

**PEMODELAN NUMERIK BANGUNAN SHIPLOCK DALAM RANGKA
PENGURANGAN EMISI CO₂ DI LAHAN GAMBUT
(STUDI KASUS : SEI AHAS)**

**NUMERICAL MODELING OF SHIPLOCK STRUCTURE TO REDUCE CO₂
EMISSION ON PEAT LAND (CASE STUDY: SEI AHAS)**

Nuryanto Sasmito Slamet¹⁾, Dessy Rosliani²⁾

¹⁾Peneliti Pertama Balai Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan
Pusat Litbang Sumber Daya Air, Jl. Ir. H. Juanda No. 193 Bandung

²⁾Staf Inspektorat Jendral, Kementerian Pekerjaan Umum
E-mail: nss_f1@yahoo.com

Diterima: 10 Maret 2014 ; Disetujui: 6 mei 2014

ABSTRAK

Shiplock merupakan salah satu pilihan paling baik untuk mengurangi emisi CO₂ pada lahan gambut karena kemampuannya dalam mempertahankan elevasi muka air sungai namun bisa memenuhi kebutuhan masyarakat dalam memanfaatkan sungai sebagai jalur transportasi. Pemodelan numerik dilakukan untuk mengetahui efek suatu bangunan terhadap hidrodinamika sungai dan stabilitas rencana bangunan yang ada. Pemodelan tersebut dilakukan dengan skenario yang menggambarkan kondisi lapangan yang ada. Skenario pertama dilakukan untuk mengkalibrasi model numerik yang dikembangkan. Skenario optimum dilakukan dengan penambahan pelimpah samping berupa pipa berdiameter 12". Kesahihan suatu model dalam menirukan keadaan lapangan secara visual disajikan dengan penambahan nilai kuantitatif model numerik yang dikembangkan. Bangunan shiplock direncanakan pada tiga lokasi rencana di ruas sungai yang ditinjau. Nilai PBIAS dan RMSE model hasil pengembangan < 10% untuk lokasi 1 dan 2 serta 10% – 15% di lokasi 3. Kenaikkan muka air akibat dari rencana bangunan shiplock dengan menambahkan pelimpah samping mencapai 1,135 m dilokasi 1, 1,39 dilokasi 2, dan 0,395 dilokasi 3. Simulasi stabilitas bangunan shiplock dilakukan dengan dua skenario, yaitu kombinasi cerucuk, pasir dan beton bertulang, serta kombinasi cerucuk, timbunan tanah kerikil, combogrid. Skenario pertama mempunyai angka aman 2,9 dengan waktu konsolidasi 46,14 hari, sedangkan skenario kedua mempunyai angka aman 2,2 dengan waktu konsolidasi 35,48 hari.

Kata kunci: Pemodelan numerik stabilitas, pemodelan hidrodinamika sungai, shiplock, PBIAS, RMSE

ABSTRACT

Shiplock is one of the best solution to reduce CO₂ emission due to its ability to maintain water level at certain level while accomodating the need for transportation route on the other. Numerical modelling was conducted to investigate the river respond due to the structures and structures stability. The scenarios running in the model conducted to replicate actual condition in the field. First scenario is conducted to calibrate the model. Optimum scenario conducted by adding side spillway structures with two 12" pipe. Model evaluation conducted by visual evaluation of the simulated water level and adding with some kuantitatif value in the evaluation. Three shiplock structures are planned in three location of the river. PBIAS and RMSE is used. PBIAS and RMSE < 10% in the first and second location while in the third location is 10% - 15%. Increase of water level due to additon of side spillway is 1,135 m in the first location and 1,39 m in the second location while in the third location is 0,395 m. Stability simulation conducted with two scenarios, which is combination of mini pile from dolken, sand and concrete in the first scenario and mini pile from dolken, soil gravel combination, and combogrid in the second combination. First scenario having safety factor of 2,9 and consolidation time for 46,14 days, while second scenario having safety factor of 2,2 and consolidation time for 35, 48 days.

Keywords: Soil stability modeling, hydrodynamic modeling, shiplock, PBIAS, RMSE

PENDAHULUAN

Tanah gambut menyimpan C yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan tanah mineral. Setiap satu gram gambut kering menyimpan sekitar 180-600 mg karbon, sedangkan setiap satu gram tanah mineral hanya mengandung 5-80 mg karbon. Di daerah tropika, karbon yang disimpan oleh tanah dan tanaman pada lahan gambut bisa 10 kali karbon yang disimpan oleh tanah dan tanaman pada tanah mineral (Agus dan Subiksa, 2008). Lahan gambut mempunyai karakteristik tanah dengan komponen organik tinggi yang berpotensi untuk melepaskan gas CO₂ dengan jumlah yang tinggi pada saat musim kemarau. Untuk mengurangi pelepasan gas CO₂ ke angkasa yang dapat memperburuk efek rumah kaca yang pada akhirnya mempercepat efek perubahan iklim, maka salah satu cara untuk menurunkan emisi gas CO₂ dari lahan gambut adalah dengan mempertahankan ketinggian muka air di lahan gambut (Moore dan Knowles, 1989). Untuk menaikkan muka air gambut pada saat musim kemarau maka diperlukan suatu bangunan yang dapat menahan elevasi muka air tetap tinggi, salah satu bangunan yang diterapkan adalah tanggul. Opsi ini secara teknik akan berbenturan dengan kondisisosial masyarakat di sekitar sungai yang memanfaatkan aliran sungai sebagai sarana transportasi sehari - hari. Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu opsi teknologi yang dapat diterapkan adalah dengan penerapan bangunan *shiplock* pada rencana tanggul.

Bangunan *shiplock* direncanakan berada di sungai Sei Ahas untuk mengurangi pelepasan kadar gas CO₂ ke angkasa dengan cara menahan muka air di saluran pada elevasi tertentu sehingga air tanah di sekitar lokasi *shiplock* dapat dipertahankan pada elevasi tertentu. Dengan mempertahankan muka air tanah yang ada pada lahan gambut, maka pelepasan gas CO₂ dapat ditekan.

METODOLOGI

Pengukuran Debit dengan *Midsection Method*

Secara umum ada tiga metode pengukuran debit yang sering digunakan dalam mengukur debit sungai. Ketiga metode tersebut adalah rerata sederhana, *Midsection Method* (Cara Irisan Tengah), and *Simpson's Parabolic*. Cara irisan tengah merupakan cara yang paling sering digunakan untuk menghitung debit aliran sungai. Prinsip perhitungan yang digunakan mengacu kepada skematisasi Gambar 2. Rumus yang digunakan untuk menghitung debit dengan cara irisan tengah adalah sebagai berikut (SNI 03-2819-1992).

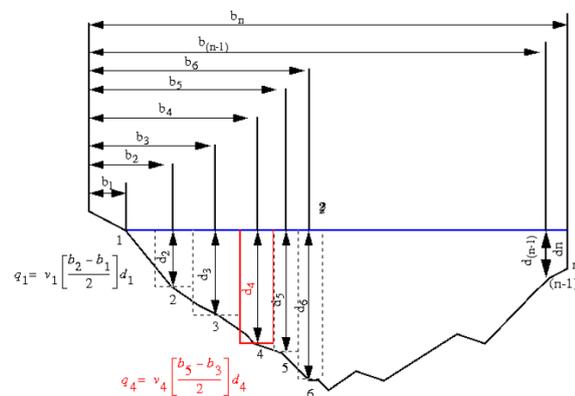
$$q_n = v_{n+1} \frac{b_n + b_{n+1}}{2} d_n \quad 1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad 2)$$

Keterangan:

q_n , Debit irisan ke-n (m³/s)

v_n , kecepatan air rerata pada irisan ke-n (m/s)



Gambar 1 Skematisasi Cara Irisan Tengah Untuk Menghitung Debit

Untuk mendapatkan nilai kecepatan aliran pada masing - masing irisan, maka pengukuran kecepatan harus dilakukan. Pengukuran kecepatan dengan menggunakan peralatan *Current Meter* dilakukan pada tiap-tiap titik dengan dua cara, untuk kedalaman, $h \leq 0,75$ m pengukuran dilakukan satu kali yaitu pada kedalaman 0,6 h, sedangkan untuk kedalaman, $h > 0,75$ m pengukuran dilakukan dua kali yaitu pada kedalaman 0,2 h dan 0,8 h.

Pada saat pengukuran debit, dilakukan juga pengukuran kemiringan muka air yaitu dengan membaca elevasi muka air pada dua penampang yang berbeda dengan jarak antar penampang antara 100 m sampai dengan 500 m. Perhitungan kemiringan muka air ini dilakukan dengan rumus untuk mendapatkan nilai kekasaran dasar sungai/koefisien *Chezy* atau *Manning*.

Pemodelan Numerik Sungai

Pemodelan numerik dimaksudkan untuk mengetahui beberapa parameter berikut ini :

- karakteristik sistem sungai dan respon sungai terhadap skenario peningkatan fungsi sungai,
- ruas-ruas sungai yang mempunyai kecenderungan mengalami kerusakan dan menimbulkan kerugian pada masyarakat,
- usulan bangunan yang akan diterapkan di sungai (lokasi dan desain detail).

Prinsip dasar pemodelan numerik dapat diuraikan sebagai berikut:

Persamaan untuk bagian hidrodinamik adalah persamaan kontinuitas air (*Mike 11, A Modelling System for Rivers and Channels User Guide*):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = q \tag{3}$$

Keterangan:

- Q , debit sungai [m³/s]
- B , lebar sungai [m]
- H , kedalaman air [m]
- Δx , langkah jarak [m]
- Δt , langkah waktu [s]
- q , debit aliran lateral [m/s/m']

Persamaan momentum:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\beta Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gAS_f = 0 \tag{4}$$

Keterangan:

- A , luas basah [m²]
- B , koefisien Bousinesq [-]
- S_f , kemiringan energi [-]
- K , kapasitas pengaliran yang dihitung berdasarkan persamaan Manning = $\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{n}$
- R , jari - jari hidraulik [m]
- P , keliling basah [m]
- n , koefisien Manning [m^{1/3}/s]

Analisis stabilitas lereng dapat dilakukan dengan metode limit equilibrium dengan metode irisan dan reduksi kuat geser dengan elemen batas. Secara umum konsep faktor keamanan dalam analisis stabilitas lereng dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$FK_S = \frac{\bar{\tau}}{\tau} \tag{5}$$

Keterangan:

- τ , tegangan geser di sepanjang bidang runtuh potensial
- $\bar{\tau}$, kuat geser tanah rata-rata
- FK_S , faktor keamanan lereng yang tergantung pada kekuatan

Limit Equilibrium Dengan Metode Irisan

Analisis stabilitas dengan metode irisan dapat dijelaskan dengan menggunakan gambar dibawah. Busur AC menggambarkan bidang gelincir coba-coba. Tanah di atas bidang gelincir tersebut dibagi menjadi beberapa irisan vertikal yang lebar irisannya tidak harus sama. Pada gambar berikut ditunjukkan gaya-gaya yang

bekerja pada irisan tipikal (irisn ke-n). W_n adalah berat irisan. Reaksi R memiliki gaya-gaya N_r dan T_r sebagai komponen normal dan tangensial. P_n dan P_{n+1} adalah gaya normal. Gaya-gaya geser adalah T_n dan T_{n+1} . Tekanan air pori dianggap 0. Gaya-gaya P_n , P_{n+1} , T_n , dan T_{n+1} sukar ditentukan. Tetapi P_n dan T_n didekati dengan mengasumsikan bahwa resultan P_n dan T_n sama besar dengan resultan P_{n+1} dan T_{n+1} , dan garis kerjanya sama.

Dari keseimbangan:

$$N_r = W_n \cos \alpha_n \tag{6}$$

Tahanan geser dinyatakan sebagai:

$$T_r = \tau_d (\Delta L_n) = \frac{\tau_f (\Delta L_n)}{FK_S} = \frac{1}{FK_S} [c + \sigma \tan \phi] \cdot \Delta L_n \tag{7}$$

Tegangan normal σ dari persamaan diatas sama dengan:

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tag{8}$$

Dari prinsip keseimbangan, momen penggerak di O sama dengan momen penahan di O, atau:

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{FK_S} \left(c + \frac{W_n \sin \alpha_n \tan \phi}{\Delta L_n} \right) (\Delta L_n) (r) \tag{9}$$

atau:

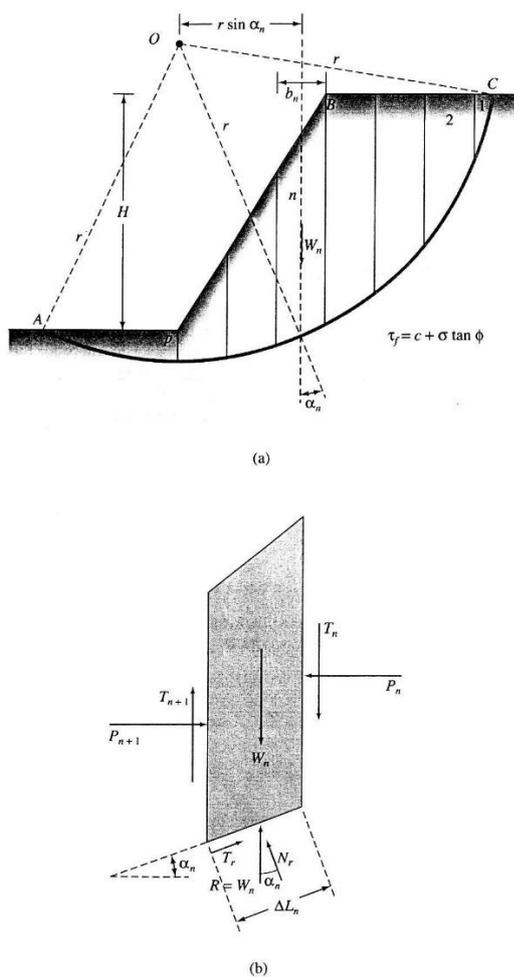
$$FK_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \tag{10}$$

Catatan: $\frac{\Delta L_n}{(b_n) / (\cos \alpha_n)}$ dari persamaan di atas tepat sama dengan $(b_n) / (\cos \alpha_n)$, dimana b_n = lebar irisan ke-n.

Nilai α_n bisa positif atau negatif. Bernilai positif bila lereng busur berada pada kuadran yang sama dengan lereng tanah. Untuk mendapatkan nilai faktor keamanan lereng yang minimum, harus mencoba-coba beberapa kali perhitungan dengan mengubah posisi pusat lingkaran coba-coba tersebut.

Lereng yang ditunjukkan pada gambar berikut adalah lereng homogen. Pada lereng dengan tanah berlapis-lapis, nilai c dan ϕ berbeda-beda. Persamaan diatas tetap dapat digunakan dengan mengganti nilai c dan ϕ sesuai lapisan tanahnya. Cara analisisnya tetap sama.

Gambar analisis stabilitas dengan metode irisan biasa; (a) bidang gelincir coba-coba; (b) gaya-gaya yang bekerja pada irisan ke-n. Skematisasi metode ini dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 Skema Perhitungan Analisa Stabilitas Lereng dengan Metode Irisan

Reduksi Kuat Geser dengan Elemen Batas

Reduksi ϕ -c merupakan pilihan yang tersedia dalam PLAXIS untuk menghitung factor keamanan. Pilihan ini dapat dipilih sebagai Jenis perhitungan yang terpisah dalam lembar-tab umum. Dalam pendekatan reduksi ϕ -c, parameter kekuatan $\tan \phi$ dan c dari tanah selanjutnya akan direduksi hingga keruntuhan tercapai. Kekuatan antar muka, jika digunakan, juga akan direduksi dengan cara yang sama. Kekuatan obyek struktural seperti pelat dan jangkar tidak dipengaruhi oleh reduksi ϕ -c.

Faktor pengali total ΣMsf digunakan untuk mendefinisikan parameter kekuatan tanah pada suatu tahapan tertentu dalam analisis, yaitu :

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \phi_{\text{masuk}}}{\tan \phi_{\text{tereduksi}}} = \frac{C_{\text{masuk}}}{C_{\text{tereduksi}}}$$

parameter kekuatan dengan notasi bawah (subscript) 'masuk' mengacu pada sifat yang dimasukkan dalam kumpulan data material dan

notasi atas (*superscript*) 'reduksi' mengacu pada nilai yang direduksi yang digunakan dalam analisis. Nilai ΣMsf diatur ke 1.0 pada awal perhitungan agar seluruh kekuatan material diatur ke nilai yang belum direduksi.

Perhitungan reduksi ϕ -c dilakukan dengan prosedur peningkatan beban jumlah langkah. Peningkatan faktor pengali Msf digunakan untuk menentukan peningkatan dari reduksi kekuatan dari langkah perhitungan pertama. Peningkatan ini secara pra-pilih diatur ke 0.1, yang umumnya merupakan nilai awal yang memadai. Parameter kekuatan selanjutnya akan direduksi secara otomatis hingga seluruh langkah tambahan telah digunakan. Secara pra-pilih, jumlah langkah tambahan adalah 30, tetapi nilai yang lebih besar hingga 1000 dapat digunakan jika memang diperlukan. Harus selalu diperiksa apakah langkah terakhir telah sepenuhnya menghasilkan mekanisme keruntuhan. Jika hal ini terjadi, maka faktor keamanan yang diberikan adalah :

$$FK = \frac{\text{Kekuatan yang tersedia}}{\text{Kekuatan saat runtuh}} = \text{nilai } \Sigma Msf \text{ saat runtuh}$$

Jika mekanisme keruntuhan belum sepenuhnya terbentuk, maka perhitungan harus diulang kembali dengan jumlah langkah tambahan yang lebih besar. Untuk mendapatkan keruntuhan dari massa tanah secara akurat, diperlukan penggunaan kontrol panjang busur dalam prosedur iterasi. Toleransi kesalahan yang digunakan juga tidak boleh lebih dari 3%. Kedua syarat ini telah terpenuhi jika digunakan pengaturan standar untuk prosedur iterasi.

Saat menggunakan kombinasi reduksi ϕ -c dengan model tanah tingkat lanjut, model ini akan berperilaku secara aktual sebagai model Mohr-Coulomb standar, karena perilaku kekakuan yang tergantung pada kondisi tegangan serta efek hardening tidak ikut diperhitungkan. Modulus kekakuan yang bergantung pada tegangan (modulus ini digunakan dalam model tingkat lanjut) pada akhir dari perhitungan sebelumnya digunakan sebagai modulus kekakuan yang konstan dalam perhitungan

Pendekatan reduksi ϕ -c pada dasarnya menyerupai metode perhitungan faktor keamanan konvensional yang digunakan dalam analisis lingkaran gelincir.

Data

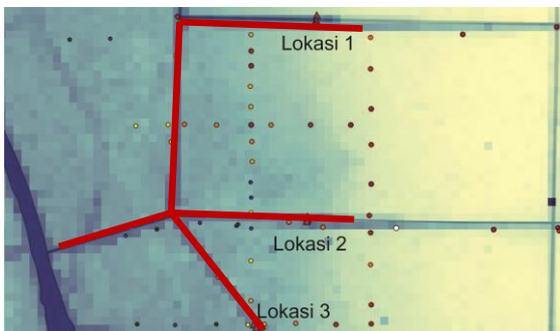
Lokasi Studi

Saluran Sei Ahas merupakan salah satu anak sungai Kapuas yang terletak di Kalimantan Tengah. Sungai ini berada pada lahan gambut dengan lebar sungai bervariasi antara 4 hingga 7 meter pada

bagian palung sungai dan mencapai lebar 20 meter pada bagian bantaran sungainya. Secara hidraulik sungai ini mengalami pasang – surut pada bagian muara yang masuk ke sungai Kapuas mengikuti fluktuasi muka air di sungai. Angkutan sedimen yang ada di Sei Ahas sebagian besar merupakan debris dari sisa tumbuhan.

Pemodelan numerik sungai dapat memproyeksikan akibat dari rencana suatu konstruksidengan mempertimbangkan beberapa parameter dan kondisi ekstrim di lapangan. Kondisi ekstrim yang akan dihadapi dilapangan ini kemungkinan kecil terjadi, namun demikian kegagalan sistem dan struktur yang direncanakan sering terjadi akibat dari kesalahan dalam memperkirakan kondisi ekstrim dilapangan. Dengan pemodelan numerik yang akurat serta dapat memproyeksikan kondisi ekstrim yang akan dihadapi di lapangan, maka kemungkinan kerusakan sistem dan struktur bangunan yang direncanakan dapat diminimalkan. Pada akhirnya kemungkinan kerugian akibat dari kesalahan dalam memperkirakan kondisi yang akan dihadapi di lapangan dapat dikurangi.

Penilaian model numerik secara kuantifikasi diperlukan untuk dapat mengetahui tingkat kesahihan model numerik yang dikembangkan. Kesahihan model yang dikembangkan sangat diperlukan untuk mengetahui keakuratan model terhadap kondisi lapangan yang ada sehingga desain dan skenario yang dilaksanakan selanjutnya dapat mendekati kondisi lapangan sebenarnya. Denah lokasi pemodelan numerik dan skematisasi model dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Data DEM dan Skematisasi Model Numerik pada Lokasi Rencana *Shiplock*

Data Debit dan Muka Air

Pengukuran kecepatan aliran dan elevasi muka air dilaksanakan selama periode tanggal 1 – 2 Juni dan 6 – 8 Juni 2012, serta 1 – 2 Oktober dan 8 – 9 Oktober 2012. Pengukuran dilaksanakan dalam rentang waktu satu jam secara simultan di ketiga lokasi rencana *shiplock* yang direncanakan. Pengukuran dilaksanakan sesuai SNI 03-2414-

1991 dan SNI 03-2819-1992. Data hasil pengukuran ini digunakan sebagai bahan masukan dalam model numerik sungai yang dikembangkan. Pada lokasi pertemuan sungai Sei Ahas dengan Sungai Kapuas dilakukan pengukuran elevasi muka air untuk mengetahui pengaruh dari perubahan kenaikan muka air sungai Kapuas terhadap sistem sungai Sei Ahas.

KAJIAN PUSTAKA

Perhitungan kuantitatif kemampuan model numerik sungai yang dikembangkan dilakukan dengan menghitung nilai *Percent Bias* (PBIAS) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) (Nash et al, 1970, Sorooshian et al, 1993). Perhitungan PBIAS dilakukan dengan menggunakan rumus berikut ini,

$$PBIAS (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} * 100 \quad (11)$$

Perhitungan RMSE dilakukan dengan menggunakan rumus berikut ini,

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(S_i - O_i)]^{1/2} \quad (12)$$

S_i adalah hasil simulasi (debit dan muka air) tiap satuan waktu dan O_i adalah hasil pengukuran (debit dan muka air). N adalah jumlah sampel selama periode simulasi. Secara umum nilai PBIAS dan RMSE yang kecil (mendekati 0) menunjukkan kemampuan model yang dikembangkan dapat menirukan kondisi lapangan dengan sangat bagus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemodelan Numerik Hidraulika Sungai

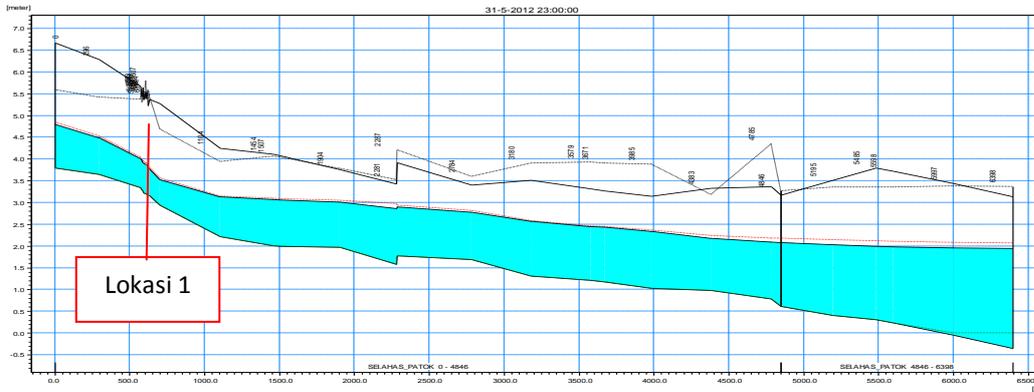
Pemodelan numerik dilaksanakan dengan data masukan berupa perubahan debit seiring waktu sebagai kondisi batas udik, serta perubahan muka air seiring waktu sebagai kondisi batas hilir. Data perubahan debit dan muka air seiring waktu merupakan data hasil pengukuran di tiga titik lokasi rencana *shiplock* yang dicatat tiap jam pada periode 31 Mei 2012, 1 Juni 2012, dan 6 – 8 Juni 2012. Skematisasi sistem sungai yang ada (gambar 3), digunakan dalam pembuatan network sungai di model Mike 11. Sistem sungai yang dimodelkan berupa tiga buah saluran yang bertemu menjadi satu ruas sungai di dekat lokasi *shiplock* 3.

Sebagai parameter kalibrasi, perubahan debit dan muka air di lokasi pencatatan hasil pemodelan numerik sungai Sei Ahas diekstraksi dari hasil simulasi model numerik dan dibandingkan dengan hasil pengukuran. Hasil pemodelan numerik Sungai Sei Ahas dijabarkan

dalam beberapa bagian berikut ini yang disusun urut berdasarkan skenario pemodelan yang telah dilaksanakan. Penyajian hasil dilakukan secara visual dalam bentuk grafik dan secara kuantitatif dalam bentuk nilai PBIAS dan RMSE.

Skenario ini dilakukan untuk dapat memberikan gambaran kondisi awal sungai Sei Ahas sebelum ada bangunan *shiplock*. Skenario eksisting lapangan menunjukkan bahwa elevasi

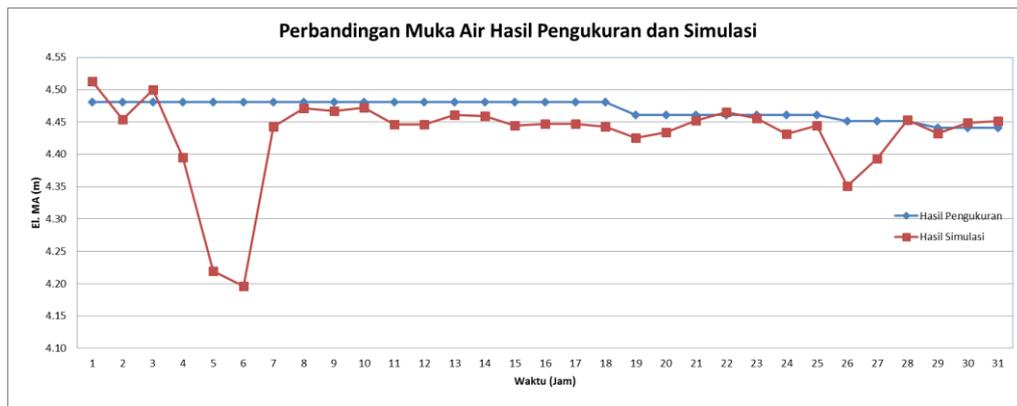
dasar saluran Sei Ahas lebih tinggi daripada elevasi saluran utama yang bermuara ke Sungai Kapuas. Perbedaan elevasi yang ada mengakibatkan pengaruh perubahan muka air di sungai Kapuas sangat kecil terhadap kenaikan muka air di lokasi rencana *shiplock*. Hasil pemodelan numerik profil muka air Sungai Sei Ahas dapat dilihat pada Gambar 4, 5 dan 6.



Gambar 4 Profil Muka Air Hasil Pemodelan Numerik di Lokasi Rencana *Shiplock* 1



Gambar 5 Perbandingan Debit Hasil Pengukuran dan Simulasi di Lokasi Rencana *Shiplock* 1



Gambar 6 Perbandingan Muka Air Hasil Pengukuran dan Simulasi di Lokasi Rencana *Shiplock* 1

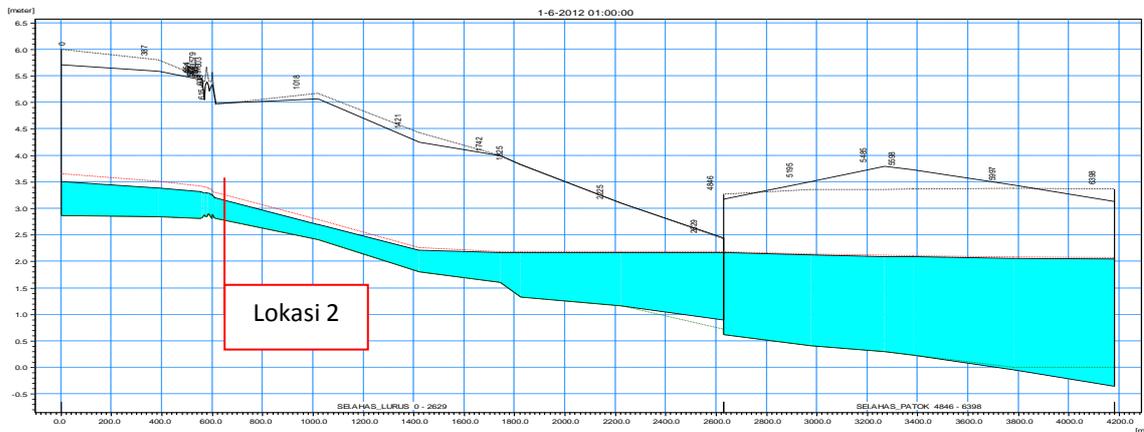
Hasil perbandingan muka air dan debit di lokasi pertama menunjukkan adanya korelasi yang baik antara kondisi lapangan dengan model numerik yang dikembangkan (Gambar 5 dan 6). Pada permulaan simulasi terjadi perbedaan yang cukup besar antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi dikarenakan oleh kondisi awal model yang sedang mencari keseimbangan. Kondisi ini akibat dari *initial condition* model numerik yang dijalankan baru dalam tahapan *routing* perhitungan data kondisi batas yang digunakan. Hasil perbandingan debit di lokasi satu menunjukkan kemampuan model numerik yang dikembangkan dapat menirukan kondisi lapangan yang ada. Secara visual model numerik yang dikembangkan dapat menggambarkan kondisi lapangan dengan baik. Simpangan elevasi muka air yang terjadi antara 1 hingga 30 cm, dengan simpangan lebih dari 5 cm hanya terjadi pada 4 tahapan waktu. Rerata simpangan hasil simulasi elevasi muka air terhadap elevasi muka air hasil pengukuran sebesar 4 cm.

Untuk mengetahui kemampuan model numerik yang dikembangkan secara kuantitatif,

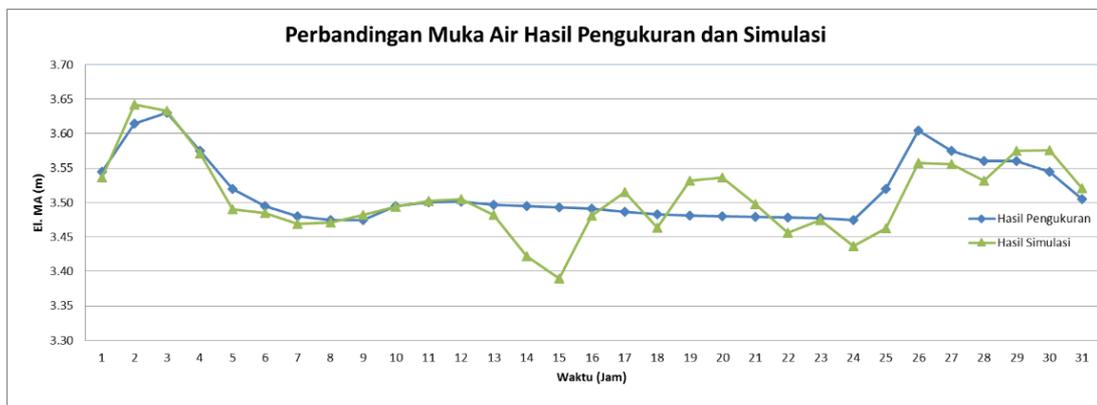
maka perhitungan nilai PBIAS dan RMSE dilakukan. Hasil perhitungan nilai PBIAS dan RMSE dilakukan untuk mengetahui kemampuan model numerik dalam menirukan parameter debit dan muka air hasil simulasi. Hasil perhitungan nilai PBIAS sebesar -1,6% dengan nilai RMSE sebesar 0,005 untuk parameter debit. Sedangkan nilai PBIAS dan RMSE untuk muka air adalah sebesar 0,94% dan 0,12. Pada lokasi satu, model yang dikembangkan dapat menirukan kondisi lapangan dengan sangat bagus, hal ini terlihat dari grafik respon model untuk parameter debit dan muka air serta nilai PBIAS dan RMSE yang kecil.

Analisis serupa dilakukan untuk mengetahui respon model numerik dalam menirukan kondisi lapangan untuk lokasi rencana *shiplock 2*. Berikut adalah hasil simulasi lokasi rencana *shiplock 2*.

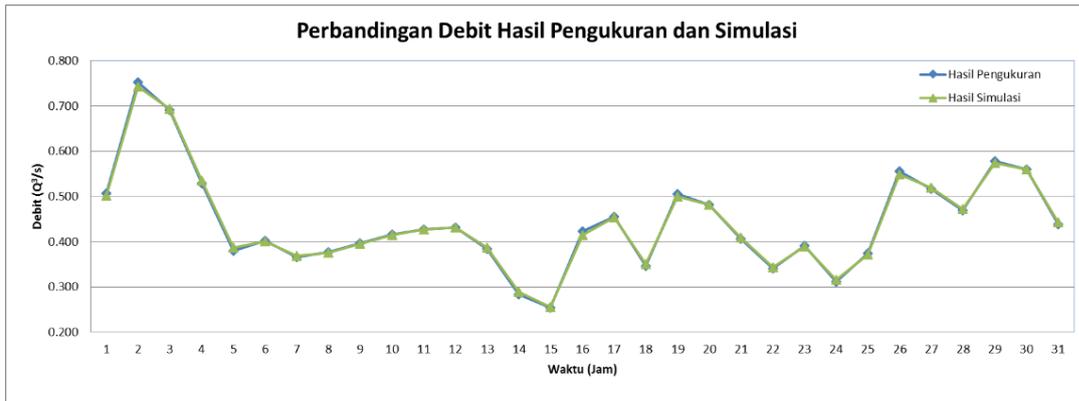
Hasil disampaikan pada gambar 7, 8 dan 9. Profil muka air hasil simulasi menunjukkan pengaruh perubahan muka air di muara sungai Sei Ahas tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan muka air di lokasi *shiplock 2* (Gambar 7).



Gambar 7 Profil Muka Air Hasil Pemodelan Numerik di Lokasi Rencana *Shiplock 2*



Gambar 8 Perbandingan Muka Air Hasil Pengukuran dan Simulasi di Lokasi Rencana *Shiplock 2*



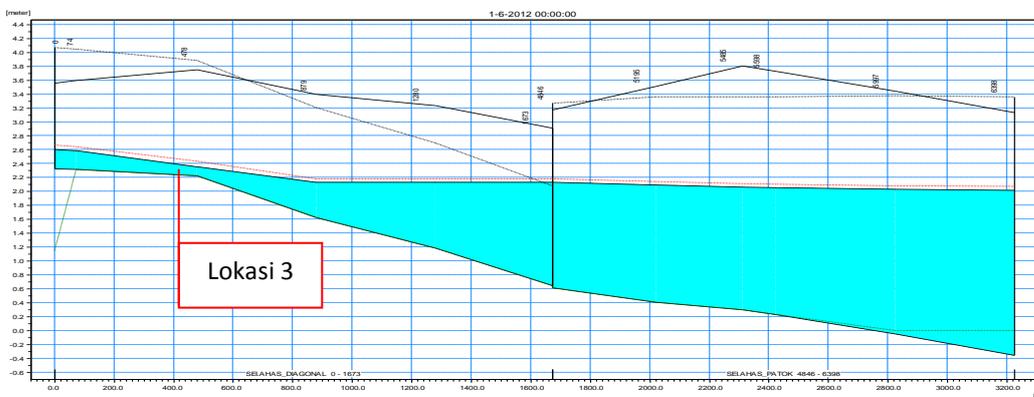
Gambar 9 Perbandingan Debit Hasil Pengukuran dan Simulasi di Lokasi Rencana *Shiplock 2*

Hasil perbandingan muka air dan debit di lokasi kedua menunjukkan adanya korelasi yang baik antara kondisi lapangan dengan model numerik yang dikembangkan (Gambar 8 dan 9). Grafik debit dan muka air diatas menunjukkan perubahan debit dan muka air lokasi dua yang variatif. Terlihat perubahan debit yang terjadi mengakibatkan perubahan muka air secara langsung, kondisi ini berbeda dengan lokasi satu ketika perubahan debit tidak terlalu mempengaruhi perubahan muka air. Perbandingan muka air di lokasi dua menunjukkan kemampuan model numerik dalam menirukan kondisi lapangan. Terlihat pola kenaikan muka air dapat ditirukan dengan baik oleh model yang dikembangkan. Namun demikian terlihat kekurangan model yang dikembangkan dalam menirukan nilai muka air secara tepat. Hasil perbandingan debit di lokasi 2 menunjukkan model yang dikembangkan dapat menirukan fenomena lapangan dengan sangat baik.

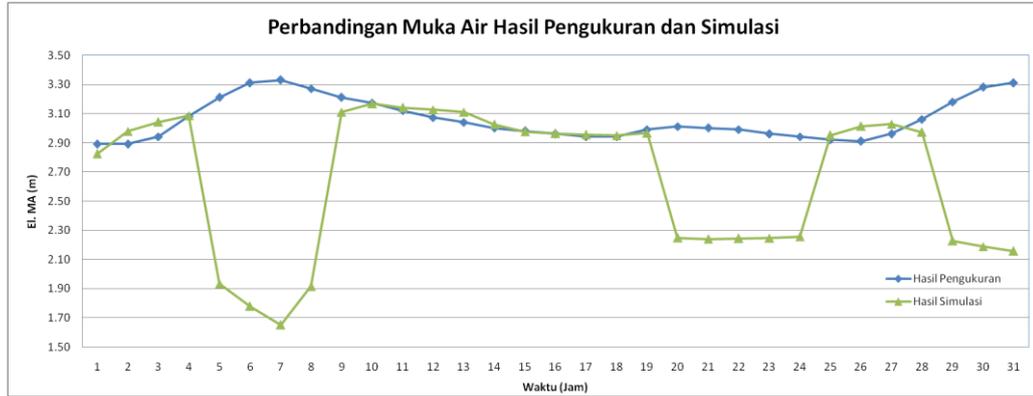
Simpangan elevasi muka air yang terjadi antara 1 hingga 10 cm, dengan simpangan lebih dari 5 cm hanya terjadi pada 4 tahapan waktu. Rerata simpangan hasil simulasi elevasi muka air terhadap elevasi muka air hasil pengukuran sebesar 1 cm. Nilai ini menunjukkan bahwa kesalahan rerata model yang dikembangkan pada lokasi *shiplock 2* sebesar 1 cm dari kondisi lapangan yang terjadi.

Hasil perhitungan nilai PBIAS sebesar 0,008% dengan nilai RMSE sebesar 0,004 untuk parameter debit. Sedangkan nilai PBIAS dan RMSE untuk muka air adalah sebesar 1,8% dan 0,047. Pada lokasi dua model yang dikembangkan dapat menirukan kondisi lapangan dengan sangat baik, hal ini terlihat dari grafik respon model untuk parameter debit dan muka air serta nilai PBIAS dan RMSE yang sangat kecil.

Hasil analisis pada lokasi rencana *shiplock 3* dapat dilihat pada bagian berikut ini.



Gambar 10 Profil Muka Air Hasil Pemodelan Numerik di Lokasi Rencana *Shiplock 3*



Gambar 11 Perbandingan Muka Air Hasil Pengukuran dan Simulasi diLokasi Rencana Shiplock3



Gambar 12 Perbandingan Debit Hasil Pengukuran dan Simulasi diLokasi Rencana Shiplock3

Hasil perbandingan muka air dan debit di lokasi ketiga menunjukkan adanya korelasi yang baik antara kondisi lapangan dengan model numerik yang dikembangkan (Gambar 11 dan 12). Hasil perbandingan debit di lokasi tiga menunjukkan model yang dikembangkan dapat menirukan fenomena lapangan dengan sangat baik. Namun demikian, parameter muka air kurang dapat ditirukan dengan baik oleh model yang dikembangkan. Terlihat terjadinya ketidakcocokan antara model dengan hasil pengukuran pada tiga bagian di grafik muka air. Hal ini kemungkinan besar akibat dari lokasi tiga yang berdekatan dengan muara ke Sungai Kapuas sehingga fluktuasi muka air Sungai Kapuas sangat mempengaruhi muka air di lokasi rencana tiga (Gambar 9). Fenomena ini memperlihatkan kemampuan model numerik yang dikembangkan kurang dapat menirukan fenomena pasang surut yang terjadi sehingga respon model yang dikembangkan mengalami distorsi.

Simpangan elevasi muka air yang terjadi antara 1 hingga 1,68 m, dengan simpangan lebih dari 50 cm terjadi pada 12 tahapan waktu. Rerata simpangan hasil simulasi elevasi muka air terhadap elevasi muka air hasil pengukuran sebesar 40 cm.

Hasil perhitungan nilai PBIAS sebesar -2,44 % dengan nilai RMSE sebesar 0,01 untuk parameter debit. Sedangkan nilai PBIAS dan RMSE untuk muka air adalah sebesar 13,97 % dan 0,73. Pada lokasi tiga model yang dikembangkan dapat menirukan kondisi lapangan dengan cukup baik, hal ini terlihat dari grafik respon model untuk parameter debit serta nilai PBIAS dan RMSE yang kecil.

Rekapitulasi nilai PBIAS dan RMSE hasil kalibrasi model numerik sungai Sei Ahas pada lokasi 1, 2, dan 3 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Resume Nilai PBIAS dan RMSE Hasil Kalibrasi Model

Lokasi	PBIAS (%)		RMSE	
	Debit	Muka Air	Debit	Muka Air
1	-1,6	0,94	0,005	0,117
2	0,008	1,8	0,004	0,04
3	-2,44	13,97	0,01	0,73

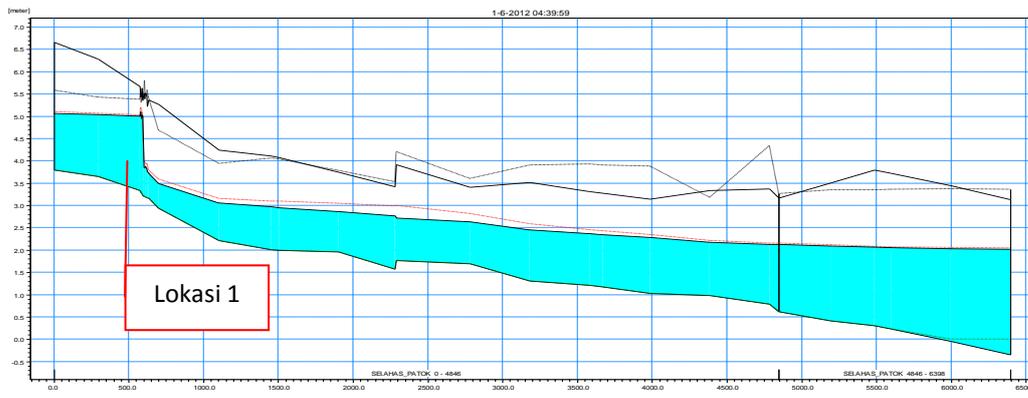
Hasil simulasi model numerik memenuhi kriteria sangat bagus apabila nilai PBIAS < 10 %, bagus 10 - 15 %, cukup 15 - 25 % dan tidak bagus > 25 % (Moriassi et al, 2007). Berdasarkan atas klasifikasi diatas maka model numerik yang

dikembangkan mempunyai klasifikasi sangat bagus untuk lokasi 1 dan 2, serta bagus untuk lokasi 3. Untuk tahapan selanjutnya maka model yang sudah dikalibrasi ini akan digunakan untuk mensimulasikan skenario berikutnya.

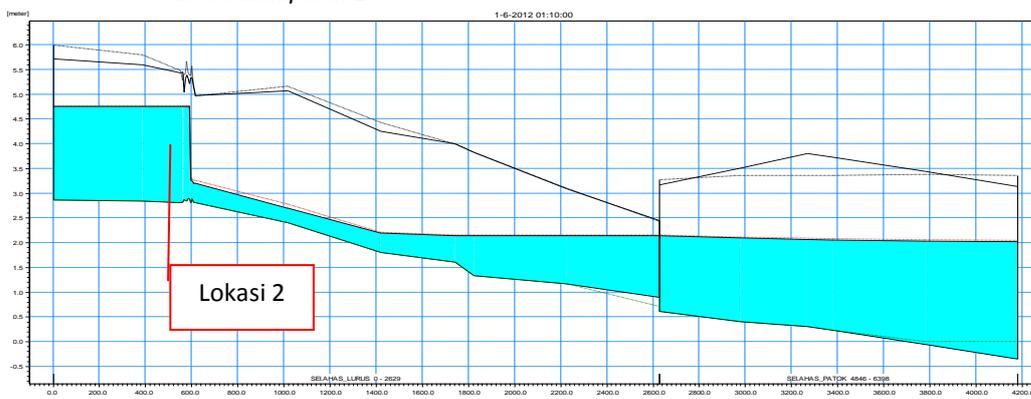
Skenario optimum dijalankan untuk memberikan gambaran kondisi sungai Sei Ahas setelah ada bangunan *shiplock* ketika musim kemarau dimana pintu air lebih sering dalam kondisi tertutup untuk menjaga muka air udik sungai Sei Ahas tetap tinggi namun masih dapat

mengalirkan debit air yang ada ke hilir tanpa melimpasi tanggul. Berikut hasil pemodelan skenario optimum dari pemodelan sungai Sei Ahas.

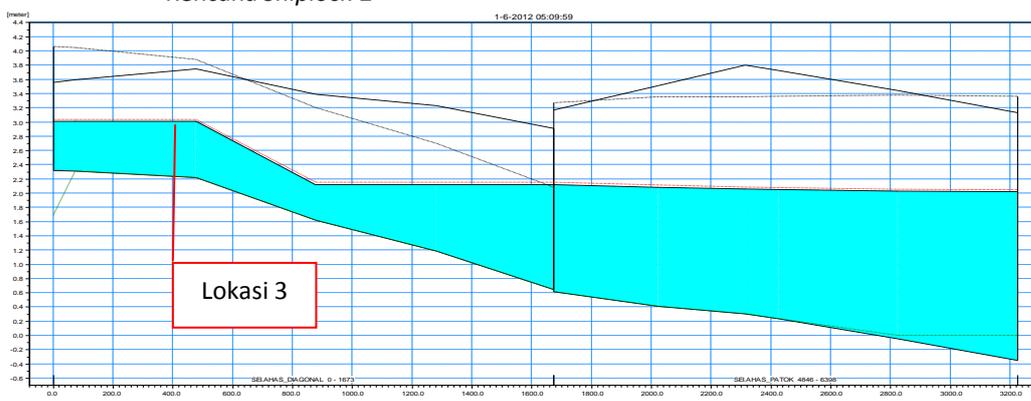
Hasil simulasi menunjukkan kenaikan muka air di lokasi rencana *shiplock* bervariasi dari 0,4 m hingga 1,4 m (Gambar 13, 14 dan 15). Kondisi yang terjadi dalam simulasi perubahan kenaikan muka air pada lokasi rencana *shiplock* digunakan untuk mensimulasikan struktur bangunan *shiplock* yang direncanakan.



Gambar 13 Profil Muka Air Hasil Pemodelan Numerik dengan Skenario Optimum di Lokasi Rencana *Shiplock* 1



Gambar 14 Profil Muka Air Hasil Pemodelan Numerik dengan Skenario Optimum di Lokasi Rencana *Shiplock* 2



Gambar 15 Profil Muka Air Hasil Pemodelan Numerik dengan Skenario Optimum di Lokasi Rencana *Shiplock* 3

Pemodelan Numerik Stabilitas Bangunan Shiplock

- a) Analisa pondasi rencana *shiplock* menggunakan 2 alternatif yang berbeda untuk dapat memberikan alternatif sesuai dengan material yang ada di lapangan, yaitu :Cerucuk dengan panjang minimal, L min, 15 meter, tanah mengandung kerikil yang ditumbuk, lapisan beton bertulang serta tanah mengandung kerikil.
- b) Cerucuk dengan panjang minimal, L min, 8 meter dan 6 meter, tanah mengandung kerikil yang ditumbuk, combogrid, tanah mengandung kerikil, combogrid serta tanah mengandung kerikil.

Analisis Stabilitas: Titik Ekstrim di Lokasi 1

Analisa menggunakan kondisi ekstrim pada lokasi 1 dikarenakan pada lokasi 1, hasil penyelidikan tanah tidak lengkap serta mempunyai parameter tanah yang paling buruk diantara lokasi yang lain (Tabel 2). Desain *shiplock* yang dikembangkan merupakan desain tipikal yang berlaku untuk ketiga lokasi yang direncanakan.

Skenario 1: Cerucuk dengan Beton Bertulang

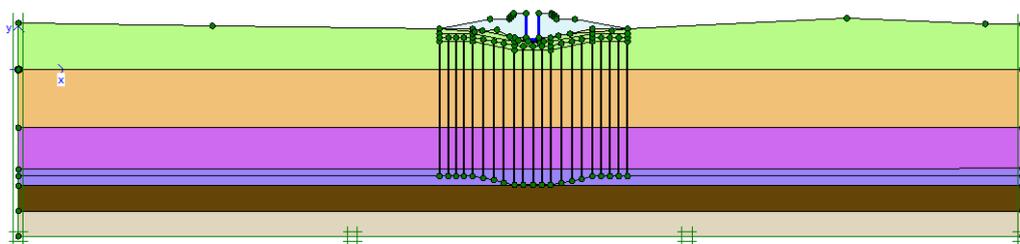
Dengan menggunakan parameter tanah pada lokasi 1, maka dilakukan analisis stabilitas menggunakan program Plaxis. Skematisasi pemodelan dan hasil simulasi stabilitas bangunan dapat dilihat pada Gambar 16, 17 dan 18.

Dari hasil analisis diketahui bahwa dengan menggunakan perkuatan cerucuk kayu dengan panjang 15 meter dan beton bertulang didapatkan nilai SF = 2,9830 ≥ 2,5 (struktur aman akibat deformasi) dengan membutuhkan waktu konsolidasi akibat pembebanan selama 46,14 hari.

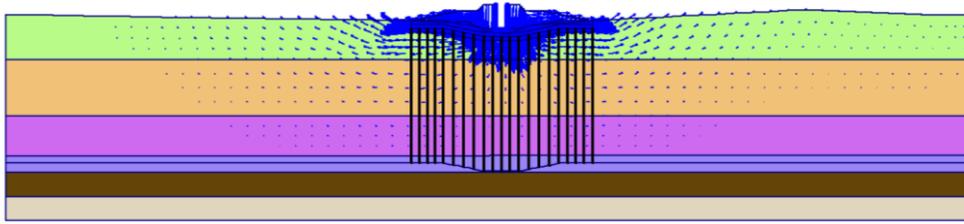
Sebelum dipasang perkuatan *excess pore water pressure* menyebabkan tanah bersifat jenuh, merata tersebar pada setiap lapisan tanah. Setelah dipasang perkuatan *pore water pressure* berubah terkonsentrasi pada ujung cerucuk tidak terlihat adanya perlawanan *pore water pressure* pada pondasi beton dan pasir dibawah *shiplock*.Kemungkinan terjadi deformasi setelah dipasang perkuatan yaitu terjadi pada timbunan dekat pintu shiploks dan dasar shiploks (deformasi setempat).

Tabel 2 Parameter Tanah di Lokasi 1

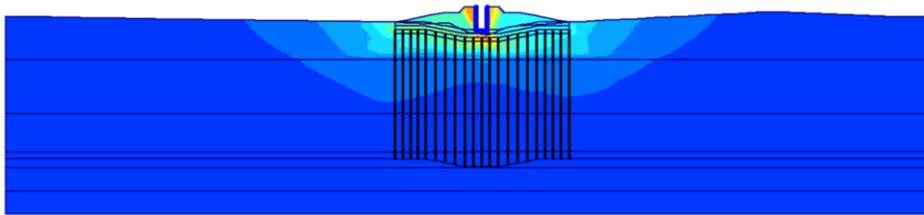
Kedalaman (m)	N-SPT (Kerelasi)	qc (Kg/cm ²)	Konsistensi	Klasifikasi	γsat (kN/m ²)	γd (kN/m ²)	Φ (°)	C (kN/m ²)	E (kPa)
0,0 – 5,0	2,0	0,5 – 5,0	Sangat Lunak	Sandy Clay (CL) / Peat (Pt)	15	10,5	21	15,5	1000
5,0 - 7,0	4,0	5,0 – 6,5	Lunak	Sandy Clay (CL)	18,5	12,0	17,5	28,5	2500
7,0 – 12,0	10,0	7,0 – 25,0	Lunak	Sandy Clay (CL)	17,0	11,0	22,0	65,0	6500
12,0 – 14,0	27,0	35,0 – 40,0		Clay (CH)	17,5	12,0	15,0	190,0	22500
14,0 – 17,0	31,0	50,0 - 55,0		Sandy Clay (CL)	18,5	17,0	23,0	250,0	31000
>17,0	35	65,0 – 75,0		Clay Sand (SC)	19,5	19,5	31,0	350,0	35000



Gambar 16 Geometri Lokasi 1 Dengan Perkuatan Cerucuk dan Beton Bertulang.



Gambar 17 Total stress Lokasi 1 Dengan Perkuatan Cerucuk dan Beton Bertulang



Gambar 18 Total increment Lokasi 1 Dengan Perkuatan Cerucuk dan Beton Bertulang.

Skenario 2 : Cerucuk dengan Geotekstil

Pada skenario 2 pondasi direncanakan menggunakan cerucuk dengan panjang minimal 8 meter dan diameter ujung tiang 10 cm pada timbunan dan di bawah pintu *shiplock* dengan jarak antar tiang 25 cm, sedangkan cerucuk dengan panjang minimal 6 meter dan diameter ujung tiang 10 cm dipasang pada daerah ujung timbunan dengan jarak antar tiang 50 cm. Cerucuk diberi tambahan perkuatan combogrid (geogrid dan geotekstil) karena gabungan keduanya dapat memperkuat daya dukung tanah. Skematisasi pemodelan dapat dilihat pada gambar 19.

Geotekstil tidak dapat menghilangkan penurunan setempat akibat pembebanan air, timbunan dan *shiplock*. Geogrid memiliki kekakuan yang lebih besar dari geotekstil dan diikat pada cerucuk kayu. Untuk menambah daya dukung diberi 3 lapisan tanah timbunan mengandung kerikil, masing-masing setebal 0,5 m. Selain itu, tanah timbunan mengandung kerikil ini dimaksudkan sebagai drainase. Cerucuk digunakan sebagai pondasi dari *shiplock* sebagai perkuatan daya dukung tanah akibat pembebanan *shiplock*, timbunan dan air. Apabila cerucuk tidak cukup panjang dapat disambung. Caranya dengan panjang dapat disambung. Caranya dengan mengupas kulit ari cerucuk dan dipotong sesuai dengan lampiran gambar, kemudian dikaitkan dikuatkan sambungan antar kayu menggunakan pelat besi dan baut di kedua sisi pelat. Pada permukaan, pelat ini digunakan untuk mengikat kayu dengan besi sebelum di cor dengan beton atau diikat pada geogrid.

Pada lapisan ke-2 dipasang combogrid (geotekstil dan geogrid). Geotektil pada lapisan

ke-2 ini berfungsi untuk menambah daya dukung tanah dan pengikat cerucuk. Geogrid secara umum berfungsi sebagai perkuatan, pemerataan sebaran beban dan stabiliasi tanah. Geogrid bersifat lebih tahan air dibandingkan dengan geotekstil.

Pada lapisan ke-1 dipasang geotekstil yang berfungsi untuk meningkatkan daya dukung tanah akibat pembebanan *shiplock* dan timbunan. Geotekstil yang digunakan adalah jenis geotekstil woven karena memiliki fungsi sebagai stabiliasi tanah dasar (terutama tanah dasar lunak atau gambut). Geotektil woven ini tahan terhadap sinar UV, reaksi kimia tanah, jamur dan serangga. Kekurangan geotektil woven ini adalah tidak dapat mereduksi terjadinya penurunan setempat (*differential settlement*) yang dapat dilihat dari hasil analisis stabilitas menggunakan program Plaxis yaitu adanya kemungkinan terjadinya penurunan setempat dibawah *shiplock*. Kekurangan geotekstil ini dapat ditutup dengan penggunaan geogrid dan cerucuk. Hasil simulasi stabilitas bangunan dapat dilihat pada gambar 20 dan gambar 21.

Pasir tumbukan bertujuan untuk memperkuat daya dukung tanah dan memperkuat ikatan cerucuk. Pasir antar lapisan geotektil bertujuan untuk memperkuat daya dukung tanah dan berfungsi sebagai drainase.

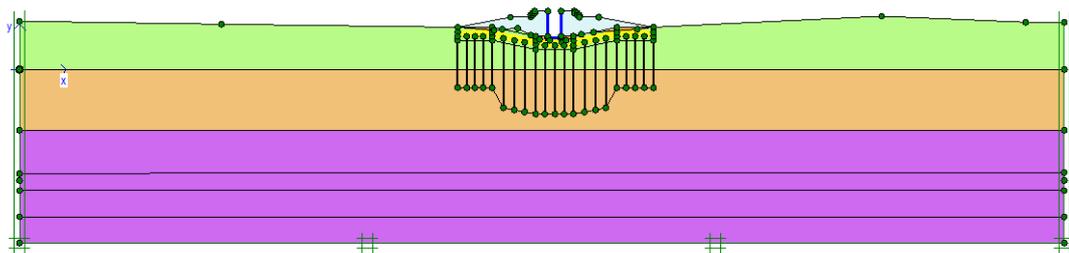
Dari hasil analisis diketahui bahwa dengan menggunakan perkuatan cerucuk kayu dengan panjang 8 meter dan beton bertulang didapatkan nilai $SF = 2,2193 < 2,5$ (struktur aman kritis kemungkinan mengalami deformasi) dengan membutuhkan waktu konsolidasi akibat pembebanan selama 35,48 hari.

Sebelum dipasang perkuatan tanah bersifat jenuh, merata tersebar pada setiap lapisan tanah. Setelah dipasang perkuatan, *pore water pressure* berubah terkonsentrasi pada cerucuk, terlihat adanya perlawanan *pore water pressure* pada pondasi geotekstil dan geogrid dibawah *shiplock* serta pada timbunan. Kemungkinan terjadi deformasi setelah dipasang perkuatan yaitu terjadi pada timbunan dekat pintu shiploks dan dasar *shiplock* (deformasi setempat).

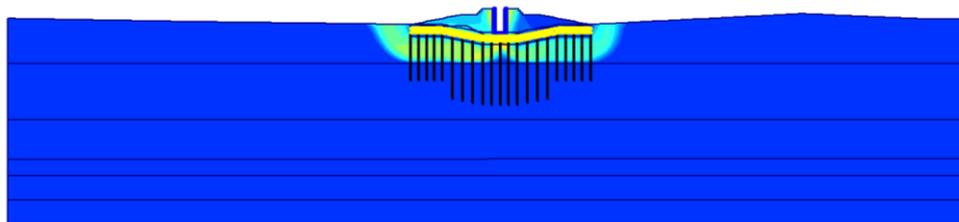
Dari skenario yang dilaksanakan menunjukkan bahwa pengaruh penambahan struktur pelimpah pada pintu air mengakibatkan kenaikan muka air lebih rendah daripada skenario

bukaan minimal pintu untuk menjaga agar air tidak melimpasi tanggul (Gambar 12, 13, dan 14). Dimensi pelimpah yang direncanakan berupa pipa berdiameter 30 cm (12”) sebanyak dua buah pada masing – masing lokasi rencana *shiplock* pada elevasi 105 cm dari ambang pintu air *shiplock*. Kenaikan muka air yang terjadi akibat dari rencana bangunan *shiplock* dan pelimpah adalah setinggi 1,135 m untuk lokasi satu, 1,39 m untuk lokasi dua, dan 0,395 m untuk lokasi tiga.

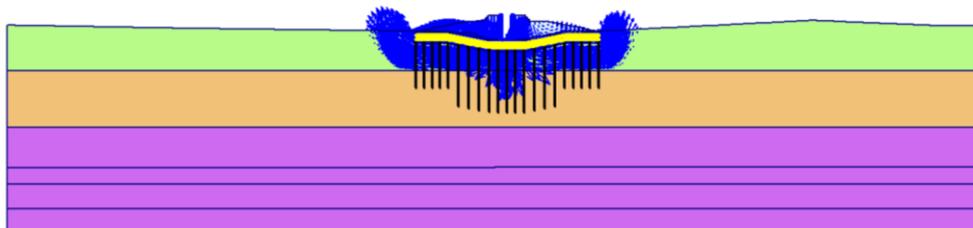
Skenario yang dijalankan mengakibatkan kenaikan muka air pada lokasi rencana *shiplock*. Resume hasil pemodelan numerik hidraulik sungai Sei Ahas dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 19 Geometri Lokasi 1 Dengan Perkuatan Cerucuk, Geogrid dan Geotekstil



Gambar 20 Total stress Lokasi 1 Dengan Perkuatan Cerucuk, Geogrid dan Geotekstil



Gambar 21 Total increment Lokasi 1 Dengan Perkuatan Cerucuk, Geogrid dan Geotekstil

Tabel 3 Resume Model Numerik dengan Skenario yang Dijalankan

No	Skenario	Keterangan	Kenaikan MA
1	Satu	Kondisi Eksisting	
2	Optimum	<i>Shiplock</i> + Penambahan Bangunan Spillway	Lokasi 1 : 1,135 m
			Lokasi 2 : 1,39 m
			Lokasi 3 : 0,395 m

KESIMPULAN

Dengan mempertimbangkan parameter tanah dan hasil analisis stabilitas, dapat disimpulkan :

Pondasi dengan menggunakan cerucuk, pasir dan beton bertulang memiliki nilai SF yang lebih besar dari pada pondasi cerucuk, pasir, geotekstil woven dan geogrid. Hal ini dikarenakan cerucuk dengan beton memiliki daya dukung yang lebih besar, pemerataan beban yang lebih baik serta ikatan antar struktur yang lebih kuat. Dari hasil analisis dapat dilihat bahwa air tertahan di timbunan tanah sehingga daerah tersebut berpotensi untuk longsor dan perlu diantisipasi, terutama saat pemberian pasir dibawah timbunan yang berfungsi sebagai drainase. Sedangkan, geotekstil woven memiliki daya dukung yang rendah, namun dengan diperkuat geogrid maka pondasi memiliki daya dukung yang baik.

Tabel 4 Angka Keamanan Struktur *Shiplock* dan Waktu Konsolidasi yang diperlukan

Pondasi	Angka Aman (SF)	Waktu Konsolidasi (Hari)
Cerucuk Pasir Beton bertulang	2,9830	46,14
Cerucuk Timbunan tanah mengandung kerikil Combogrid	2,2193	35,48

Waktu konsolidasi dengan cerucuk dan beton, membutuhkan waktu yang lebih lama daripada waktu konsolidasi menggunakan cerucuk dan geotektile. Ini dikarenakan beton lebih kedap air dibandingkan dengan geotektile. Akan tetapi geotekstil menyebabkan penurunan setempat yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

Agus, F. dan I.G. M. Subiksa. 2008. *Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan*. Balai Penelitian Tanah dan World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor, Indonesia.

BSN, (1991). *Metode Pengukuran Debit Sungai dan Saluran Terbuka*. SNI-03-2414-1991.

BSN, (1992). *Metode Pengukuran Debit Sungai dan Saluran Terbuka dengan Alat Ukur Arus Tipe Baling-baling*. SNI-03-2819-1992.

Danish Hydraulic Institute, (2008). *Mike 11 A Modelling System for Rivers and Chanels User Guide*

Plaxis bv, (2014). *Plaxis 2D Tutorial Manual*.

Plaxis bv, (2014). *Plaxis Scientific Manual*.

Moore, T. R., Knowles, R. (1989). " The Influences of Water Table Levels on Methane and Carbon Dioxide Emissions from Peatland Soil". *Canadian Journal of Soil Science*.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations" *Transactions Of The Asabe*, 50(3), 885–900.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V., : River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology.*, Vol. 10(3), pp 282-290, 1970.

Sorooshian, S., Q. Duan, and V. K. Gupta. (1993). *Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model*. *Water Resources Research*. 29 (4), 1185-1194.