

## **APLIKASI SOBEK UNTUK SIMULASI KEGAGALAN TANGGUL LAUT: STUDI KASUS PLUIT-JAKARTA**

### ***SOBEK APLICATION FOR SIMULATING SEA DIKE BREAK: A CASE STUDY AT PLUIT-JAKARTA***

**Yudi Lasmana<sup>1)</sup>, Andojo Wurjanto<sup>2)</sup>, Hadi Kardhana<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup> Pusat Litbang Sumber Daya Air, Bandung

<sup>2,3)</sup> Institut Teknologi Bandung

yudi.lasmana@gmail.com

Diterima: 17 September 2013; Disetujui: 26 November 2013

#### **ABSTRAK**

*Pluit terletak di pantai utara Jakarta, dan secara topografis areanya berada di bawah permukaan air laut. Hal ini menyebabkan Pluit sangat rentan terhadap bencana banjir air pasang besar (ROB), dan kondisi tersebut diperparah dengan fenomena penurunan tanah dan kenaikan muka air laut. Saat ini sistem polder digunakan untuk membuang kelebihan air di Pluit. Luas daerah tangkapan air Pluit 2.083 ha, yang meliputi daerah penting dan sensitif seperti Monas dan Istana Negara. Tujuan dari studi ini adalah membangun kewaspadaan terhadap ancaman banjir ROB di Pluit dan memberikan solusi bagaimana untuk mencegah bencana tersebut. Software SOBEK digunakan untuk melakukan simulasi skenario banjir pasang surut akibat kegagalan tanggul laut. Hasil simulasi skenario kegagalan tanggul laut dengan lebar 100m dan level tanggul yang tersisa pada 0 (nol) m Peil Priok (mPP) maka dalam waktu 5 hari daratan akan satu level dengan laut, yang mencapai titik terjauh di Kel. Kebon Kelapa, Kec. Gambir, Jakarta Pusat (kurang lebih 6,4 km dari laut). Tinggi stasiun pompa harus berada di level +3,069 mPP berdasarkan penurunan tanah 5 tahun dan tinggi jagaan 1m. Tinggi tanggul laut harus didesain berdasarkan layanan 5 tahun di level +2,808 mPP.*

**Kata kunci:** Kenaikan muka air laut, penurunan tanah, ROB, tanggul laut, 0 (nol)m Peil Priok,

#### **ABSTRAK**

*Pluit located in North Coast of Jakarta, and topographically the area is below sea level. It makes Pluit highly prone to ROB hazard, and this condition aggravated by land subsidence and sea level rise. Polder system is used to discharge excess water in Pluit. Pluit catchment area is 2,083ha, consist of valuable assets such as Monas and National Palace. The objective of this study is to build awareness of ROB hazard and give solution how to prevent the hazard. Tidal flooding scenario due to sea dike break simulated using SOBEK software. The result for sea dike break scenario at length 100m and dike level remaining at 0 (zero) m Peil Priok (mPP) showed that the farthest point of flood extent will be achieved within 5 days at Kel. Kebon Kelapa Kec. Gambir Jakarta Pusat (about 6.4 km from sea). Pump station elevation should be placed at +3.069 m PP based on 5 years land subsidence and 1 m freeboard. Sea dike level should be design in line with land subsidence rate, such rate for 5 years will give sea dike level at +2.808 m PP.*

**Keywords:** Sea level rise, land subsidence, ROB, sea dike, 0 (zero)m Peil Priok,

#### **PENDAHULUAN**

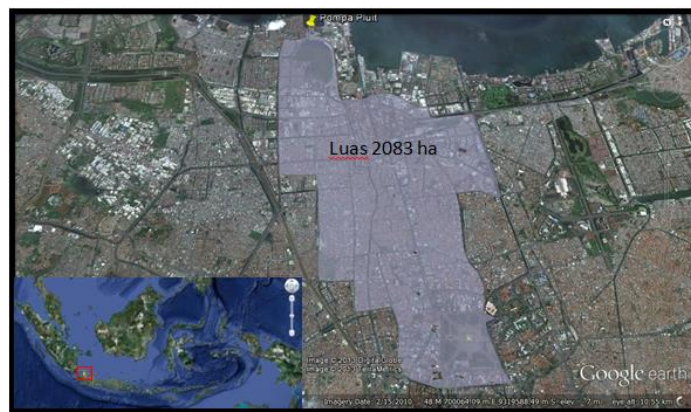
Jakarta terletak di Utara Pantai Jawa yang merupakan delta dengan 13 sungai yang terhubung ke Teluk Jakarta. Secara topografi Jakarta berlokasi di dataran rendah, hampir 40% wilayahnya berada di bawah muka air laut. Hal ini mengakibatkan Jakarta sering dilanda banjir. Banjir adalah luapan air yang melebihi standar kapasitas air akibat hujan yang terus menerus maupun akibat luapan air pasang laut di daerah pesisir. Banjir di Kota

Jakarta dapat dibagi menjadi tiga, yaitu banjir lokal, banjir kiriman, dan banjir rob. Banjir lokal disebabkan oleh intensitas hujan di kota yang melebihi kapasitas desain drainase yang ada. Banjir kiriman adalah banjir akibat runoff besar yang berasal dari hulu sungai yang berada di Kabupaten Bogor. Banjir rob disebabkan oleh pasang air laut dan kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim global.

Prinsip pengendalian banjir di Jakarta yang ada saat ini adalah membangun banjir kanal sehingga air dari hulu langsung dibuang ke laut dengan gravitasi. Untuk daerah hilir yang merupakan dataran rendah, air banjir tidak dapat langsung dibuang ke laut ataupun ke sungai utama karena muka air yang lebih tinggi sehingga harus menggunakan sistem polder, yaitu tanggul, waduk, sistem drainase, pintu air dan pompa sebagai satu kesatuan pengelolaan tata air yang tidak terpisahkan.

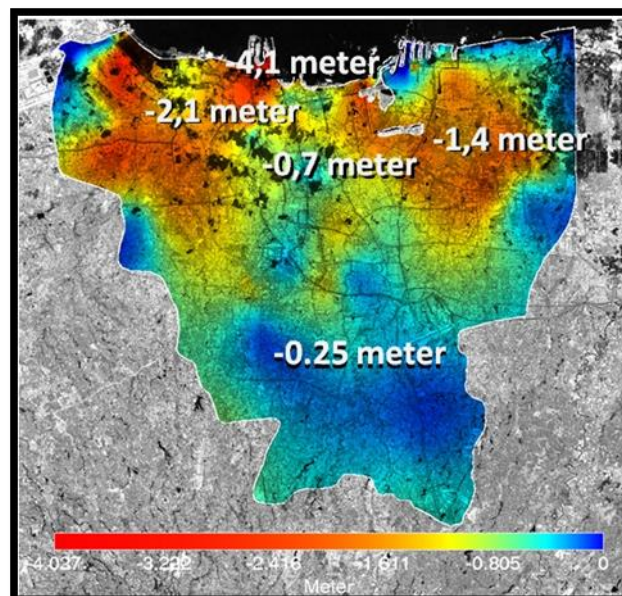
Salah satu sistem polder yang sangat penting di Provinsi DKI Jakarta adalah polder Pluit yang mempunyai luas tangkapan air 2.083 ha meliputi Monas dan Istana Negara (lihat Gambar 1).

Kawasan Pluit berada di Kecamatan Penjaringan, Jakarta Utara. Secara topografis kawasan Pluit berada di dataran rendah dimana daratannya berada di bawah permukaan air laut rata-rata. Kondisi tersebut diperparah dengan fenomena penurunan tanah (*land subsidence*) dan kenaikan muka air laut (*sea level rise*). Penurunan tanah di kawasan Pluit sebesar -4.1 m dalam kurun waktu 36 tahun (lihat Gambar 2). Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan oleh Bakosurtanal, ITB, dan BRKP KKP menunjukkan adanya tren kenaikan muka air laut di Teluk Jakarta. Pada tahun 1925 kondisi muka air laut Teluk Jakarta tercatat 15,9 cm, dalam 25 tahun berikutnya (1950) muka laut bertambah rata-rata 14,37 cm setiap 25 tahun atau 8 mm/tahun (lihat Gambar 3).



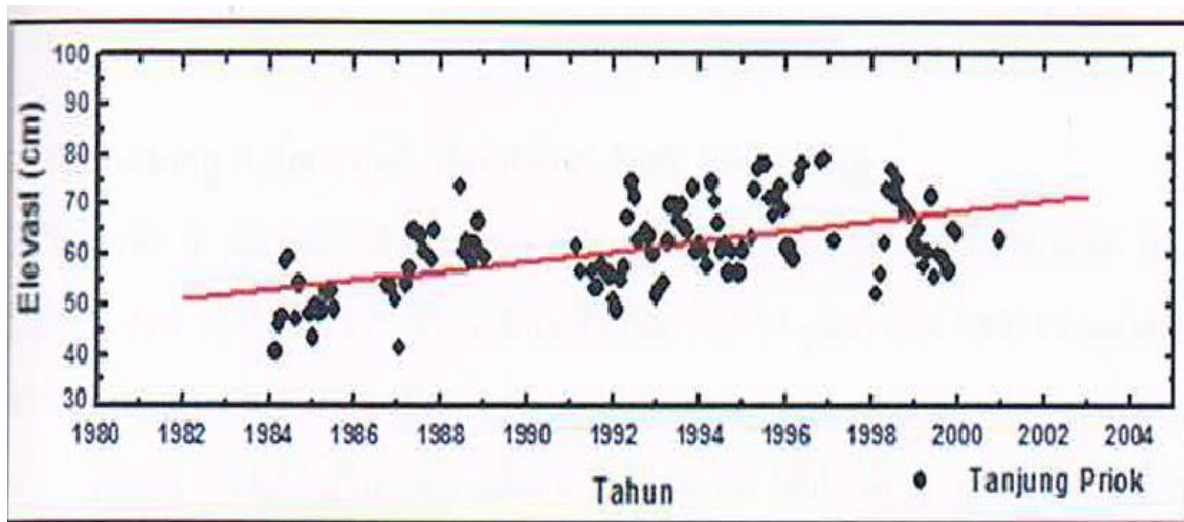
Sumber: Google Earth

**Gambar 1** Lokasi Studi



Sumber: Deltares., 2011

**Gambar 2** Peta Penurunan Tanah Provinsi DKI Jakarta tahun 1974 s.d 2010 (-0.5cm s.d -17cm/tahun)



Sumber: Bakosurtanal, 2004

**Gambar 3** Kondisi muka air laut bulanan perairan Jakarta 1984-2001 (msl)

Ancaman banjir terbesar di kawasan Pluit selain dari banjir lokal dan banjir kiriman adalah banjir rob. Jika sampai terjadi kegagalan tanggul laut maka air laut akan terus masuk ke daratan sampai titik dimana muka air laut satu level tinggi dengan daratan. Mengingat pentingnya kawasan Pluit dan rentan terhadap bencana banjir rob maka diperlukan kepedulian lebih dalam mempersiapkan mitigasi kemungkinan bencana tersebut terjadi (Karmar et.al, 2010).

Kegagalan tanggul laut di Pluit dapat diakibatkan oleh beberapa faktor diantaranya : *seepage* air laut, gelombang besar, *local scouring*, dll. Untuk mengantisipasi hal tersebut maka perlu dipikirkan desain konstruksi tanggul laut yang ekstra kokoh dan aman.

Saat ini posisi dari stasiun pompa Pluit eksisting berada di bawah permukaan air laut rata-rata sehingga sangat rawan tergenang. Idealnya tinggi stasiun pompa tidak boleh tergenang oleh banjir baik dari sungai maupun dari laut sehingga tinggi stasiun pompa harus berada diatas tinggi muka air maksimum sungai dan laut.

Pada studi ini dilakukan simulasi skenario kegagalan tanggul laut Pluit (tanggul laut Pluit jebol) dengan melakukan pemodelan hidrolis 1D/2D menggunakan *software SOBEK*. Selain itu dilakukan kajian juga desain peninggian tanggul laut dan peninggian pompa Pluit agar tidak tergenang saat banjir besar baik dari sungai maupun dari laut.

### KAJIAN PUSTAKA Sistem Polder

Sistem polder adalah suatu cara penanganan banjir dengan kelengkapan bangunan sarana fisik, yang meliputi tanggul, saluran drainase, kolam retensi, pompa air, pintu air, yang dikendalikan sebagai satu kesatuan pengelolaan. Dengan sistem polder, maka lokasi rawan banjir akan dibatasi dengan jelas, sehingga elevasi muka air, debit dan volume air yang harus dikeluarkan dari sistem dapat dikendalikan. Oleh karena itu, sistem polder disebut juga sebagai sistem drainase yang terkendali (Dinas PU DKI, 2009).

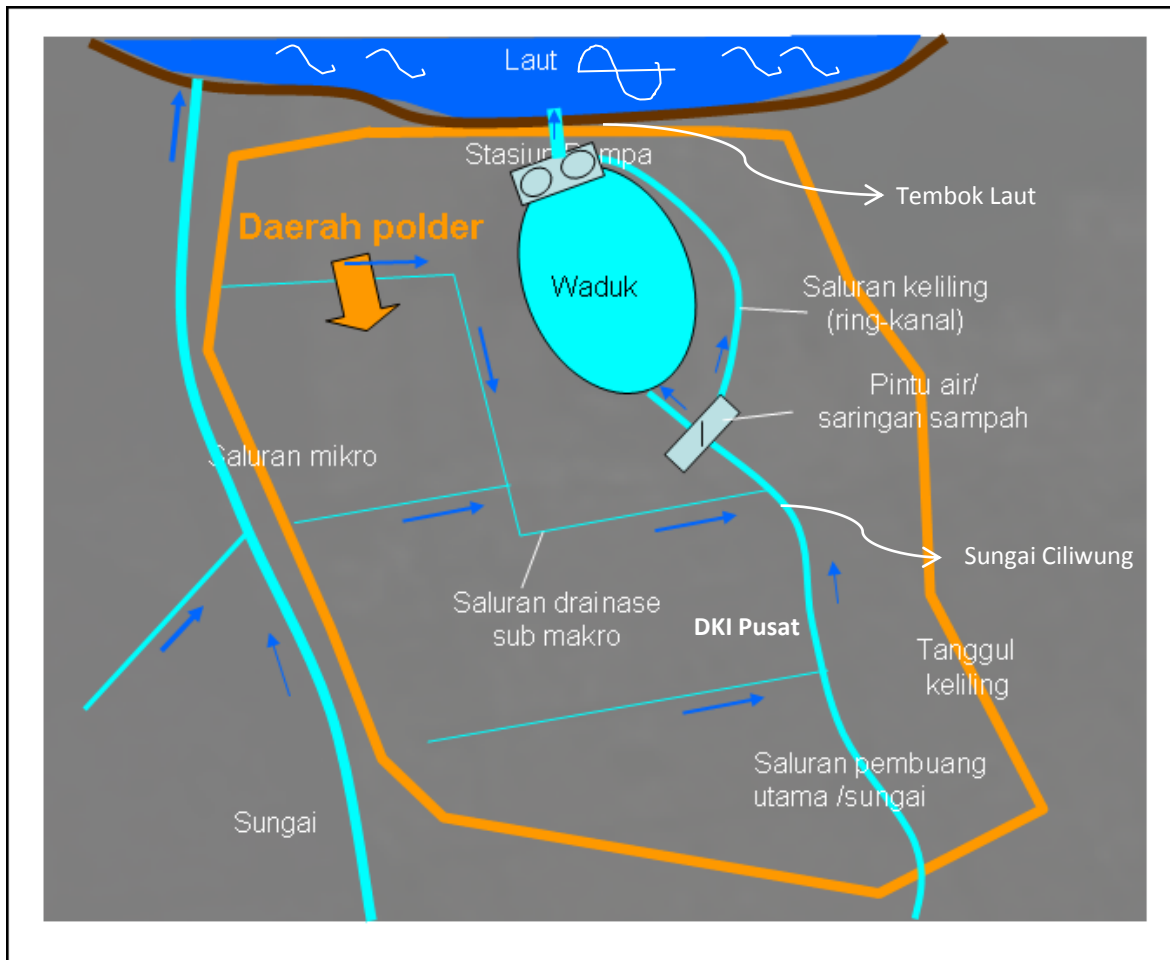
Sistem ini dipakai untuk suatu daerah dengan dataran rendah atau keadaan topografi atau kontur yang cukup datar, sehingga saluran-saluran yang ada tidak mampu mengalir secara gravitasi sehingga digunakan pompa. Jumlah dan kapasitas pompa yang disediakan di dalam stasiun pompa harus disesuaikan dengan volume layanan air yang harus dikeluarkan. Agar daerah ini tidak tergenang, maka dibuat saluran yang mengelilingi cekungan. Air yang tertangkap dalam daerah cekungan itu sendiri ditampung di dalam suatu kolam, dan selanjutnya dipompa untuk dibuang langsung ke laut atau sungai/banjir kanal yang bagian hilirnya akan bermuara di laut.

Agar kapasitas pompa yang dipergunakan tidak terlalu besar yang secara ekonomi mahal, maka air buangan dialirkan secara gravitasi ditampung dalam suatu kolam (waduk) dan selanjutnya baru dipompa keluar lokasi dengan pompa. Lokasi waduk yang dipilih menjadi suatu bagian terendah dari sistem polder tersebut. Kondisi waduk Pluit tahun 2012 (lihat Gambar 4).



Sumber: Google Earth

**Gambar 4** Kondisi Waduk Pluit tahun 2012



Sumber: Dinas PU DKI Jakarta, 2009

**Gambar 5** Ilustrasi Sistem Drainase Polder

Prinsip kinerja sistem polder Pluit adalah aliran air pada daerah layanan Pluit di tampung di Waduk Pluit untuk kemudian di pompa ke Laut Jawa. Sistem ini dapat melindungi sebagian besar wilayah Jakarta dari risiko banjir khususnya Jakarta Pusat dan Jakarta Utara.

Komponen utama suatu sistem polder berupa saluran mikro, sub makro, makro, kolam tampungan (waduk), tanggul, stasiun pompa serta bangunan pelengkap berupa pintu air, saringan sampah, dll. Komponen tersebut terintegrasi dalam satu kesatuan sistem polder (lihat Gambar 5).

### Kegagalan Tanggul Laut

Kawasan Pluit pernah mengalami kegagalan tanggul laut tepatnya pada tanggal 26 November 2007. Air laut masuk ke Waduk Pluit kemudian melimpas ke pemukiman warga sekitar Pluit.

Saat terjadi kegagalan tanggul laut maka cara terbaik yang dilakukan adalah dengan segera menutup tanggul laut yang jebol. Pompa yang ada di Polder Pluit tidak dapat berbuat banyak karena walaupun dipompa air laut tidak akan pernah habis dan pemompaan hanya akan menjadi usaha yang sia-sia. Untuk dapat mempersiapkan usaha mitigasi maka diperlukan kajian sampai sejauh mana air laut akan masuk ke daratan jika terjadi tanggul laut jebol dan dimana daratan akan satu level dengan air laut.

### Referensi Sistem Tinggi

Pemerintah DKI Jakarta menggunakan 2 referensi sistem tinggi, yaitu tinggi BM PP dan tinggi MSL. Sistem tinggi (datum vertikal) BM PP adalah sistem tinggi lokal di DKI Jakarta yang digunakan untuk aplikasi *engineering*, yaitu penentuan peil banjir, penentuan geometri sungai, geometri drainase, tinggi pompa dan lain-lain, sedangkan sistem MSL adalah tinggi orthometrik yang sudah umum digunakan di seluruh dunia karena merupakan tinggi muka air laut rata-rata (tinggi geoid). Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Tim Teknik Geodesi ITB perbedaan datum tinggi BMPP dan MSL, yaitu sekitar 1,016m (lihat Gambar 6).

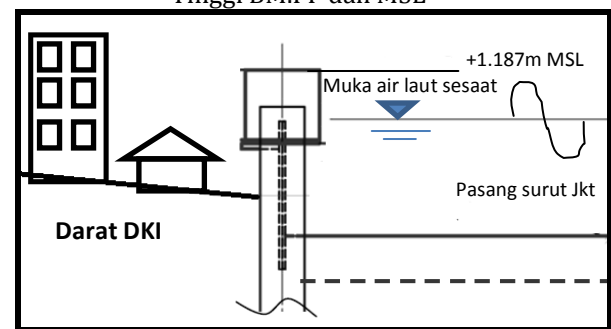
### Pengukuran Tinggi Tanggul dan Pompa Pluit

Menurut hasil pengukuran yang dilakukan oleh Balai Pantai Pusat Litbang SDA Kementerian PU tahun 2012 tinggi tanggul laut polder Pluit adalah +1,187 m MSL (lihat Gambar 7). Adapun tinggi stasiun pompa polder Pluit, yaitu -1,364 m MSL (Pusat Litbang SDA, 2012). Mengingat fenomena *land subsidence* yang cukup tinggi di daerah Pluit maka tinggi stasiun pompa dan tinggi tanggul perlu dievaluasi ulang kemanannya.



Sumber: Teknik Geodesi ITB, 2012

**Gambar 6** Perbedaan antara Referensi Sistem Tinggi BM.PP dan MSL



**Gambar 7** Sketsa lapangan tanggul laut Pluit

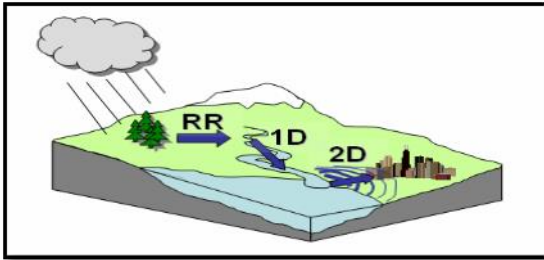
## METODOLOGI

Untuk mendapatkan penyelesaian dari suatu masalah rekayasa air diperlukan suatu model pendekatan yang dapat mewakili permasalahan yang sedang dihadapi. Perhitungan hidrolika rumit, mengingat bentuk penampang sungai tiap *section*-nya yang tidak seragam dan dengan jumlah *section* yang tidak sedikit maka diperlukan suatu perangkat lunak (*software*). Aplikasi program ini digunakan dengan maksud agar ketelitian perhitungan dan analisa perhitungan bisa lebih terjaga (untuk mereduksi faktor "*human error*").

Analisa hidrolika pada studi ini menggunakan program *SOBEK*. *SOBEK* adalah paket perangkat lunak *modelling* terintegrasi yang *powerfull* untuk peramalan banjir, optimasi sistem drainase, kontrol sistem irigasi, desain *overflow* saluran, morfologi sungai, intrusi air laut dan kualitas air. Operasi manual atau otomatis dari pompa, pintu air, bendungan, kolam penyimpanan dan struktur lainnya semua dapat dimasukkan ke dalam model sehingga memberikan gambaran realistis tentang bagaimana sistem air berperilaku dalam skenario ekstrim (*Sobek Online Help, 2011*).

Pada studi ini digunakan dua modul yaitu *SOBEK 1D Flow* dan *SOBEK Overlandflow 2D*. Modul RR tidak digunakan karena simulasi dilakukan tanpa adanya hujan (air hanya datang

dari laut). 1D Flow modul untuk menghitung aliran 1D (tinggi muka air & debit pada saluran terbuka) di sungai utama dan drainase. *Overlandflow* 2D modul untuk menghitung pola genangan pada lokasi kajian dimana pada aliran 1D telah *overflow* (lihat Gambar 8).



Sumber: SOBEK Online Help, 2011

**Gambar 8** Ilustrasi Pemodelan Modul SOBEK

**a SOBEK 1D Flow**

SOBEK versi rural (2011) yang digunakan pada studi ini adalah berdasarkan pada teori persamaan *de Saint Venant* :

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \dots\dots\dots 1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g A_f \frac{Q|Q|}{K^2} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \dots\dots\dots 2)$$

Keterangan:

- $A_f$  , luas potongan saluran basah
- $Q$  , debit
- $q_{lat}$  , aliran samping (lateral) per satuan panjang saluran
- $\zeta$  , tinggi muka air diatas referensi dataran horizontal
- $K$  , daya angkut saluran
- $g$  , gaya gravitasi
- $W_f$  , lebar basah
- $\tau_{wi}$  , tegangan geser angin
- $\rho_w$  , kepadatan air
- $x$  , posisi sepanjang poros saluran
- $t$  , waktu

**Solusi Numerik**

Di SOBEK solusi numerik dari persamaan *de Saint Venant* ini didasarkan pada sebuah formulasi implisit pada grid numerik *staggered*. Hal ini menawarkan keuntungan besar dalam stabilitas numerik dan ketahanan, khususnya melalui langkah waktu kontroler yang diimplementasikan dalam algoritma numerik. Pada grid *staggered* variable dependen  $Q$  dan  $\zeta$  didefinisikan bolak-balik (iterasi) pada titik-titik grid yang berurutan sepanjang sumbu  $x$ . Pendekatan jaringan *staggered* menawarkan keuntungan yang berbeda atas grid

*non staggered* dengan jaminan solusi konvergensi numerik dan kemampuan yang lebih baik untuk menangani banjir dan pengeringan bagian grid.

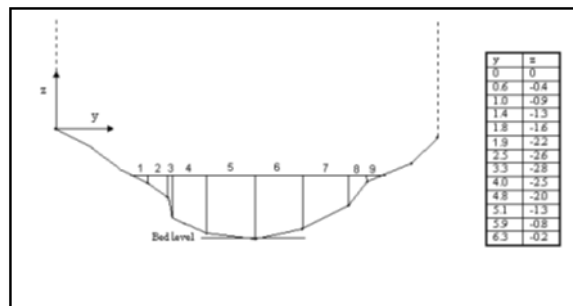
**Boundary Condition**

Kondisi batas (*boundary condition*) dalam aplikasi praktis terdiri dari masukan yang ditentukan pada ujung hulu saluran yang memasuki domain model banjir dan pembuangan di saluran yang keluar meninggalkan domain model banjir, masukan dapat berupa *level* air atau kurva rating. Pada batas internal, seperti saluran sambungan, biasanya modifikasi persamaan kontinuitas diterapkan, bergabung dengan kompatibilitas *level* muka air pada batas saluran di persimpangan itu. SOBEK memungkinkan untuk dimasukkannya efek meteorologi, seperti angin, curah hujan dan evapotranspirasi. Curah hujan juga dapat dimasukkan dalam model domain 1D dimana modul RR terintegrasi dengan modul 1D.

Data awal dapat diberikan sebagai *dry bed* dan *level* muka air. Model akan menyesuaikan kondisi awal (*initial state*) secara otomatis sebagai fungsi data *boundary* dari data yang tersedia. *Level* muka air juga bisa ditentukan bersama elemen garis dalam rangka mengikuti gradien sepanjang sungai dan saluran. Sebuah fungsi *hot-start* tersedia memungkinkan kelanjutan dari simulasi dari keadaan yang sebelumnya dihitung.

**Cross Section**

Inputan data *cross section* berupa koordinat  $y$ - $z$ . Total tampungan dari *cross section* dihitung dengan menjumlah tampungan dari setiap *sub-section* (lihat Gambar 9).



Sumber: SOBEK Online Help, 2011

**Gambar 9**  $y$ - $z$  *cross section* pada SOBEK 1D dengan sub-seksi

Tampungan adalah kuantitas yang merepresentasikan kapasitas debit dari sungai pada setiap *level* muka air. Bahkan, menggabungkan nilai-nilai untuk gesekan dan radius hidrolis menjadi satu sebagai berikut:

$$K_i = A_i C_i \sqrt{R_i} \dots\dots\dots 3)$$

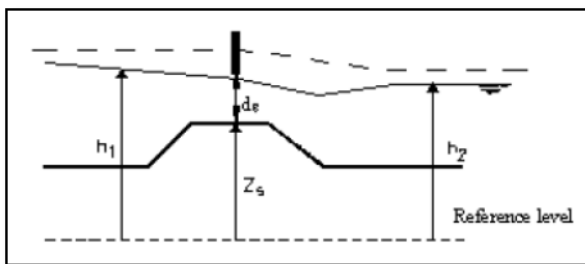
$$K = \sum_{i=1}^n K_i \dots\dots\dots 4)$$

Keterangan:

- $K_i$ , daya angkut dari setiap subseksi dengan menerapkan kedalaman air dan gesekan
- $I$ , subseksi  $I, i=1, n$
- $K$ , daya angkut total dari *cross section*
- $A_i$ , luas aliran yang masuk pada potongan sungai
- $C_i$ , koefisien Chezy
- $R_i$ , jari-jari hidraulik dengan menerapkan kedalaman air
- $i$ , nomor dari setiap subseksi (dihitung dari  $y=0$ )
- $n$ , nomor subseksi

**Bendung dan Pintu Air**

Bendung dan Pintu Air dimodelkan sebagai lubang (*Orifice*). Sebuah sketsa definisi disajikan pada Gambar 10.



Sumber: *SOBEK Online Help, 2011*

**Gambar 10** Sketsa definisi *Orifice*

Aliran melalui *orifice* dapat terdiri dari beberapa jenis yang tergantung dari dimensi struktur dan kondisi aliran, yaitu :

- 1 *Submerge weir flow*
- 2 *Free weir flow*
- 3 *Submerge orifice flow*
- 4 *Free orifice flow or no flow* (tingkat air di bawah tingkat puncak atau lubang tertutup)

Skema *SOBEK* beralih dari satu jenis aliran ke aliran yang lain tanpa efek transisi utama. Berikut adalah persamaan debit yang diterapkan dalam perhitungan:

**Orifice:**

$$Q = C_w W_s \mu d_g \sqrt{2g(h_1 - h)} \text{ dan } A_f = W_s \mu d_g \dots 5)$$

$$\text{Free flow : } h = z_s + \mu d_g \text{ kondisi } h_1 - z_s \geq \frac{3}{2} d_g \text{ dan } h_2 \leq z_s + d_g \dots 6)$$

$$\text{Submerge flow : } h = h_2 \text{ kondisi } h_1 - z_s \geq \frac{3}{2} d_g \text{ dan } h_2 > z_s + d_g \dots 7)$$

**Bendung:**

$$\text{Free flow : } Q = C_w W_s \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g (h_1 - z_s)^{3/2}} \text{ dan}$$

$$A_f = W_s \frac{2}{3} (h_1 - z_s) \dots 8)$$

$$\text{Subm. Flow : } Q = C_e C_w A_f \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \text{ dan}$$

$$A_f = W_s (h_1 - z_s - \frac{\mu u_s^2}{2g}) \dots 9)$$

$$\text{Kondisi free flow : } h_1 - z_s < \frac{3}{2} d_g \text{ dan}$$

$$h_1 - z_s > \frac{3}{2} (h_2 - z_s) \dots 10)$$

$$\text{Kondisi subm. Flow : } h_1 - z_s < \frac{3}{2} d_g \text{ dan}$$

$$h_2 - z_s \geq \frac{3}{2} (h_2 - z_s) \dots 11)$$

Keterangan:

- $Q$ , debit yang melewati orifice ( $m^3/s$ )
- $A_f$ , luas saluran basah ( $m^2$ )
- $\mu$ , koef. aliran tenggelam atau koef. Debit bendung (default 0.63)
- $C_w$ , koef. kontraksi samping (lateral)
- $W_s$ , lebar puncak air yang berhubungan dengan elevasi air  $h$  (m)
- $d_g$ , tinggi bukaan (m)
- $h_1$ , level muka air hulu (m)
- $h_2$ , level muka air hilir (m)
- $Z_s$ , tinggi puncak (m)
- $u_s$ , kecepatan di atas puncak ( $m/s$ )

**Abutment Jenbatan**

Energi yang hilang disebabkan oleh abutment jembatan dimodelkan sebagai :

$$Q = \mu A_f \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \text{ dengan } \mu = (\epsilon_e + \epsilon_f + \epsilon_o)^{-0.5} \dots 12)$$

$$\epsilon_f = \frac{2gL}{C^2 R}; \epsilon_o = k \left(1 - \frac{A_f}{A_{f2}}\right)^2 \dots 13)$$

Keterangan:

- $Q$ , debit yang melalui jembatan ( $m^3/s$ )
- $\mu$ , koef. berasal dari koef. kehilangan
- $A_f$ , luas basah ( $m^2$ ) aliran yang melalui jembatan dari arah hulu
- $A_{f2}$ , luas basah ( $m^2$ ) aliran yang mencapai hilir dari sisi jembatan
- $h_1$ , tinggi muka air hulu (m)
- $h_2$ , tinggi muka air hilir (m)
- $\epsilon_e, \epsilon_f, \epsilon_o$ , jalan masuk (konstan), gesekan dan koef. kehilangan

**Kekasaran hidraulik**

Koefisien Manning digunakan untuk menghitung nilai sebenarnya dari koefisien Chezy, persamaannya sbb:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n_m} \dots 14)$$

Keterangan:

- $N_m$ , koef. Manning ( $s/m^{1/3}$ )

**b SOBEK 1D/2D**

Persamaan perairan dangkal dua dimensi (2D) yang diterapkan *SOBEK* adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \dots 15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + C_f \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h} = 0 \dots\dots\dots 16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} + C_f \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h} = 0 \dots\dots 17)$$

Keterangan: u dan v adalah kecepatan aliran dalam arah x dan y.

Komputasi domain dibagi menjadi jaringan 1D, dengan bagian umum berbentuk jaringan saluran dan data *cross section*. Sistem 2D dengan sel komputasi grid Digital Elevation Model (DEM). Jaringan saluran dimodelkan dalam 1D dan sebaran banjir dimodelkan dalam 2D. Jaringan 1D dan sistem 2D secara implisit digabungkan dan diselesaikan secara simultan berdasarkan keseimbangan momentum dan kekekalan massa dengan komputasi layer yang terpisah dimana saat air melimpas perhitungan 2D dimulai berdasarkan grid DEM. DEM yang digunakan pada studi ini mempunyai resolusi horizontal 100x100m dan resolusi vertikal 1m (integer) sumber data dari kegiatan "Flood Hazard Mapping" pada tahun 2007.

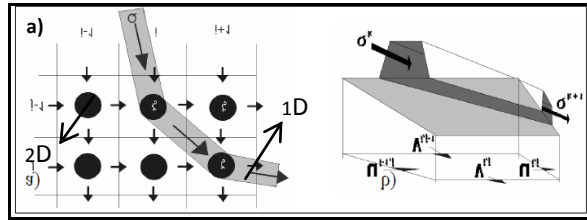
**Pemodelan 1D/2D**

Dalam pemodelan banjir, ada banyak contoh-contoh praktis dimana aliran yang terbaik dijelaskan oleh skema kombinasi 1D/2D. Sebuah contoh yang jelas adalah banjir di dataran banjir, sering ditandai oleh data topografi dengan jaringan yang kompleks berupa tanggul alam, tanggul polder, saluran drainase, jalan layang, jalur kereta api dan berbagai macam struktur hidrolis. Sistem SOBEK-1D/2D dirancang untuk simulasi daratan banjir atau genangan ketika dalam kondisi normal (apabila tidak banjir), infrastruktur hidrolis dapat dimodelkan sebagai jaringan satu-dimensi (1D). Jika daerah yang tergenang besar maka asumsi untuk aliran 1D biasanya tidak berlaku lagi. Dalam kasus tersebut sistem menjadi benar-benar dua dimensi (2D).

**Prinsip Numerik**

Komputasi domain dibagi menjadi jaringan 1D, dengan bagian umum berbentuk jaringan saluran dan data *cross section*. Sistem 2D dengan sel komputasi grid. Jaringan 1D dan sistem 2D secara implisit digabungkan dan diselesaikan secara simultan berdasarkan keseimbangan momentum dan kekekalan massa dengan komputasi *layer* yang terpisah.

Untuk keseimbangan momentum 1D dan 2D sistem tetap dipisahkan secara tegas. Itu berarti bahwa kecepatan atau debit bisa milik bagian 1D atau bagian 2D. Untuk konservasi massa, menjadi kuantitas skalar, volume tepat 1D dan 2D digabungkan sehingga *level* muka air ada pada tingkat yang sama antara 1D dan 2D.



**Gambar 11** Skematisasi model hidrolis, a) kombinasi 1D/2D *staggered grid*, b) kombinasi finite masa volume untuk komputasi 1D/2D

Baik lapisan 1D dan 2D komputasi memiliki formulasi *finite difference* untuk persamaan volume dan momentum, berdasarkan pendekatan *staggered grid* (lihat Gambar 11.a). Dengan kata lain, pendekatan volume diterapkan, volume momentum berbeda dari volume massa, dan tidak terdapat interaksi antara volume momentum 1D dan 2D. Ini berarti bahwa interaksi kecepatan vertikal dan geser antara aliran stress 1D dan aliran 2D diabaikan. Untuk setiap volume hukum momentum diterapkan berikut:

Laju perubahan momentum + transportasi momentum + tekanan hidrostatik terpadu + kehilangan akibat gesekan = 0

Perhitungan numerik adalah sedemikian rupa sehingga di sekitar gradien curam yang terjadi kondisi loncatan selalu diisi baik untuk volume 1D dan 2D. Interaksi antara 1D dan bagian 2D berlangsung melalui volume bersama, (lihat Gambar 11.b). Untuk volume massa 1D/2D bersamaan diselesaikan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{dv_{i,j}(\zeta)}{dt} + \Delta y((uh)_{i,j} - (uh)_{i-1,j}) + \Delta((vh)_{i,j} - (vh)_{i,j-1}) + \sum_{l=K_{ij}^L}^{L_{ij}} (Q_n)_l = 0$$

.... 18)

Keterangan:

V , kombinasi volume 1D/2D

u , kecepatan pada arah x

v , kecepatan pada arah y

h , tinggi air total di atas dasar 2D

ζ , tinggi muka air pada bidang referensi (sama untuk 1D dan 2D)

Δx , ukuran grid 2D dalam arah x (atau i)

Δy, ukuran grid 2D dalam arah y (atau j)

Qn, debit pada arah normal

l,j,l,K,L , nomor integer untuk penomoran titik nodal

Untuk Gambar 11.b persamaannya menjadi:

$$\frac{dv_{i,j}(\zeta)}{dt} + \Delta y((uh)_{i,j} - (uh)_{i-1,j}) + \Delta x((vh)_{i,j} - (vh)_{i,j-1}) + Q_{k+1} - Q_k = 0 \dots\dots 19)$$



Setelah diskritisasi dalam waktu oleh "metode  $\theta$ " kecepatan dieliminasi dengan substitusi dari persamaan momentum ke dalam persamaan kontinuitas. Sistem yang dihasilkan untuk volume murni 2D adalah linier, tetapi pada bagian 1D mungkin terjadi persamaan non-linier dengan mengacu pada volume  $V(\zeta)$ . Hal ini diselesaikan oleh iterasi Newton. Hasilnya adalah linierisasi persamaan perlangkah iterasi Newton yang pasti positif dan simetris. Metode ini digunakan untuk solusi kombinasi dari apa yang disebut "algoritma tingkat minimum" dan kondisi Pra-CG (*conjugate gradient*).

Persamaan kontinuitas diskritisasi dengan cara yang tidak mungkin volumenya negatif. Hal ini untuk efisiensi dan juga kejadian banjir yang realistis ketika kondisi sungai *dry beds* 1D membanjiri lingkungan 2D. Dalam kondisi normal, yaitu jika tidak ada banjir, bagian 2D tidak diaktifkan.

Ini berarti bahwa dalam persamaan :

$$\frac{dv_{i,j}(\zeta)}{dt} + \Delta y((uh)_{i,j} - (uh)_{i-1,j}) + \Delta x((vh)_{i,j} - (vh)_{i,j-1}) - \sum_{i=K_{i,j}^1}^{K_{i,j}^2} (Q_n)_i = 0$$

..... 20)

nilai  $uh$  dan  $vh$  seharusnya menjadi nol.

**c Analisis Pasang Surut**

Analisis Pasut pada studi ini menggunakan Metode Kuadrat Terkecil berdasarkan persamaan harmonik pasut sbb:

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos \omega_i t_k + \sum_{i=1}^n B_i \dots\dots\dots 21)$$

Keterangan:

- $A_i$  , Konstanta amplitudo harmonik ke- $i$
- $B_i$  , Konstanta fase harmonik pasut ke- $i$
- $k$  , Jumlah komponen pasut
- $t_k$  , Waktu pengamatan tiap jam, dengan  $t_k=0$  sebagai waktu tengah-tengah pengamatannya.

Model pasut hasil hitungan  $Y(t)$  akan mendekati bentuk pasut pengamatannya jika kuadrat kesalahannya minimum, yang diekspresikan dengan persamaan,

$$\mu^2 = \sum_{tk=k}^k \{Y(t_k) - Y_{tk}\} = \min \dots\dots\dots 22)$$

kuadrat kesalahan ( $\mu^2$ ) akan minimum jika,

$$\frac{\partial \mu^2}{\partial Y_0} = 0, \frac{\partial \mu^2}{\partial A_r} = 0, \frac{\partial \mu^2}{\partial B_r} = 0, \text{ dimana: } r = 1, 2, \dots, k \dots\dots\dots 23)$$

(Lasmana, 2003)

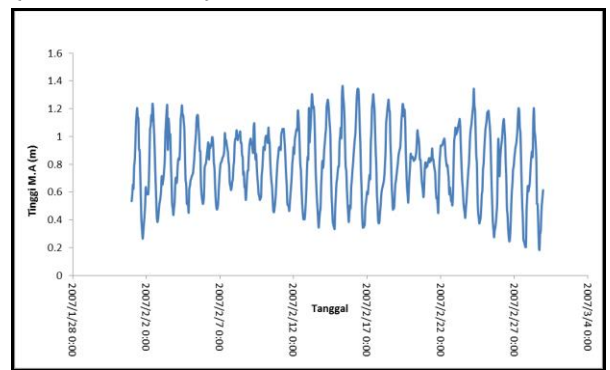
**d Skenario Pemodelan**

Spesifikasi skenario pemodelan adalah sebagai berikut:

- 1 Luas waduk 60 ha kedalaman 2,5 m
- 2 Pompa Pluit mati
- 3 Tidak ada hujan
- 4 Skenario pasang surut tanggal 31 Januari s.d 6 Februari 2007

**Data Pasang Surut**

Sumber data pasang surut diperoleh dari kegiatan *Flood Hazard Mapping* pada tahun 2007 (lihat Gambar 12).



Gambar 12 Pasang Surut Bulan Februari 2007

**Pembuatan tanggul laut jebol**

Untuk mendapatkan gambaran jebolnya tanggul laut Pluit dibuat skenario tanggul laut jebol sepanjang 100 meter dengan tinggi tanggul yang tersisa pada 0 mPP. Dibuat saluran tambahan dari laut menuju ke Waduk Pluit dimana ada sebuah tanggul selebar 100m dan ketinggiannya pada 0 mPP. Pada simulasi ini dapat diketahui sampai sejauh mana air laut mencapai daratan dan berapa lama, dimana daratan akan satu *level* dengan muka air laut jika terjadi jebol tanggul selebar 100m dengan tinggi tanggul yang tersisa pada *level* 0 mPP. Tinggi tanggul yang tersisa pada *level* 0 mPP berdasarkan skenario terburuk kegagalan bangunan tanggul laut (lihat Gambar 13).

**HASIL DAN DISKUSI**

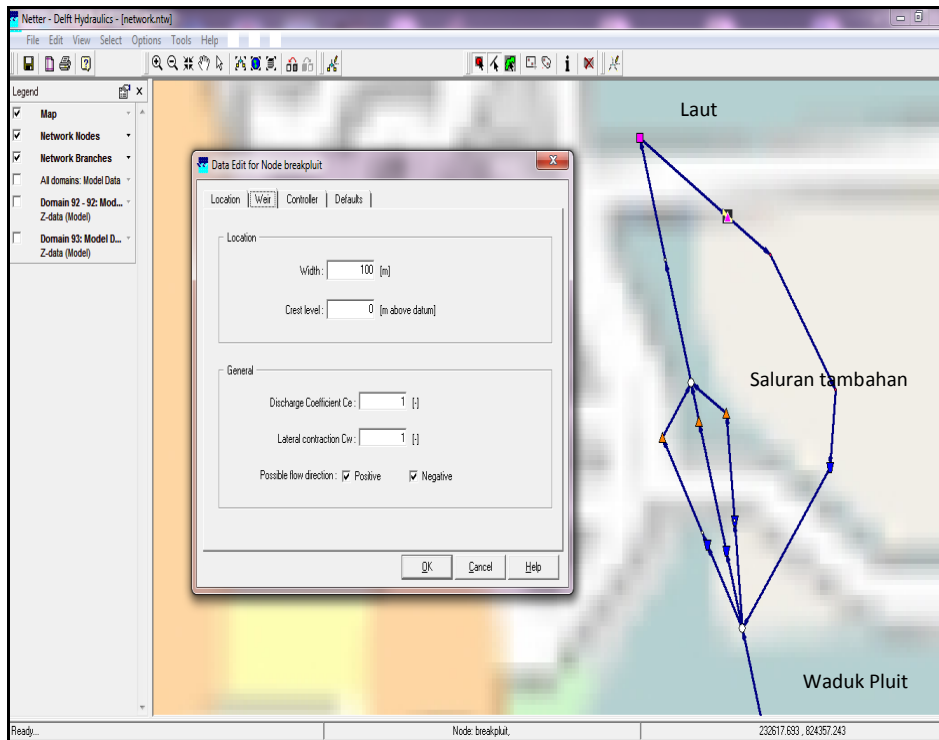
**a Pemodelan Tanggul Laut Pluit Jebol (Sea Dike Break)**

Dari hasil simulasi tanggul laut jebol selama 7 hari dan pompa tidak beroperasi luas genangan air laut maksimum mencapai 9,346 km<sup>2</sup> dengan kedalaman rata-rata genangan 72cm, dan volume genangan yang terjadi 6,731 juta m<sup>3</sup> (lihat Gambar 14). Dari hasil simulasi selama 7 hari maka dalam waktu 5 hari muka air laut sudah satu *level* dengan daratan dimana titik terjauh air laut

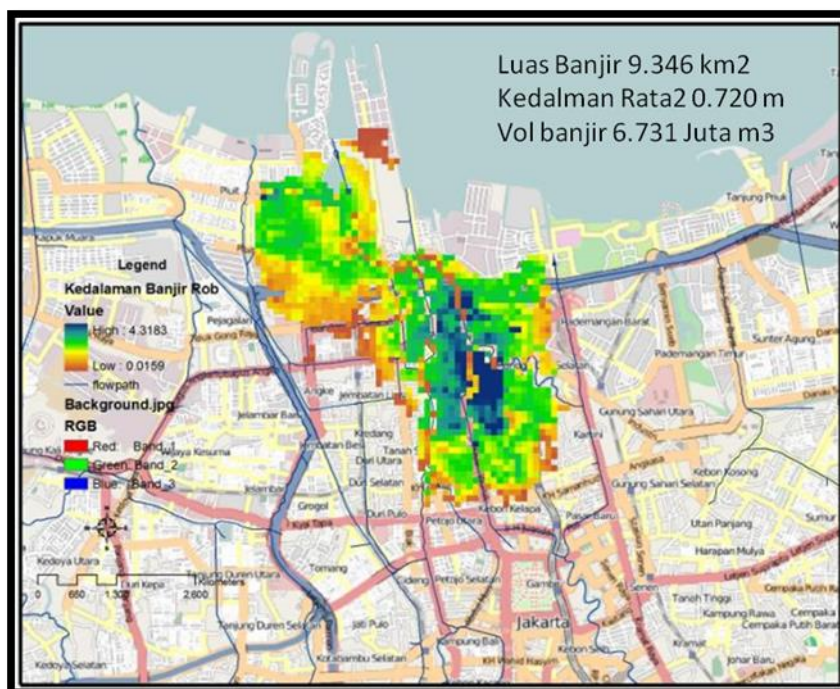
mencapai Kelurahan Kebon Kelapa, Kecamatan Gambar, Jakarta Pusat.

Gambar 15 sampai 21 memberikan gambaran simulasi tanggul laut jebol per hari, simulasi dimulai pada tanggal 31 Januari 2007 jam

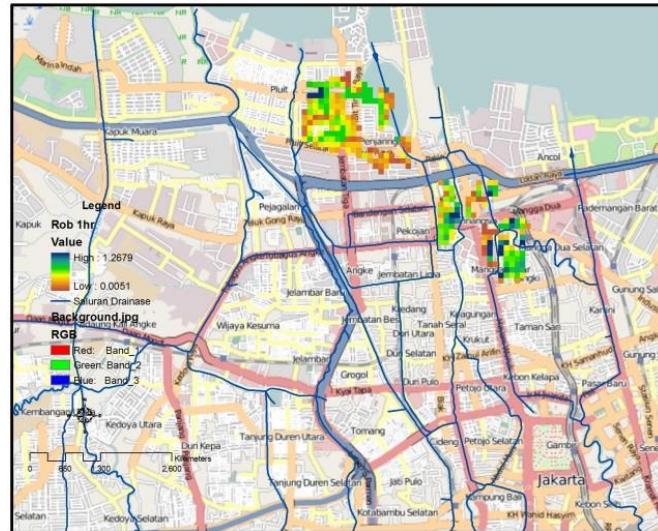
00 dan peta genangan diambil pada jam 00 hari berikutnya.



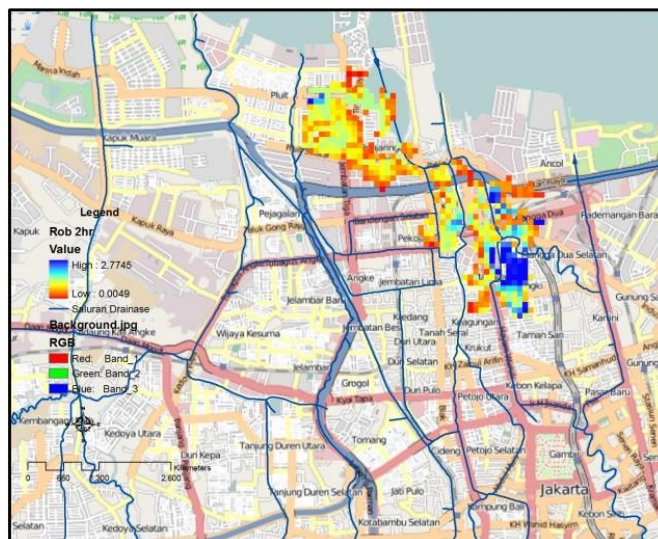
**Gambar 13** Proses Pembuatan Pluit Sea Dike Break



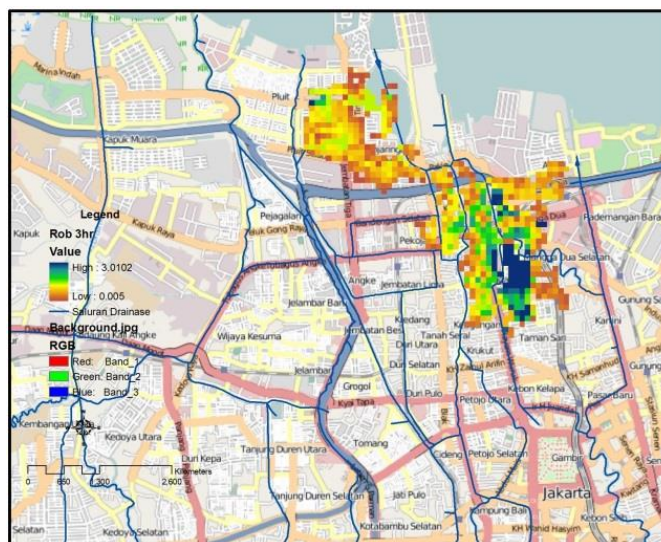
**Gambar 14** Peta Banjir Maksimum Simulasi Tanggul Laut Pluit Jebol



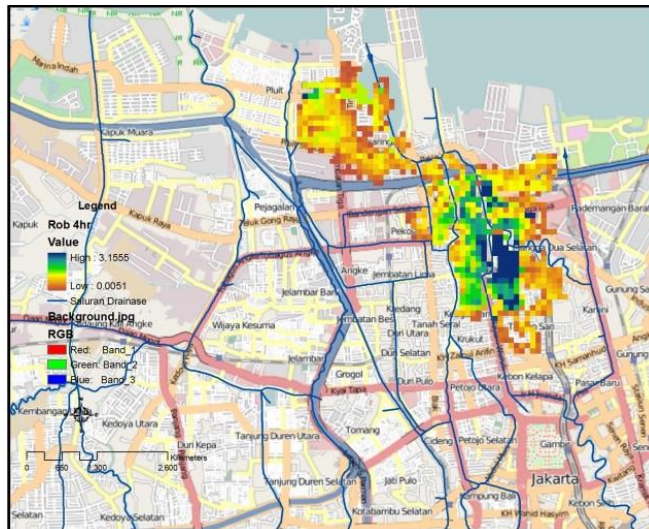
Gambar 15 Peta Banjir Rob Pluit Sea Dike Break 1 Hari



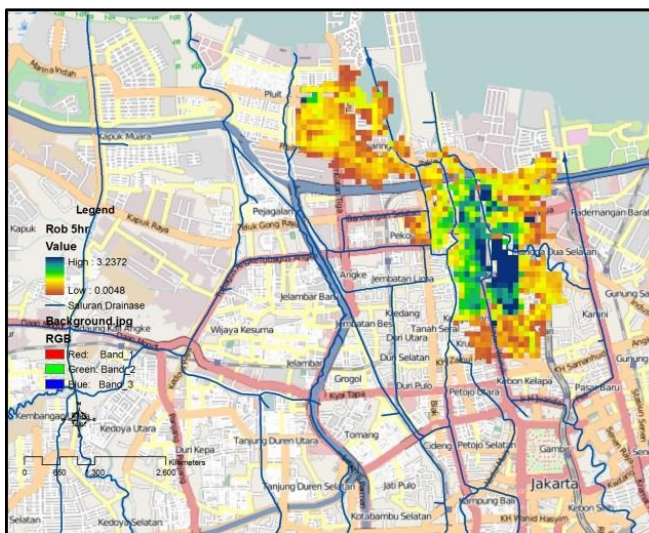
Gambar 16 Peta Banjir Rob Pluit Sea Dike Break 2 Hari



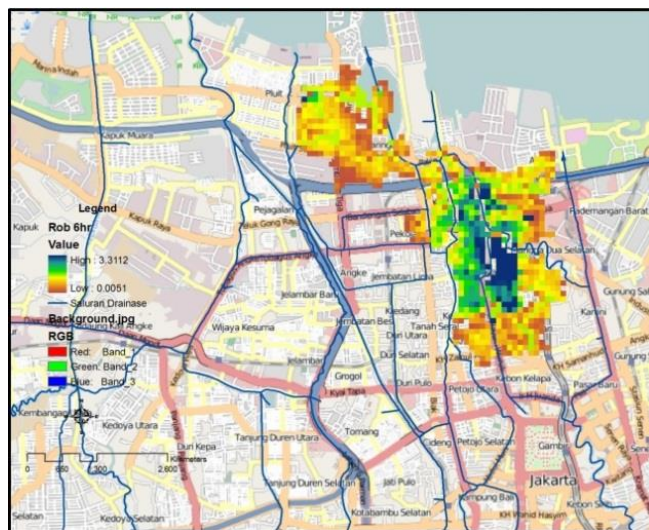
Gambar 17 Peta Banjir Rob Pluit Sea Dike Break 3 Hari



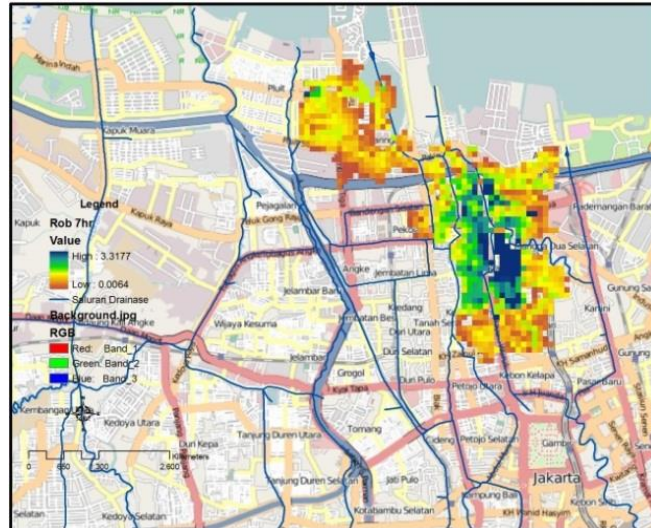
Gambar 18 Peta Banjir Rob Pluit Sea Dike Break 4 Hari



Gambar 19 Peta Banjir Rob Pluit Sea Dike Break 5 Hari

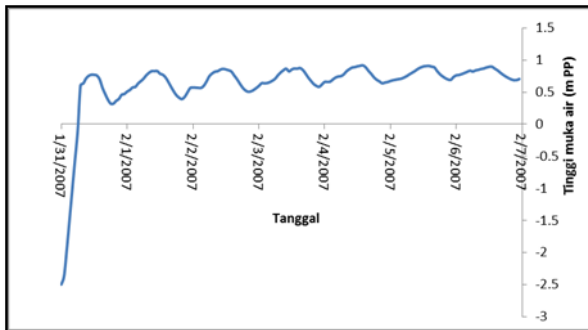


Gambar 20 Peta Banjir Rob Pluit Sea Dike Break 6 Hari

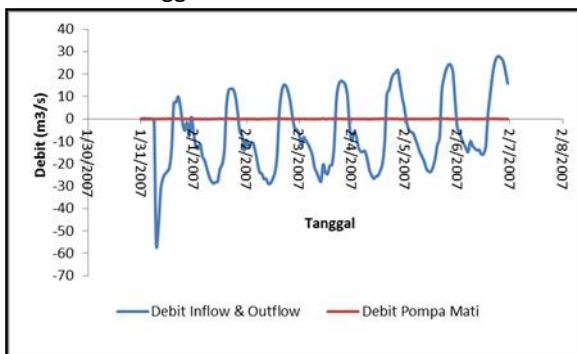


**Gambar 21** Peta Banjir Rob Pluit Sea Dike Break 7 Hari

Gambar 22-23 berikut adalah tinggi muka air dan debit yang masuk ke waduk Pluit selama simulasi :



**Gambar 22** Tinggi Muka Air waduk Pluit



**Gambar 23** Debit Inflow dan Outflow Waduk Pluit

Penilaian resiko banjir dan bencana pantai dalam bentuk peta perlu dilakukan untuk dapat mengetahui daerah yang rentan terhadap bencana dan dalam menghadapi bencana sudah ada sistem yang sistematis dan terpadu meliputi : persiapan banjir (*preparedness*), tahap tanggap darurat banjir (*response*), pasca banjir (*recovery*), dan mitigasi banjir (NSW Government, 2010).

## b Peninggian Stasiun Pompa dan Tanggul Laut Pluit

Untuk melakukan peninggian tanggul laut dan stasiun pompa Pluit ada beberapa hal yang harus diperhatikan terutama adalah faktor *land subsidence* yang cukup tinggi di daerah tersebut. Untuk tinggi tanggul laut desain layanan dipilih 5 tahun karena seperti diketahui penurunan *land subsidence* tidak linier dan jika desain dibuat 10 tahun akan mengurangi estetika karena laut akan menjadi tidak terlihat. Untuk stasiun pompa yang harus diperhatikan adalah tinggi *head* pompa karena jika *head* pompa terlalu tinggi maka kemampuan pompa akan menurun (tidak maksimal). Selain itu hal lain yang perlu diperhatikan adalah persamaan sistem referensi tinggi, seperti diketahui DKI menggunakan sistem referensi tinggi BM.PP dan MSL untuk aplikasi *engineering*.

### Analisis Pasang Surut

Berdasarkan data muka air laut pasar ikan selama satu bulan yaitu bulan Mei tahun 2012 dilakukan analisis perhitungan pasang surut dengan metode kuadrat terkecil (lihat Gambar 24).

Untuk menghitung tinggi stasiun pompa akan mengikuti metode dari kajian "Review Masterplan Pengendalian Banjir dan Drainase DKI Jakarta" yang dikeluarkan oleh Dinas PU Pemprov DKI Jakarta tahun 2009 (lihat Gambar 25).

### Penentuan Tinggi Stasiun Pompa Desain Layanan 5 Tahun

- 1 HHWL Pluit 0.448m dari MSL → 1,464 m PP
- 2 Kondisi Eksisting tinggi Pompa Air = -1,364 m MSL → -0,348 mPP
- 3 Landsubsidence 5 tahun = 0,565m

Konstituen	Amp (cm)	Fasa (derajat)
M <sub>2</sub>	4.81	249.6
S <sub>2</sub>	8.23	-52.18
N <sub>2</sub>	2.04	195.48
K <sub>2</sub>	5.86	-70.58
K <sub>1</sub>	24.2	34.83
O <sub>1</sub>	12.55	70.32
P <sub>1</sub>	3.39	7.17
M <sub>4</sub>	0.93	203.91
MS <sub>4</sub>	0.92	78.11
S <sub>0</sub>	169.5	

$$NF = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

dimana jenis pasut untuk nilai NF (angka Formzahl):  
 0,0 - 0,25 semi diurnal  
 0,25 - 1,5 mixed type (semi diurnal dominant)  
 1,5 - 3,0 mixed type (diurnal dominant)  
 > 3,0 diurnal

Nilai NF 2.82  
 Tipe Pasut semi diurnal

Elevasi-elevasi acuan Peilschaal (cm)		
Highest High Water Level (HHWL)	:	214.3
Mean High Water Spring (MHWS)	:	205.98
Mean High Water Level (MHWL)	:	190.82
Mean Sea Level (MSL)	:	169.5
Mean Low Water Level (MLWL)	:	149.98
Mean Low Water Spring (MLWS)	:	122.19
Lowest Low Water Level (LLWL)	:	110.78
<b>Tanggung pasang (cm):</b>	<b>:</b>	<b>103.52</b>

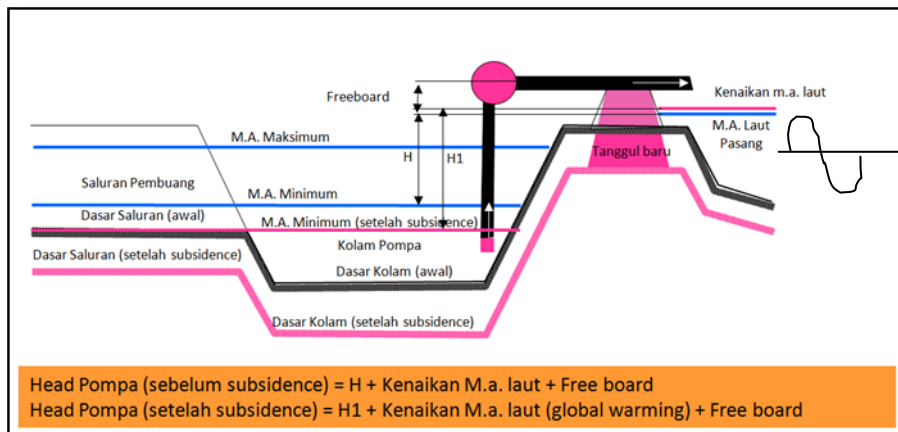
  

Elevasi-elevasi acuan relatif terhadap MSL (cm)		
Highest High Water Level (HHWL)	:	44.80
Mean High Water Spring (MHWS)	:	36.48
Mean High Water Level (MHWL)	:	21.32
Mean Sea Level (MSL)	:	0.00
Mean Low Water Level (MLWL)	:	-19.52
Mean Low Water Spring (MLWS)	:	-47.31
Lowest Low Water Level (LLWL)	:	-58.72
<b>Tanggung pasang (cm):</b>	<b>:</b>	<b>103.52</b>

Elevasi-elevasi acuan relatif terhadap LWS (cm)		
Highest High Water Level (HHWL)	:	103.52
Mean High Water Spring (MHWS)	:	95.20
Mean High Water Level (MHWL)	:	80.04
Mean Sea Level (MSL)	:	58.72
Mean Low Water Level (MLWL)	:	39.20
Mean Low Water Spring (MLWS)	:	11.41
Lowest Low Water Level (LLWL)	:	0.00
<b>Tanggung pasang (cm):</b>	<b>:</b>	<b>103.52</b>

Gambar 24 Hasil Analisis Pasang Surut (18,6 Tahun) di Pasar Ikan



Sumber: Dinas PU Pemprov DKI, 2009

Gambar 25 Sketsa Pengaruh land subsidence terhadap aliran debit di alur drainase polder

- 4 Kenaikan MA Laut 5 tahun = 4 cm
- 5 Head Pompa sebelum subsidence = 2+1,464+1 = 4,464 m
- 6 Head Pompa Setelah Subsidence = 2+0,565+0,04+1,464 +1 = 5,069 m
- 7 Tinggi Stasiun Pompa tanpa subsidence +2,464 m PP
- 8 Tinggi stasiun Pompa dengan Subsidence +3,069 m PP

Jenis pasang surut di Jakarta termasuk pada tipe pasut semi diurnal artinya dalam satu hari terjadi dua kali pasang dan dua kali surut. Nilai tanggung pasang dalam kurun waktu 18,6 tahun

sekitar 1 m, dimana asumsi MSL pada titik nol maka nilai dari HHWL 44,8 cm dan nilai dari LLWLnya -58,72 cm. Kejadian Rob yang terjadi di di Jakarta pada umumnya karena daratan sudah di berada di bawah MSL sehingga diperlukan tanggul.

Penentuan Tinggi Tanggul Desain Layanan 5 tahun

- 1 Tinggi Tanggul Saat ini = 1,187 m MSL → 2,203 mPP
- 2 Land subsidence+sea level rise 5 tahun = 0,605 m
- 3 Elevasi mercu tanggul yang ada di waduk pluit +1,187 m dari MSL (+2,203m PP). Dengan

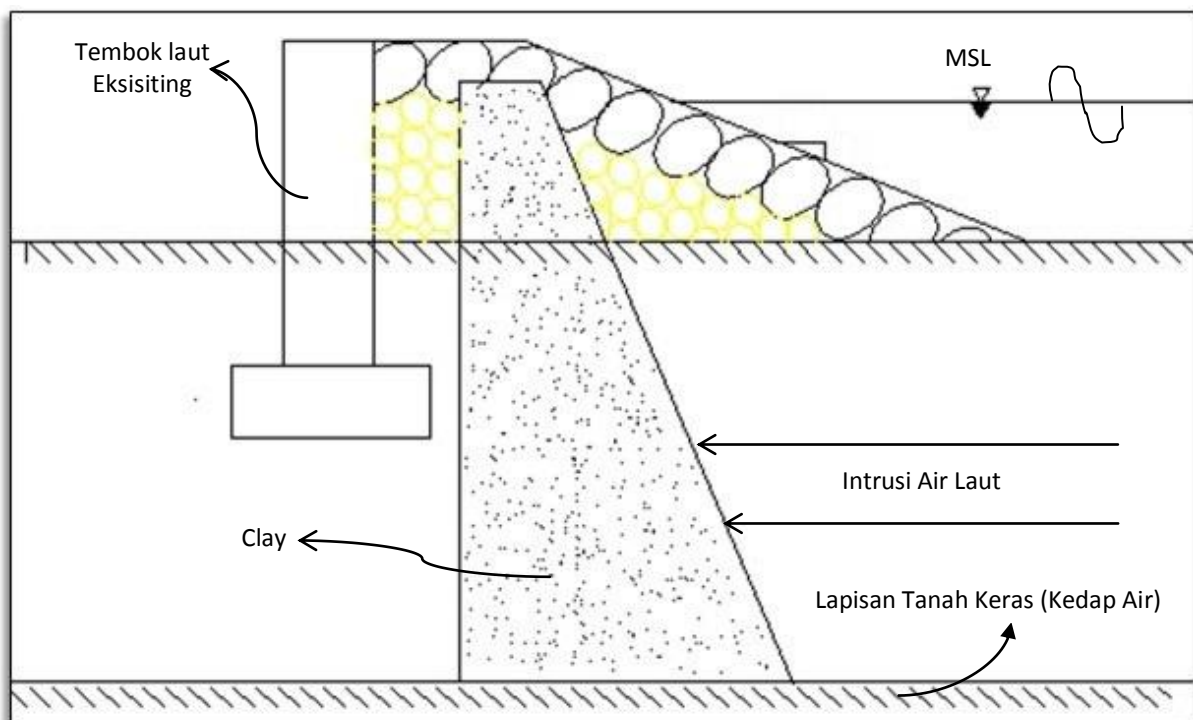
besarnya penurunan tanah  $\pm 11$  cm/tahun, kenaikan muka air laut (*sea level rise* Jakarta)  $\pm 8$  mm/tahun maka tanggul tersebut akan melimpas pada 6 tahun mendatang.

- 4 Rekomendasi Tinggi Tanggul=  $1,187+0,605=1,792$  m MSL

#### Ancaman Intrusi Air

Untuk mencegah intrusi air laut (*seepage*) ke waduk Pluit harus memiliki *Subsurface Barrier* yaitu penghalang di bawah tanah sebagai pembatas antara air asin dan air tawar, konstruksinya semacam bendungan bawah tanah dimana material yang digunakan harus kedap air misalnya lempung, beton, ataupun aspal.

Adapun konsep yang dapat diaplikasikan, yaitu dengan membangun bendungan urugan batu yang mempunyai lapisan inti berupa tanah *clay* untuk mencegah *seepage* dari laut. Dengan konstruksi bendungan urugan batu maka dalam pembangunannya tidak merubah tanggul laut yang sudah ada. Pembangunan bendungan tidak membahayakan daerah hilirnya karena konstruksi bendungan dibangun di depan tanggul laut eksisting. Namun perlu kajian lebih lanjut untuk menentukan dimensi batu dan kedalaman lapisan tanah keras (lapisan kedap air). Gambar 28 berikut adalah sketsa desain untuk tanggul laut Pluit.



**Gambar 28** Desain Bendungan Urugan Batu Penahan Intrusi Air Laut

## **KESIMPULAN**

Ancaman banjir baik dari sungai dan dari laut memerlukan perencanaan mitigasi banjir agar kerugian banjir minimal.

Upaya tanggap darurat pada kasus kegagalan tanggul harus dilakukan dalam waktu yang sesingkat-singkatnya untuk membatasi sebaran genangan.

Untuk mencegah intrusi air laut ke Waduk Pluit perlu dibangun bendungan urugan batu di depan tanggul laut dimana ada lapisan inti berupa tanah *clay* atau *geomembran* untuk mencegah *seepage* dari laut. Dengan konstruksi bendungan urugan batu maka dalam pembangunannya tidak

merubah tanggul laut yang sudah ada. Diperlukan kajian lebih lanjut untuk menentukan dimensi batu dan kedalaman lapisan tanah keras (lapisan kedap air).

Hazard mapping perlu dilakukan agar dalam menghadapi bencana sudah ada sistem yang sistematis dan terpadu meliputi : persiapan banjir (*preparenes*), tahap tanggap darurat banjir (*response*), pasca banjir (*recovery*), dan mitigasi banjir.

Dengan tinggi stasiun pompa pada level +3,069 m PP saat terjadi banjir besar pompa tidak akan terendam selain itu air yang tinggi masih dapat dibuang secara alami.

Sistem pembuangan/ outlet dapat dilengkapi dengan pintu klep otomatis dimana pintu ini dapat membuka dan menutup secara otomatis akibat perbedaan tinggi muka air di laut dan di darat. Dengan menggabungkan pompa dan pintu klep otomatis maka kerja pompa tidak terlalu berat dan lebih efisien.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, HZ., Andreas, H., Gumilar, I., 2012, *"Jakarta unified geodetic height reference system: version 2012"* Final Report.
- Deltares, 2011, *"Sobek online help"*, HD Delft the Netherland.
- Department of Environment, Climate Change and Water NSW, 2010, *"Flood risk management guide: Incorporating sea level rise benchmark in flood risk assessments"* NSW Government Australia.
- Karmakar, S., Simonovic, SP., Peck, A., Black, J., , 2010, *"An information system for risk-vulnerability assesment to flood"*, Journal of Geografic Information System, 2010, 129-146.
- Dinas PU Pemprov DKI Jakarta, 2009, *"Review masterplan pengendalian banjir dan drainase provinsi DKI Jakarta"*. Laporan Final.
- Lasmana, Yudi, 2012, *"Evaluasi Kinerja Polder Pluit Skenario Banjir 2007"*, Tesis MPSDA Institut Teknologi Bandung
- Lasmana, Yudi, 2003, *"Laporan praktikum analisis pasang surut"*, ITB.
- Pusat Litbang SDA, 2012, *"Sistem operasi pintu air Jakarta akibat landsubsidence dan kenaikan muka air laut"*. Laporan Kegiatan 2012.
- Pusat Litbang SDA, 2011, *"Analisis muka air laut Jakarta"*, Laporan Kegiatan 2011.
- Report Deltares, Urban Solution, Witteveen+Bos, MLD, Triple A, Pusat Litbang SDA, ITB., 2011, *"Jakarta Coastal Deffence Strategy (JCDS): Atlas pengamanan pantai Jakarta"*, Final Report.
- Report Deltares, Urban Solution, Witteveen+Bos, MLD, Triple A, Pusat Litbang SDA, ITB., 2011, *"Jakarta Coastal Deffence Strategy (JCDS): Agenda"*, Final Report.
- Report Deltares, MLD, ITB, PT. Waindo Specterra, PT. Wiratman & Associates., 2011, *"Upper Citarum Basin flood management volume 2: 1D2D modeling studies"*, Final Report.
- Report Witteveen+Bos, Royal Haskoning, WL Delf Hydraulics, HKV Lijn in Water, Euroconsult Mott McDonald, DHV, MLD, Wiratman & Associates, PT. Waindo SpecTerra, 2007 *"Flood hazard mapping"*, Jakarta Flood Team Indonesia-Netherland Parthnership Final Report.