkan oleh:

- 1) Alur terletak di luar atau pinggiran kota, sehingga masih banyak lahan kosong dan kemungkinan tidak perlu memindahkan penduduk.
- 2) Merupakan saluran baru di luar kota, kapasitasnya besar, sehingga dapat melayani drainase kawasan yang luas.
- 3) Jauh dari lokasi pusat kota, permukiman dan industri, sehingga sedikit limbah yang masuk sungai.
- 4) Pemeliharaan sungai lebih murah dan mudah dilakukan karena tersedia lahan dan jalan inspeksi yang cukup.

Kanal-banjir biasanya dibangun sebagai saluran yang memotong sungai, agar air yang berasal dari daerah hulu sungai segera dialirkan ke laut. Dengan demikian sistem drainase yang ada di dalam kota hanya mengalirkan air dan banjir lokal saja. Sedangkan air dan banjir yang berasal dari hulu sungai dapat langsung dialirkan ke laut melalui kanal-banjir. Selain dapat digunakan sebagai salah satu alternatif pengaliran air, kanal-banjir juga dapat digunakan sebagai tempat penampungan air (*long storage*) untuk menampung air bagi kebutuhan pertanian, perikanan maupun kebutuhan air minum di suatu wilayah.

### **2.3 Sedimentasi**

Menurut Arsyad (1989), tanah dan bagian-bagian tanah yang terangkut dari suatu

tempat yang tererosi secara umum disebut sedimen. Sebagian saja dari sedimen yang akan sampai dan masuk ke dalam sungai dan terbawa ke muara sungai. Besarnya sedimen yang masuk ke dalam sungai dipengaruhi beberapa faktor seperti:

- 1) Luas Daerah Aliran Sungai (DAS).
- 2) Vegetasi Penutup Lahan.
- 3) Keadaan Geologi Dan Topografi DAS.

Sedimen yang dihasilkan oleh proses erosi dan terbawa oleh suatu aliran akan diendapkan pada suatu tempat yang kecepatan airnya melambat atau berhenti. Proses inilah yang disebut sedimentasi atau pengendapan, yaitu suatu proses yang mengakibatkan terbentuknya dataran-dataran alluvial pada banyak tempat.

### **2.3.1 Karakteristik Sedimentasi**

Sedimentasi dapat dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu:

- 1) Sedimentasi Fluvial.
- 2) Sedimentasi Eolis.
- 3) Sedimentasi Marin.

Sedimentasi Fluvial adalah proses pengendapan materi-materi yang diangkut oleh air di sepanjang aliran sungai. Bentuk lahan hasil sedimentasi fluvial adalah delta dan bantaran sungai. Delta adalah endapan pasir, lumpur dan kerikil yang terdapat di muaramuara sungai, sedangkan bantaran sungai adalah daratan yang terdapat di tengah-tengah badan sungai atau pada kelokan sungai sebagai hasil endapan. Sedimentasi Eolis biasanya dijumpai di daerah gurun dan di daerah sepanjang pantai, sedangkan Sedimentasi Marin adalah proses pengendapan yang dilakukan oleh gelombang laut di sepanjang pantai (Tu, 1996).

Sedimentasi dapat juga ditinjau dari mekanisme pergerakan angkutan sedimen. Dari mekanisme pergerakannya sedimentasi dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) bagian, yaitu: muatan layang, dan muatan dasar. Disebut Muatan Layang (*Suspended Load*) apabila partikelnya bergeser melayang di dalam air yang terbawa aliran, dan disebut Muatan Dasar (*Bed Load*) apabila partikel-partikelnya di dalam saluran bergerak dengan cara menggelinding, bergeser dan berloncatan (Yang, 1996).

### **2.3.2 Pergerakan Sedimen**

Total jumlah erosi yang terjadi pada DAS dikenal sebagai *Gross Erosion*. Akan tetapi tidak semua material yang tererosi dari DAS dibawa ke dalam sungai, tergantung dari

kekuatan pengangkutan atau aliran permukaan. Jumlah total material tererosi yang mampu menyelesaikan perjalanan sampai ke hilir sungai dikenal sebagai *Sediment Yield*. Sedangkan hasil bagi dari *Sediment Yield* dengan luas DAS disebut *Sediment Production Rate*, yang dinyatakan dengan ton/hektar/tahun (Alam, 2004).

Konsep lain yang banyak digunakan dikenal dengan *Sediment Delivery Ratio (SDR)*, yaitu merupakan perbandingan antara *Sediment Yield* dengan *Gross Erosion*. Nilai SDR ini dipengaruhi oleh luas Daerah Aliran Sungai (DAS), topografi DAS dan kerapatan drainasinya, relief dan kemiringan DAS serta pengaruh curah hujan dan limpasan yang terjadi (Gosschalk, 2002). Sedangkan Arsyad (1989) mengatakan bahwa tanah dan bagian-bagian tanah yang terangkut dari suatu tempat yang tererosi secara umum disebut sedimen. Nisbah jumlah sedimen yang betul-betul terbawa oleh sungai dari suatu daerah terhadap jumlah tanah yang tererosi dari daerah tersebut adalah Nisbah Pelepasan Sedimen (NPS) atau *Sediment Delivery Ratio (SDR)*. Hubungan antara luas DAS dengan *Sediment Delivery Ratio (SDR)* adalah, semakin besar luas DAS maka akan semakin kecil nilai SDR.

#### **2.4 Transportasi Sedimen**

Banyak penelitian telah dilakukan untuk menganalisis transportasi sedimen di sungai, dan banyak pula rumus yang telah dihasilkan oleh penelitian-penelitian tersebut (Habibi, 1994). Beberapa di antaranya adalah Meyer-Peter and Muller (1948), Einstein (1950), Colby (1964), Bagnold (1966), Engelund and Hansen (1967), Toffaleti (1969), Ackers and White (1973, 1993), Yang (1973, 1984), Rijn (1984a, 1984b), Wiuff (1985), Samaga et al. (1986a, 1986b), dan Celik and Rodi (1991).

Rumus transportasi sedimen digunakan oleh para peneliti dan para insinyur untuk menghitung tingkat atau kelajuan sedimentasi alami pada suatu sungai, kanal, bendung, dan waduk. Rumus tersebut ada yang hanya untuk menghitung sedimen dasar (*bed load*) atau sedimen layang (*suspended load*), tetapi ada juga yang untuk menghitung kedua-duanya (*total load*). Beberapa rumus transportasi sedimen untuk menghitung *bed load* adalah rumus hasil penelitian Meyer-Peter Muller (1948), Einstein (1950), Bagnold (1966), Toffaleti (1969), Rijn (1984), dan Samaga et al. (1986a).

#### **2.5 Penanganan Sedimen Kanal-banjir**

Usaha yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan sedimentasi di dalam

saluran kanal-banjir adalah dengan melakukan pengerukan atau penggalian sedimen secara manual (*dredging*) dan melakukan pembilasan sedimen secara hidraulik (*hydraulic flushing*). Atkinson (1996) menjelaskan bahwa pembilasan sedimen secara hidraulik (*hydraulic flushing*) adalah cara yang lebih murah dari pada penggalian atau pengerukan secara manual (*dredging*).

Basson and Rooseboom (1966) dan Tomasi (1996) menjelaskan bahwa ada 3 jenis pembilasan hidraulik, yaitu:

- 1) Pengoperasian pintu air (*sluicing operation*).
- 2) Pengoperasian pembuangan aliran lumpur (*venting of density current*).
- 3) Pengoperasian pembilasan (*flushing operation*).

Pengoperasian pintu air (*sluicing operation*) dilakukan untuk mengendalikan sedimen yang masuk supaya tidak segera mengendap. *Sluicing* dilakukan di saat banjir dan ditutup setelah banjir selesai.

Pengoperasian pembuangan aliran lumpur (*venting of density current*) dilakukan untuk mengendalikan muatan sedimen agar tidak mengendap dan dilepas atau dikeluarkan menerus dengan pintu bawah bendung, tanpa menurunkan muka air di hulu bendung. Sedangkan pengoperasian pembilasan (*flushing operation*) adalah pembilasan sedimen yang bertujuan untuk menggerus sedimen yang sudah mengendap di bagian hulu bendung dan biasanya memiliki butiran yang lebih besar (*coarse material*), sehingga muatan sedimen yang telah tergerus akan terbawa ke hilir oleh aliran air dan keluar melalui pintu pembilas. Teknik pengoperasian pembilasan sedimen ini diterapkan dengan meningkatkan kecepatan aliran air pada pintu pembuangan, sehingga kecepatan aliran air menjadi lebih besar dan cukup untuk menggerus atau membilas sedimen yang telah terakumulasi melalui sistem pintu pembuangan tersebut, misalnya pada *bottom outlet system* (Tomasi, 1996; White, 1990).

### **2.5.1 Pembilasan Sedimen dengan *Flushing***

Pembilasan sedimen dengan *flushing* adalah mengeluarkan sedimen dengan mengambil manfaat energi hidraulik akibat beda tinggi antara muka air di depan dan belakang bendung atau bendungan. Secara umum *flushing* dapat diklasifikasikan ke dalam 2 kategori yaitu *Empty or Free-flow Flushing* dan *Flushing With Partial Drawdown* (Fan and Jiang, 1980; Morris and Fan, 1998).

*Empty or free-flow flushing* adalah *flushing* yang dilaksanakan dengan cara

mengosongkan air waduk, sedangkan aliran air sungai tetap dipertahankan masuk ke dalam waduk, untuk selanjutnya digunakan sebagai pembilas sedimen agar keluar waduk melalui *bottom outlet*. Waktu pelaksanaannya ada 2 cara (Morris and Fan, 1998), yaitu:

- 1) *Empty Flushing During Flood Season*.
- 2) *Empty Flushing During Non Flood Season*.

Cara yang pertama dilaksanakan pada saat musim hujan atau musim basah, sedangkan cara yang ke-2 dilaksanakan pada saat musim kemarau atau musim kering.

*Flushing With Partial Drawdown* adalah pembilas sedimen dengan cara elevasi air waduk dipertahankan dalam keadaan tinggi, endapan sedimen diarahkan keluar waduk melalui *bottom outlet*. Dalam pelaksanaannya ada 2 macam cara (Morris and Fan, 1998), yaitu :

- 1) *Pressure Flushing*.
- 2) *Flushing With High-Level Outlet*.

Cara pertama dilaksanakan dengan cara elevasi air waduk diturunkan ke elevasi paling rendah yang diijinkan (*Minimum Operation Level*), sedangkan cara ke-dua dilaksanakan dengan membuat *Underwater Dike* di waduk untuk menaikkan endapan sedimen ke *High Level Bypass Channel* yang elevasinya lebih tinggi dari elevasi *intake*.

Efektif tidaknya hasil pembilasan sedimen (*flushing*) dipengaruhi oleh berbagai faktor. Faktor-faktor tersebut adalah (White, 2001):

- 1) Dimensi dari *flushing outlet*.
- 2) Posisi dari *flushing outlet*.
- 3) Distribusi dan kepadatan sedimen.
- 4) Ketersediaan air untuk pembilasan sedimen.
- 5) Frekuensi pembilasan sedimen.
- 6) Kondisi *cathment area*.

### **2.5.2 Pembilasan Sedimen dengan *Drawdown Culvert***

Pada pembilasan sedimen dengan *drawdown culvert* (gorong-gorong penguras sedimen), perencanaan posisi dan dimensi *bottom outlet* gorong-gorong di dasar waduk, sangat menentukan efektifitas sistem pembilasan. Selain itu, ketinggian air waduk akan berpengaruh kepada kecepatan air pembilas sedimen dan banyaknya butiran-butiran sedimen yang keluar dari dalam waduk (Morris and Fan, 1998).

### 2.5.3 Rumus Pembilasan Sedimen Beberapa Penelitian Terdahulu

Penelitian Guo et al. (2004) bertujuan untuk mengetahui pengaruh tinggi muka air di bagian hulu pintu pembilas terhadap berat sedimen yang terbilas. Penelitian tersebut menaik-turunkan tinggi muka air di bagian hulu pintu pembilas dengan cara menambah-kurangkan debit air. Hasil dari penelitian tersebut adalah semakin tinggi muka air di bagian hulu pintu pembilas, semakin besar berat sedimen yang terbilas.

Dengan menggunakan metode numerik, Ji et al. (2011) menganalisa prosedur pengoperasian bendung karet yang tepat untuk membilas sedimen sebagai pengganti metode pengerukkan. Obyek penelitian tersebut adalah bendung karet yang berada di muara Sungai Nakdong, Korea Selatan. Hasil dari penelitian tersebut adalah dengan menggunakan prosedur yang disarankan oleh Ji et al. (2011) volume sedimen tahunan yang harus dikeruk dapat dikurangi hingga 54%.

Penelitian Atmojo and Suripin (2012) yang bertujuan untuk menentukan kedalaman air yang efektif untuk membilas sedimen pada suatu bendungan menemukan bahwa kedalaman air yang efektif untuk membilas sedimen merupakan fungsi dari ketebalan sedimen tersebut (lihat Persamaan 2.1). Penelitian tersebut juga menemukan bahwa konsentrasi sedimen yang terbilas berbanding lurus terhadap kedalaman air, ketebalan sedimen, dan kecepatan aliran, tetapi berbanding terbalik terhadap debit pembilasan, seperti dapat dilihat pada Persamaan 2.2.

$$H_{ef} = 10,58 H_s^{-0,12} \quad (2.1)$$

dimana:

$H_{ef}$  = kedalaman air efektif (m)

$H_s$  = ketebalan sedimen (m)

$$C_{mo} = \frac{H_w^{2,134} H_s^{0,983} v^{3,525}}{Q_w^{3,515}} \quad (2.2)$$

dimana:

$C_{mo}$  = konsentrasi sedimen (mg/l)

$Q_w$  = debit pembilasan ( $m^3/s$ )

$H_s$  = ketebalan sedimen (m)

$v$  = kecepatan aliran (m/s)

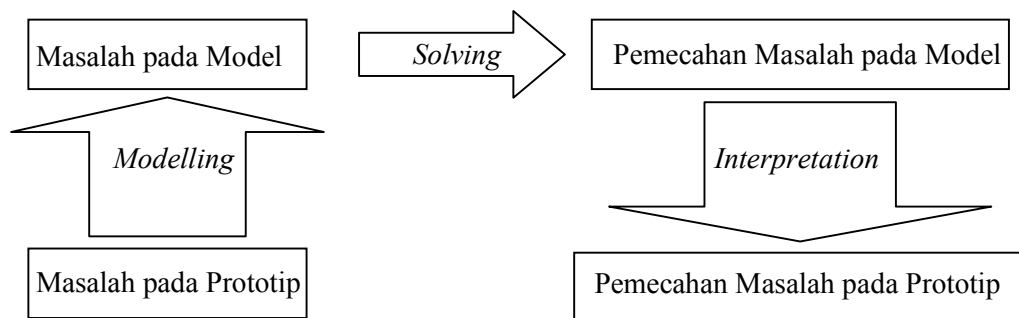
$H_w$  = kedalaman air (m)

## 2.6 Uji Model Hidraulik Fisik

Analisis proses pembilasan sedimen sangat kompleks, karena menyangkut arah aliran tiga dimensi. Permasalahan terutama pada verifikasi beberapa parameter terkait dengan karakter stokastik air dan data sedimen (Scheuerlein, 1993). Untuk menghindari kesulitan dan mendapatkan hasil yang memuaskan, maka penelitian pembilasan sedimen sering dilakukan dengan analisis Uji Model Hidraulik Fisik (Model Test) (Vries, 1997; Wurb, 1996; Yuwono, 1999).

Pembuatan model hidraulik fisik (*model test*) dimaksudkan untuk menirukan bentuk bangunan hidraulik berdasarkan data dan skala yang ditentukan guna menunjang perencanaan bangunan hidraulik. Model fisik dibuat di laboratorium dan dibuat dalam bentuk yang lebih kecil dari keadaan sebenarnya (prototipe) dengan asumsi bahwa terdapat kesamaan antara model dengan keadaan sebenarnya (prototipe). Model fisik sungai dapat dibuat dengan dasar tetap (*fixed bed model*) atau model dengan dasar bergerak (*movable bed model*) dan media yang digunakan dalam uji model biasanya adalah air (Vries, 1997; Wurb, 1996; Yuwono, 1999).

Tujuan pemodelan hidraulik adalah untuk memecahkan persoalan yang ada di prototipe dengan menginterpretasikan pemecahan hasil di modelnya. Ilustrasi proses pemecahan masalah dengan model adalah sebagai berikut (Vries, 1977):



Gambar 2.1. Ilustrasi Penyelesaian Masalah dengan Model Fisik (Vries, 1977)

Pada proses *modeling* diperlukan pengetahuan tentang fenomena yang akan terlibat dalam permasalahan. Agar pada proses “*modeling*” terdapat kesamaan yang tinggi maka perlu adanya kalibrasi dan verifikasi. Kalibrasi adalah pengaturan model agar supaya data yang ada di prototipe sesuai dengan yang ada di model, sedangkan verifikasi adalah pembuktian bahwa model sudah sesuai dengan yang ada di prototipe tanpa harus lagi merubah atau mengatur model lagi.



“*Solving*” adalah pemecahan masalah yang ada di model. Pada proses “*solving*” diperlukan kemampuan teknik pemecahan masalah. “*Interpretation*” adalah analisis dan penterjemahan pemecahan masalah di model untuk dibawa ke penyelesaian yang berlaku di prototipe. Pada proses “*interpretation*” ini diperlukan kemampuan penguasaan dasar ilmu pengetahuan serta pengalaman yang cukup banyak terhadap permasalahan tersebut (Vries, 1977).

Model fisik yang dibuat harus memiliki kesamaan atau kesesuaian dengan prototipe. Untuk mencapai hal tersebut maka model fisik harus sebangun secara geometris, kinematis, dan dinamis terhadap prototipe.

### 2.6.1 Skala Besaran

Skala dari besaran-besaran ditentukan dari perbandingan antara besaran di lapangan dan besaran di model, yaitu parameter  $n$  seperti dapat dilihat pada Persamaan 2.3 (Subramanya, 2011).

$$n = \frac{\text{besaran di prototip}}{\text{besaran di model}} \quad (2.3)$$

Model hidraulik tidak distorsi (“*undistorted model*”) adalah model hidraulik yang mempunyai skala panjang horisontal ( $n_L$ ) dan vertikal ( $n_h$ ) sama. Skala parameter aliran ditentukan berdasarkan skala geometrik,  $n_L = n_h$ . Model hidraulik distorsi (“*distorted model*”) adalah model hidraulik yang mempunyai skala horisontal dan vertikal berbeda,  $n_L \neq n_h$ . Adapun koefisien distorsi ( $r$ ) dapat dilihat pada Persamaan 2.4, Persamaan 2.4a, dan Persamaan 2.4b berikut (Subramanya, 2011):

$$r = \frac{n_L}{n_h} \quad (2.4)$$

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.4a)$$

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} \quad (2.4b)$$

dimana:

$r$  = koefisien distorsi

$n_L$  = skala panjang horisontal

$n_h$  = skala panjang vertikal

$L_p$  = panjang horisontal di prototipe

$L_m$  = panjang horisontal di model

$h_p$  = panjang vertikal di prototipe

$h_m$  = panjang vertikal di model

Pada umumnya model hidraulik distorsi digunakan pada dimensi prototipe cukup besar seperti pada sungai, pantai dan sebagainya. Mengingat sifat pengaliran adalah dengan muka air bebas, percepatan gravitasi bumi adalah parameter yang dominan, sehingga persyaratan yang harus dipenuhi adalah sifat sebangun dinamik antara model dan prototipe. Dalam hal ini bilangan *Froude* ( $Fr$ ) di model harus sama dengan di prototipe seperti dapat dilihat pada Persamaan 2.5 (Tokaty, 2013), dengan perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Persamaan 2.5a, Persamaan 2.5b, dan Persamaan 2.5c.

$$Fr_{\text{prototipe}} = Fr_{\text{model}} \quad (2.5)$$

$$\left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)_{\text{prototip}} = \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)_{\text{model}} \quad (2.5a)$$

$$\frac{v_p}{v_m} = \left(\frac{h_p}{h_m}\right)^{1/2} \quad (2.5b)$$

$$n_v = n_h^{1/2} \quad (2.5c)$$

Keterangan notasi :

$Fr_{\text{prototipe}}$  = bilangan *Froude* di prototipe

$Fr_{\text{model}}$  = bilangan *Froude* di model

$g$  = percepatan gravitasi bumi ( $\text{m/s}^2$ )

$h_p$  = kedalaman aliran di prototipe (m)

$h_m$  = kedalaman aliran di model (m)

$n_h$  = skala tinggi

$n_v$  = skala kecepatan aliran

$v_p$  = kecepatan aliran di prototipe (m/s)

$v_m$  = kecepatan aliran di model (m/s)

Agar diperoleh bentuk dan arah pengaliran yang sebangun antara model dengan prototipe, haruslah dipenuhi syarat kekasaran, seperti dapat dilihat pada Persamaan 2.6 (Bloomer, 1999).

$$\text{Koefisien Manning } (n) = \frac{n_p}{n_m} \quad (2.6)$$

dimana:

$n_p$  = Angka kekasaran di prototipe

$n_m$  = Angka kekasaran di model

Notasi dan skala besaran yang sering digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada Tabel 2.1. Penurunan formula skala besaran berdasarkan bilangan *Froude* dapat dilihat pada Lampiran 1.

### 2.6.2 Kesebangunan

Ada 3 tipe kesebangunan yang harus dikembangkan untuk mencapai kesebangunan yang lengkap antara model dan prototipe (Mohanty, 2006), yaitu:

- 1) Kesebangunan geometris.
- 2) Kesebangunan kinematis.
- 3) Kesebangunan dinamis.

#### 2.6.2.1 Kesebangunan Geometris

Kesebangunan geometris antara model dan prototipe terbentuk jika rasio dimensi panjang yang bersesuaian antara model dan prototipe adalah sama (Mohanty, 2006). Salah satunya adalah skala panjang ( $n_L$ ) seperti dilihat pada Persamaan 2.7. Karakteristik simbol geometris yang digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.7)$$

dimana:

$n_L$  = skala panjang horisontal

$L_p$  = panjang horisontal di prototipe

$L_m$  = panjang horisontal di model

#### 2.6.2.2 Kesebangunan Kinematis

Kesebangunan kinematis antara model dan prototipe tercapai apabila (Mohanty, 2006):

- 1) Lintasan gerakan partikel yang homolog sebangun secara geometris.
- 2) Rasio kecepatan dan percepatan partikel yang homolog adalah sama.

Karena kecepatan dan percepatan mempunyai besaran dan arah, maka keserupaan kinematik menggambarkan bahwa kecepatan dan percepatan pada titik yang bersesuaian adalah paralel dan rasio besarnya sama pada semua pasangan titik yang bersesuaian.

Tabel 2.1. Skala Besaran (Puslitbang Pengairan, 1986)

NO.	BESARAN	NOTASI	SKALA BESARAN
1.	Besaran geometris: Panjang, lebar, dalam, tinggi	L h	$n_L$ $n_h$
2.	Kecepatan aliran	v	$n_v = n_h^{1/2}$
3.	Waktu aliran	t	$n_t = n_h^{1/2}$
4.	Debit air	Q	$n_Q = n_h^{5/2}$
5.	Diameter butir sedimen	$d_s$	$n_d = \frac{d_{sp}}{d_{sm}}$
6.	Koefisien Manning	n	$n_n = (n_h)^{1/6}$
7.	Volume	V	$n_v = n_h^3$
8.	Percepatan gravitasi	g	$n_g = 1$
9.	Kerapatan massa sedimen	$\rho_s$	$n_\rho = \frac{\rho_{sp}}{\rho_{sm}}$
10.	Berat sedimen	$W_s$	$n_w = n_v \cdot n_\rho$

Catatan: bila  $n_L = n_h$  maka disebut model tanpa distorsi (*undistorted model*).

Tabel 2.2. Karakteristik Simbol Geometris (Puslitbang Pengairan, 1986)

KARAKTERISTIK	SIMBOL	SATUAN	DIMENSI (MKS)
Panjang, Lebar	L, B	m	L
Tinggi, Kedalaman	h, d	m	L
Luas	A	m <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>
Volume, Isi	V	m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>

Pada Persamaan 2.8 dapat dilihat skala kecepatan ( $n_v$ ) yang merupakan salah satu dari kesebangunan kinematis. Karakteristik simbol kinematis yang digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

$$n_v = \frac{v_p}{v_m} \quad (2.8)$$

dimana:

$n_v$  = skala kecepatan

$v_p$  = kecepatan di prototipe

$v_m$  = kecepatan di model

Tabel 2.3. Karakteristik Simbol Kinematis (Puslitbang Pengairan, 1986)

KARAKTERISTIK	SIMBOL	SATUAN	DIMENSI (MKS)
Waktu	t	s	T
Frekuensi	F	s <sup>-1</sup>	T <sup>-1</sup>
Kecepatan	v	m/s	LT <sup>-1</sup>
Percepatan	a	m/s <sup>2</sup>	LT <sup>-2</sup>
Gravitasi	g	m/s <sup>2</sup>	LT <sup>-2</sup>
Debit	Q	m <sup>3</sup> /s	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>

### 2.6.2.3 Kesebangunan Dinamis

Kesebangunan dinamis antara model dan prototipe yang sebangun secara geometris dan kinematis tercapai apabila semua gaya-gaya yang bekerja pada titik-titik yang homolog pada kedua sistem adalah sama (Mohanty, 2006). Gaya-gaya yang bekerja pada aliran fluida meliputi satu, atau kombinasi dari beberapa gaya-gaya berikut:

- 1) Gaya inersia.
- 2) Gaya gesek dan viskositas.
- 3) Gaya gravitasi.
- 4) Gaya tekan.
- 5) Gaya elastisitas.
- 6) Gaya tegangan permukaan.

Karakteristik simbol dinamis dapat dilihat pada Tabel 2.4.

### 2.6.3 Faktor yang Mempengaruhi Sedimentasi Kanal-banjir

Sedimen yang masuk atau mengendap dalam suatu aliran dipengaruhi oleh dua grup variabel, yang pertama adalah yang mempengaruhi kuantitas dan kualitas sedimen yang masuk ke aliran tersebut, sedangkan yang kedua adalah variabel yang mempengaruhi kapasitas angkut sedimen dari aliran tersebut (Simons and Senturk, 1992). Kualitas meliputi: ukuran, kecepatan endap, *specific gravity*, bentuk, kondisi penyebaran, dan kohesi. Kuantitas meliputi: kondisi geologi dan topografi dari daerah aliran sungai, besar, intensitas, lama dan penyebaran hujan, kondisi tanah, tumbuhan erosi permukaan, dan pemotongan tebing.

Kapasitas suatu aliran untuk mengangkut sedimen dipengaruhi oleh sifat-sifat geometri saluran: kedalaman, lebar, bentuk dan lengkungan. Sifat-sifat hidraulis saluran pengangkut: kemiringan, kekasaran, radius hidraulis, debit, kecepatan, distribusi

kecepatan, turbulensi, gaya seret, sifat-sifat fluida, dan keseragaman debit. Menurut Chanson (1998), pengendapan sedimen dipengaruhi oleh turbulensi. Aliran yang laminar mendorong pengendapan terjadi lebih cepat karena jarak yang dibutuhkan partikel padat untuk mengendap lebih pendek.

Tabel 2.4. Karakteristik Simbol Dinamis (Puslitbang Pengairan, 1986)

KARAKTERISTIK	SIMBOL	SATUAN	DIMENSI (MKS)
Massa	M	kg	M
Impulse	Fi	kg.m/s	MLT <sup>-1</sup>
Viskositas dinamis	$\mu$	kg/m.s	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>
Rapat massa kinematis	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
Gaya	F	N = kg.m/s <sup>2</sup>	MLT <sup>-2</sup>
Kerja	W	Nm	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
Momen	M	Nm	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
Energi	E	Nm	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
Tegangan permukaan	$\Sigma$	N/m	MT <sup>-2</sup>
Tekanan	P	N/m <sup>2</sup>	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
Berat spesifik	$\Gamma$	N/m <sup>3</sup>	ML <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup>
Tenaga	P	Nm/jam	ML <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>

Pengendapan partikel dapat dihalangi oleh angin yang bertiup di permukaan karena angin dapat menimbulkan gelombang dan menyebabkan turbulensi. Selain itu, pengendapan sedimen ini juga dipengaruhi oleh kecepatan endap partikel (Puslitbang Pengairan, 1986). Selanjutnya, beberapa faktor yang mempengaruhi sedimentasi di dalam saluran dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Dari rumus-rumus empiris yang ada dalam hidraulika, secara khusus mengenai *bedload*, parameter-parameter yang selalu ada dan dominan adalah debit air (Q), kecepatan aliran (v), berat sedimen terbilas ( $W_s$ ), dan diameter sedimen ( $d_s$ ) (Bathrust, 1987; Einstein, 1950; Gomez dan Church, 1989; Graf, 1984; Inpasihardjo, 1992). Parameter-parameter inilah yang menjadi parameter yang berpengaruh dalam analisis dimensi.

#### 2.6.4 Analisis Dimensi

Analisis dimensi adalah teknik matematik yang digunakan sebagai alat bantu dalam menyelesaikan beberapa permasalahan teknik (Chadwick et al., 1994). Setiap fenomena fisik dapat dinyatakan dalam persamaan, yang tersusun dari variabel-variabel baik berdimensi maupun tak berdimensi. Analisis dimensi membantu menentukan susunan

secara sistematis variabel-variabel dalam hubungan fisik dan kombinasi variabel berdimensi menjadi parameter tak berdimensi.

Tabel 2.5. Beberapa Faktor yang Mempengaruhi Sedimentasi (Puslitbang Pengairan, 1986)

NO.	PARAMETER	UKURAN	SIMBOL	KET.
1.	<i>Floodway</i> (kanal-banjir)	Panjang Lebar Kedalaman Kemiringan Debit air	$L_o$ $B_o$ $H_o$ $S_o$ $Q$	Parameter Parameter Parameter Parameter Parameter
2.	Karakteristik Sedimen	Diameter Rapat massa Volume Berat	$d_s$ $\rho_s$ $V_s$ $W_s$	Parameter Parameter Variabel Variabel
3.	Bangunan Pembilas	Panjang Lebar Kedalaman Kemiringan	$L$ $B$ $h$ $S$	Parameter Variabel Parameter Parameter
4.	Pasang Surut	Tinggi muka air pasang Tinggi muka air rata-rata Tinggi muka air surut	$h_{ht}$ $h_{mt}$ $h_{lt}$	Variabel Variabel Variabel
5.	Gravitasi	Gravitasi	$g$	Parameter

Analisis dimensi menurunkan persamaan yang dinyatakan dalam parameter tak berdimensi untuk memperhatikan signifikansi relatif masing-masing parameter. Pembentukan variabel tak berdimensi mengurangi jumlah variabel yang harus diinvestigasi, baik secara eksperimental, numerikal, atau pengukuran lapangan. Selain itu grafik tak berdimensi memberikan lebih banyak informasi dibandingkan jika dimensi disertakan karena mampu melingkupi rentang variabel yang lebih luas.

Kegunaan analisis dimensi adalah:

- 1) Mengklasifikasi persamaan dan menguji homogenitas dimensi persamaan dan generalitas persamaan.
- 2) Mengkonversi persamaan atau data dari satu sistem satuan ke sistem satuan lainnya.
- 3) Mengembangkan persamaan dalam bentuk proses variabel.
- 4) Menurunkan persamaan yang dinyatakan dalam parameter tak berdimensi untuk memperlihatkan signifikansi relatif masing-masing parameter.
- 5) Perencanaan *model test* dan memproses hasil eksperimen dalam bentuk parameter tak berdimensi yang sistematis.
- 6) Mengembangkan prinsip-prinsip perencanaan model, pengoperasian dan

interpretasi.

Beberapa langkah yang paling penting dalam melakukan analisis dimensi adalah (Chadwick et al., 1994):

- 1) Mengidentifikasi variabel tak bergantung.
- 2) Menentukan variabel bergantungnya.
- 3) Menentukan berapa banyak hasil variabel tak bergantung nondimensional yang dibentuk dari variabel-variabel.
- 4) Mengurangi variabel sistem sampai jumlah variabel tak bergantung nondimensional tepat dan proporsional (tidak mendekati nol atau tak berhingga).

Terdapat 6 dasar pertimbangan dalam pemilihan variabel dalam analisis dimensi. Keenam dasar pertimbangan tersebut adalah (Chadwick et al., 1994):

- 1) Mendefinisikan permasalahan dengan jelas dan tentukan variabel utama yang menjadi perhatian.
- 2) Mempertimbangkan hukum dasar yang mempengaruhi proses fisik walaupun hanya teori kasar yang dapat dirumuskan.
- 3) Membagi variabel menjadi 3 kelompok: geometris, sifat-sifat material, dan pengaruh luar.
- 4) Mempertimbangkan variabel yang tidak termasuk ke dalam 3 kelompok.
- 5) Memasukkan parameter fisik yang konstan, seperti percepatan gravitasi.
- 6) Memastikan bahwa semua variabel adalah tak-bergantung dengan melihat hubungan fungsional antar variabel. Misalnya: berat jenis, percepatan gravitasi dan rapat massa. Hanya dua dari tiga parameter tersebut yang tak-bergantung.

#### **2.6.4.1 Pembentukan Variabel Tak Berdimensi**

Pembentukan variabel tak berdimensi mengurangi jumlah variabel yang harus diinvestigasi, baik secara eksperimental, numerical, atau pengukuran lapangan. Grafik tak berdimensi memberikan lebih banyak informasi dibandingkan jika dimensi disertakan karena mampu melingkupi rentang variabel yang lebih luas dan universal. Titik-titik dalam grafik tak berdimensi dapat diperoleh dari skala model.

Variabel tak berdimensi dapat dipakai sebagai dasar perencanaan skala model dan interpretasi hasil. Hasil eksperimen dengan menggunakan variabel tak berdimensi akan berbentuk padat dan sistematis. Untuk menentukan variabel tak berdimensi ini ada beberapa cara, antara lain (Chadwick et al., 1994):



- 1) *The Buckingham  $\pi$  theorem.*
- 2) *Basic echelon matrix procedure.*
- 3) *Rayleigh's method.*
- 4) *Stepwise procedure.*
- 5) *Langhaar method.*

#### **2.6.4.2 Metode Buckingham $\pi$**

Jika terdapat  $n$  variabel berdimensi dalam suatu fenomena, yang dapat didiskripsikan secara lengkap dengan  $m$  dimensi dasar, dan terkait dengan persamaan berdimensi homogeny, maka hubungan antara  $n$  variabel selalu dapat diekspresikan dalam  $(n-m)$  variabel tak berdimensi dan independen ( $\pi$ ).

Langkah analisis metode *Buckingham  $\pi$*  adalah sebagai berikut (Chadwick et al., 1994):

- 1) Mengidentifikasi semua variabel yang terlibat pada sistem yang dikaji.
- 2) Memilih 3 variabel berulang. Variabel harus berdimensi, tidak ada yang berdimensi sama, kombinasi ketiga variabel berisi ketiga dimensi utama, dan ketiga variabel tersebut tidak membentuk variabel tak berdimensi. Dalam hidraulika biasanya:
  - (1) Karakteristik dimensi linier.
  - (2) Karakteristik kecepatan.
  - (3) Karakteristik rapat massa air.
- 3) Menulis persamaan umum dalam variabel  $\pi$ . Variabel ini merupakan perkalian dari ketiga variabel berulang dengan eksponen tak diketahui dan salah satu variabel sisa.
- 4) Menulis dimensi persamaan untuk persamaan dalam bentuk  $\pi$  yang diperoleh dari langkah 3. Hitung nilai eksponen yang tidak diketahui dengan menyamakan eksponen dari 3 besaran pokok pada kedua belah sisi pada masing-masing persamaan dimensional.
- 5) Menulis hasil akhir persamaan umum fenomena dalam bentuk  $\pi$ .
- 6) Untuk mendapatkan bentuk akhir, diperlukan langkah sebagai berikut:
  - (1) Variabel tak berdimensi, langsung sebagai  $\pi$ .
  - (2) Dua variabel dengan dimensi sama, rasionya sebagai  $\pi$ . Contoh  $(\frac{d}{H})$ .
  - (3) Sembarang  $\pi$  dapat diganti dengan  $\pi$  tersebut pangkat sembarang. Misalnya  $\pi_i$  diganti  $\pi_i^2$  dan lain-lain.
  - (4) Sembarang  $\pi$  dapat diganti dengan mengalikan  $\pi$  tersebut dengan bilangan

numerik sembarang. Misalnya  $\pi_1$  diganti  $3\pi_1$  dan lain-lain.

(5) Sembarang  $\pi$  dapat diganti dengan  $\pi$  lainnya dengan menambahkan atau mengurangi.

(6) Sembarang  $\pi$  dapat diganti dengan mengalikan atau membagi  $\pi$  tersebut dengan  $\pi$  lainnya. Misalnya  $\pi_1$  diganti dengan  $\pi_1 \times \pi_2$  atau  $\pi_1 : \pi_2$ .

### 2.6.4.3 Penyusunan Persamaan Variabel Non-dimensional

Dari rumus-rumus empiris yang ada dalam hidraulika mengenai *bedload*, parameter-parameter yang selalu ada dan dominan adalah debit air (Q), kecepatan aliran (v), berat sedimen terbilas ( $W_s$ ), dan diameter sedimen ( $d_s$ ) (Bathrust, 1987; Einstein, 1950; Gomez and Church, 1989; Graf, 1984; Inpasihardjo, 1992).

Parameter yang berpengaruh pada penelitian ini adalah: H, g,  $\rho_s$ , Q, v,  $W_s$ ,  $d_s$ .

dimana:

H = tinggi muka air (m)

g = gravitasi ( $m/s^2$ )

$\rho_s$  = rapat massa sedimen ( $kg/m^3$ )

Q = debit air ( $m^3/s$ )

v = kecepatan aliran (m/s)

$W_s$  = berat sedimen terbilas (kg)

$d_s$  = diameter sedimen (m)

Masing-masing parameter dipilih berdasar dimensi: M (massa), L (panjang), dan T (waktu), seperti pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Dimensi Parameter

Variabel Dimensi	H	g	$\rho_s$	Q	v	$W_s$	$d_s$
M	0	0	1	0	0	1	0
L	1	1	-3	3	1	0	1
T	0	-2	0	-1	-1	0	0

Parameter yang berulang: H, g, dan  $\rho_s$ .

$$\pi_1 = H^x \cdot g^y \cdot \rho_s^z \cdot Q$$

$$M = 0 + 0 + z + 0 = 0 \quad \leftrightarrow \quad z = 0$$

$$T = 0 - 2y + 0 - 1 = 0 \quad \leftrightarrow \quad -2y - 1 = 0$$

$$2y = -1$$

$$y = -\frac{1}{2}$$

$$L = x + y - 3z + 3 = 0$$

$$= x - \frac{1}{2} - 0 + 3 = 0 \quad \leftrightarrow \quad x + 2,5 = 0$$

$$x = -2,5$$

$$\pi_1 = H^{-2,5} \cdot g^{-\frac{1}{2}} \cdot \rho_s^0 \cdot Q$$

$$\pi_1 = \frac{Q}{H^2 \sqrt{gH}}$$

$$\pi_2 = H^x \cdot g^y \cdot \rho_s^z \cdot v$$

$$M = 0 + 0 + z + 0 = 0 \quad \leftrightarrow \quad z = 0$$

$$T = 0 - 2y + 0 - 1 = 0 \quad \leftrightarrow \quad -2y = 1$$

$$y = -\frac{1}{2}$$

$$L = x + y - 3z + 1 = 0$$

$$= x - \frac{1}{2} - 0 + 1 = 0 \quad \leftrightarrow \quad x + \frac{1}{2} = 0$$

$$x = -\frac{1}{2}$$

$$\pi_2 = H^{-\frac{1}{2}} \cdot g^{-\frac{1}{2}} \cdot \rho_s^0 \cdot v$$

$$\pi_2 = \frac{v}{\sqrt{gH}}$$

$$\pi_3 = H^x \cdot g^y \cdot \rho_s^z \cdot W_s$$

$$M = 0 + 0 + z + 1 = 0 \quad \leftrightarrow \quad z + 1 = 0$$

$$z = -1$$

$$T = 0 - 2y + 0 + 0 = 0 \quad \leftrightarrow \quad -2y = 0$$

$$y = 0$$

$$L = x + y - 3z + 0 = 0$$

$$= x + 0 + 3 + 0 = 0 \quad \leftrightarrow \quad x + 3 = 0$$

$$x = -3$$

$$\pi_3 = H^{-3} \cdot g^0 \cdot \rho_s^{-1} \cdot W_s$$

$$\pi_3 = \frac{W_s}{H^3 \rho_s}$$

$$\pi_4 = H^x \cdot g^y \cdot \rho_s^z \cdot d_s$$

$$M = 0 + 0 + z + 0 = 0 \quad \leftrightarrow \quad z = 0$$

$$T = 0 - 2y + 0 + 0 = 0 \quad \leftrightarrow \quad -2y = 0$$

$$y = 0$$

$$L = x + y - 3z + 1 = 0$$

$$= x + 0 - 0 + 1 = 0 \quad \leftrightarrow \quad x + 1 = 0$$

$$x = -1$$

$$\pi_4 = H^{-1} \cdot g^0 \cdot \rho_s^0 \cdot d_s$$

$$\pi_4 = \frac{d_s}{H}$$

$\pi_1 = \frac{Q}{H^2 \sqrt{gH}}$	$\pi_3 = \frac{W_s}{H^3 \rho_s}$
$\pi_2 = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	$\pi_4 = \frac{d_s}{H}$

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = f\left(\frac{Q}{H^2 \sqrt{gH}}, \frac{v}{\sqrt{gH}}, \frac{W_s}{H^3 \rho_s}, \frac{d_s}{H}\right) = 0$$

Disederhanakan dengan operasi kali atau bagi antar variabel non-dimensional tersebut, kemudian menghilangkan nilai konstanta sehingga rumusnya menjadi lebih sederhana.

$$\pi_5 = \frac{\pi_3}{\pi_4}$$

$$= \frac{W_s}{H^3 \cdot \rho_s} \cdot \frac{H}{d_s}$$

$$\pi_5 = \frac{W_s}{H^2 \rho_s d_s}$$

$$\pi_6 = \pi_1 \cdot \pi_2$$

$$= \frac{Q}{H^2 \sqrt{gH}} \cdot \frac{v}{\sqrt{gH}}$$

$$= \frac{Qv}{H^3 \cdot g}$$

$$\pi_6 = \frac{vQ}{H^3 \cdot g}$$

$$f(\pi_5, \pi_6) = f\left(\frac{W_s}{H^2 \rho_s d_s}, \frac{v Q}{H^3 g}\right) = 0$$

Persamaan variabel non-dimensional yang merupakan hasil analisis dimensi ini dapat dilihat pada Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10:

$$\frac{W_s}{H^2 \rho_s d_s} = f\left(\frac{v Q}{H^3 g}\right) \quad (2.9)$$

$$W_s = H^2 \rho_s d_s f\left(\frac{v Q}{H^3 g}\right) \quad (2.10)$$

## 2.7 Kerangka Berpikir

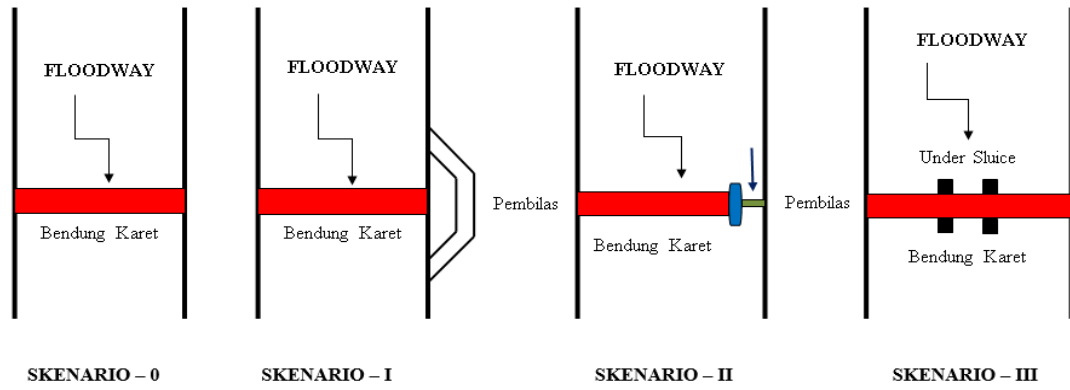
Masalah sedimentasi di suatu kanal-banjir (*floodway*) yang menggunakan bendung karet tidak dapat dipecahkan dengan hanya mengempiskan bendung karetnya, karena masih ada sedimen yang tertinggal atau tidak ikut hanyut. Penelitian ini menduga bahwa dengan membangun saluran pembilas maka sedimen yang tidak ikut hanyut saat bendung karetnya dikempiskan akan dapat ikut terbilas. Penelitian ini menduga bahwa saluran pembilas tipe *overflow*, *bypass*, dan *under sluice* cukup efektif untuk membilas sedimen yang tertinggal pada saat bendung karet dikempiskan. Penelitian ini juga menganalisis bangunan pembilas yang paling efektif dari antara tiga bangunan pembilas tersebut. Gambar 2.2 memperlihatkan skenario penelitian ini.

## 2.8 Kebaruan

Hingga saat penelitian ini dilaksanakan, belum ada persamaan empiris yang dapat digunakan untuk menentukan jenis bangunan pembilas sedimen yang paling tepat untuk diterapkan pada suatu kanal-banjir. Untuk menentukan jenis bangunan yang paling tepat untuk diterapkan pada suatu kanal-banjir, seorang insinyur lazimnya menggunakan metode Uji Model Hidraulik Fisik. Pelaksanaan uji model tersebut relatif mahal dan membutuhkan waktu yang relatif lama. Selain itu hasil dari uji model tersebut tidak dapat langsung digunakan untuk memecahkan masalah yang sama pada kanal-kanal banjir yang lain, yang tentu saja memiliki situasi dan kondisi yang berbeda.

Persamaan-persamaan empiris yang dihasilkan oleh penelitian ini dapat digunakan untuk memecahkan masalah sedimentasi pada kanal-kanal banjir yang lain. Meskipun penelitian ini menggunakan Kanal-banjir Sedayu Lawas sebagai studi kasusnya namun oleh karena menggunakan metode analisis dimensi yang menghasilkan variabel non-dimensional maka dalam batas-batas tertentu persamaan-persamaan

empiris hasil penelitian ini dapat berlaku secara umum.



Gambar 2.2 Skenario Penelitian