

PEMODELAN 2-D HUJAN-LIMPASAN-INUNDASI UNTUK ESTIMASI DIMENSI DAN PERIODE LAMA GENANGAN DI DANAU BANJIRAN: Kompleks Danau Sentarum, Kalimantan Barat

Apip, Hidayat, Iwan Ridwansyah, Dini Daruati

Pusat Penelitian Limnologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)

E-mail: apip@limnologi.lipi.go.id

ABSTRAK

Pemahaman mengenai proses dinamika perubahan volume air (genangan) di danau bertipe banjiran sangat penting dalam optimasi pemanfaatan serta pengelolaan ekosistem yang ada di dalamnya secara tepat dan berkelanjutan. Dinamika volume air di danau paparan banir sangat dipengaruhi oleh respon hidrologi dari Daerah Tangkapan Air (DTA), lama penggenangan dan volume massa air yang dilepaskan dari sistem danau. Permasalahannya, informasi kuantitatif hasil monitoring dari masing-masing variabel tersebut masih jarang atau bahkan belum tersedia. Sebagai solusi, pendekatan estimasi melalui pemodelan respon hidrologi dan rambatan massa aliran air dapat dipergunakan sebagai perangkat lunak untuk penyediaan informasi dan pemahaman dinamika perubahan genangan. Tulisan ini menjelaskan mengenai proses pembuatan serta evaluasi model hidrologi, 2-D hujan-limpasan-inundasi, untuk estimasi dimensi genangan di kompleks Danau Sentarum, Kalimantan Barat.

Kata kunci: modeling, hujan-limpasan-inundasi, danau banjiran, kompleks Danau Sentarum

PENDAHULUAN

Kompleks danau bertipe banjiran akan terbentuk pada saat musim hujan ketika air yang berasal dari sungai-sungai disekitarnya meluap dan menggenangi sebagian wilayah daratan. Tipe danau ini relatif dangkal dan keberadaannya sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan kualitas daerah tangkapan airnya. Kompleks Danau Sentarum yang berlokasi di bagian hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Kapuas adalah salah satunya. Disana, pada saat curah hujan tinggi akan terbentuk kompleks danau dan surut pada saat musim kering sampai yang ada hanya alur-alur sungai. Danau banjiran ini penting untuk pengembangbiakan ikan alam sehingga masyarakat lokal memanfaatkannya sebagai sumber ekonomi.

Kondisi ekologis serta dinamika pertumbuhan populasi ikan di daerah riparian dan danau sangat dipengaruhi secara langsung oleh pola distribusi genangan yang dihasilkan oleh beberapa kejadian banir. Sehingga nilai ekonomis yang bisa dihasilkan dari luapan air di daerah banjiran sangat tergantung kepada luasan (*extent*), kedalaman (*depth*), lamanya (*duration*), dan frekuensi (*frequency*) terjadinya proses genangan (inundasi). Untuk itu informasi mengenai dinamika perubahan (spatio-temporal) dimensi genangan, baik genangan tidak permanen

maupun permanen, sangat diperlukan salah satunya untuk optimasi zonasi daerah tangkap dan konservasi ikan.

Penelitian ini ditujukan pada metoda pembuatan dan evaluasi luaran model hidrologi hujan-limpasan-inundasi yang sesuai untuk kompleks Danau Banjiran Sentarum. Kompleks Danau Sentarum sampai saat tidak mempunyai sistem pengukuran respon hidrologi, seperti tinggi muka air, yang dioperasikan secara jangka panjang dan disediakan untuk kepentingan publik. Oleh karena itu model yang dihasilkan dapat digunakan untuk estimasi kontribusi masing-masing rezim hidrologi DAS (berupa limpasan) terhadap dinamika genangan, termasuk dalam hal ini adalah informasi kuantitatif mengenai dimensi luasan, kedalaman, dan durasi secara spasial. Dalam model ini, proses rambatan aliran massa air yang ada di permukaan tanah dan badan air dikalkulasikan dengan menggunakan metoda dua dimensi (2-D) serta persamaan gerak “*diffusive wave*”. Data tinggi muka air dari beberapa lokasi pengukuran di luar kompleks Danau Sentarum dan informasi pola genangan hasil intepretasi citra radar dan satelit digunakan untuk verifikasi hasil simulasi dari suatu kejadian banjir terpilih Oktober 2010.

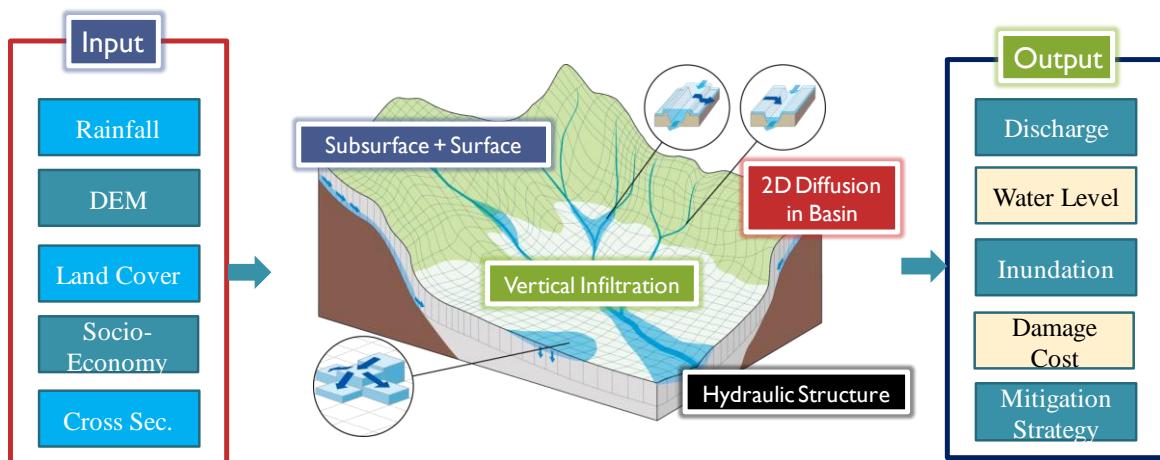
Model Hidrologi 2-D Hujan-Limpasan-Inundasi

Untuk simulasi proses hubungan dan interaksi antara kejadian hujan, pembentukan aliran permukaan, dan terjadinya banjir melalui proses inundasi atau penggenangan maka dalam studi ini digunakan tipe model hidrologi berdimensi dua (2-D) yang menggunakan prinsip dasar “*diffusive wave*”. Karena mensimulasikan ketiga proses tersebut, model yang dibangun untuk kompleks Danau Sentarum ini dinamakan Model Hujan-Limpasan-Inundasi. Proses terjadinya aliran permukaan (*overland flow & total runoff*) dan inundasi disimulasikan secara bersamaan (*simultaneously*) dalam satu sistem pemodelan. Konsep serta struktur dasar model yang dipergunakan mempunyai kesamaan dengan jenis model hujan-limpasan-inundasi yang telah dibuat dan dikembangkan oleh Dr. Takahiro Sayama (Sayama *et al.*, 2012) meskipun untuk kasus Danau Sentarum beberapa modifikasi perlu dilakukan. Salah satu keunggulan dari model yang dibuat ini adalah dapat diaplikasikan untuk daerah aliran sungai yang mempunyai variasi kelas lereng tinggi, mulai dari bagian yang mempunyai kemiringan lereng relatif curam (*mountainous slopes*) sampai bagian yang

didominasi dataran rendah seperti paparan banjir (*floodplains*) yang menjadi lokasi kompleks Danau Sentarum.

Gambar 1 menunjukkan skematik diagram dari model yang dibuat dan diaplikasikan. Daerah Tangkapan Air (DTA) dari sungai atau danau dibagi secara terpisah menjadi segmen lereng (tanah) dan segmen sungai (badan air). Masing-masing segmen tersebut didiskretisasi kedalam area terkecil yang mempunyai luasan sama yaitu grid (dalam penelitian ini digunakan ukuran grid 500 x 500 m). Khusus pada grid dimana ada alur sungai diatasnya maka kedua segmen yaitu lereng dan sungai dimodelkan berada dalam satu grid. Dalam hal ini segmen sungai direpresentasikan sebagai vektor garis yang terletak di pusat grid.

Aliran air di bawah lapisan permukaan tanah (*lateral/subsurface flow & vertical infiltration*) dan permukaan tanah (*overland flow*) dihitung pada segmen lereng dengan arah pergerakan air mengikuti konsep 2-D (Gambar 2). Dinamika perubahan aliran lateral dan proses terjadinya aliran permukaan di segmen slope dihitung dengan menggunakan dua pendekatan. Pertama, “*saturataion excess overland flow*”, khususnya untuk area yang didominasi oleh “*steep slopes*” (Apip *et al.*, 2011). Kedua, melalui “*infiltration excess overlandflow*”, khususnya untuk area yang didominasi oleh “*moderate-gentle slopes*” (Rawls *et al.*, 1992).



Gambar 1. Skematik diagram dari model distribusi 2-D Hujan-Limpasan-Inundasi.

Proses fisik neraca hidrologi di setiap elemen grid dan pergerakan massa air diformulasikan di dalam model berdasarkan persamaan keseimbangan massa (Persamaan 8.1) dan persamaan gerak dalam arah sumbu x dan y (Persamaan 8.2 & 8.3) sebagai berikut:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r$$

(8.1)

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial uq_x}{\partial x} + \frac{\partial vq_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w}$$

(8.2)

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial uq_y}{\partial x} + \frac{\partial vq_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w}$$

(8.3)

dengan h adalah tinggi muka air dari permukaan (*local surface*); q_x dan q_y adalah debit aliran air per satuan luas dalam arah sumbu x dan y ; u dan v adalah kecepatan aliran dalam arah x dan y ; r adalah curah hujan; H adalah tinggi muka air dari datum/titik acuan; β_w adalah kerapatan jenis air; g adalah gaya gravitasi; τ_x dan τ_y adalah shear stresses dalam arah x dan y . Persamaan 8.1 selanjutnya diformulasikan secara lebih detail sebagai berikut:

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{q_x^{i-1,j} - q_x^{i,j}}{\Delta x} + \frac{q_y^{i,j-1} - q_y^{i,j}}{\Delta y} + r^{i,j}$$

(8.4)

dimana q_x dan q_y dapat dirumuskan seperti di bawah ini:

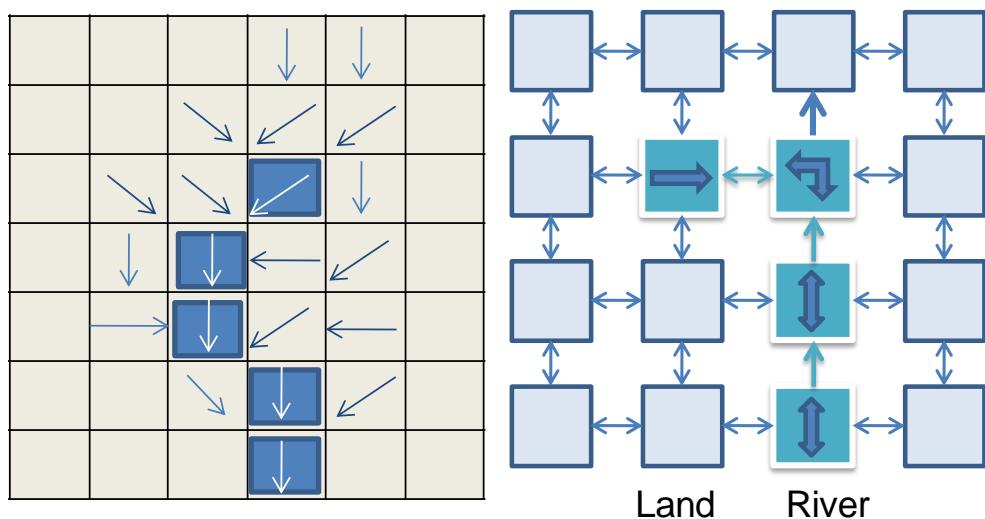
$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right]$$

(8.5)

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial y} \right]$$

(8.6)

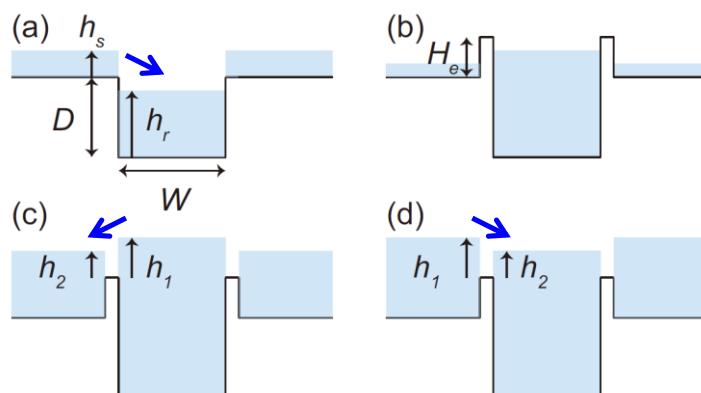
n adalah koefisien kekasaran permukaan (*manning's roughness parameter*).



Gambar 2. Konsep pergerakan massa air.

Pada tahap awal, khususnya untuk *steep slopes*, arah aliran 2-D massa air dari masing-masing grid lebih ditentukan faktor topografi, satu arah (kiri). Setelah terjadinya aliran permukaan dan inundasi termasuk di area inundasi maka beda tinggi muka air dapat merubah arah aliran dari suatu grid menjadi dua dimensi (kanan).

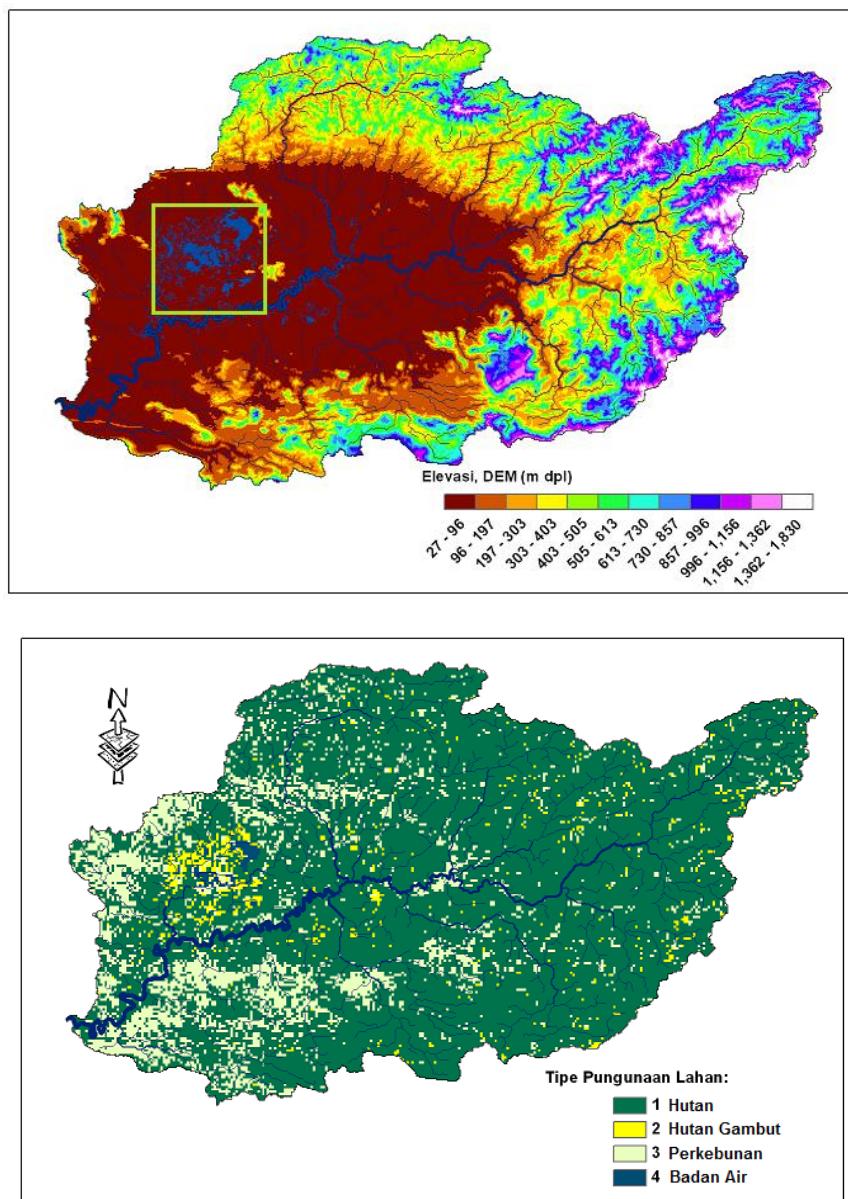
Interaksi arah aliran air antara segmen lereng dan segmen sungai diestimasi berdasarkan perbedaan tinggi muka air diantara dua segmen tersebut dan tinggi tanggul sungai. Ada empat persamaan debit aliran yang dipergunakan sesuai dengan empat kemungkinan yang terjadi seperti yang diilustrasikan pada gambar di bawah ini (Gambar 3). Bentuk geometri sungai diasumsikan berbentuk persegi panjang yang mempunyai dimensi lebar (W), kedalaman (D), dan tinggi tanggul (H_e).



Gambar 3. Proses dan arah aliran pada area pertemuan segmen grid lereng (*slope*) dan segmen grid sungai dalam model 2-D hujan-limpasan-inundasi.

Pemecahan secara numerik dari Persamaan 8.4 sampai dengan Persamaan 8.6 menggunakan metoda Runge-Kutta oder ke lima yang dikombinasikan dengan teknik “Adaptive Time-Step Control” (Press *et al.*, 1992).

Set-up Kondisi Simulasi dan Evaluasi Luaran Model

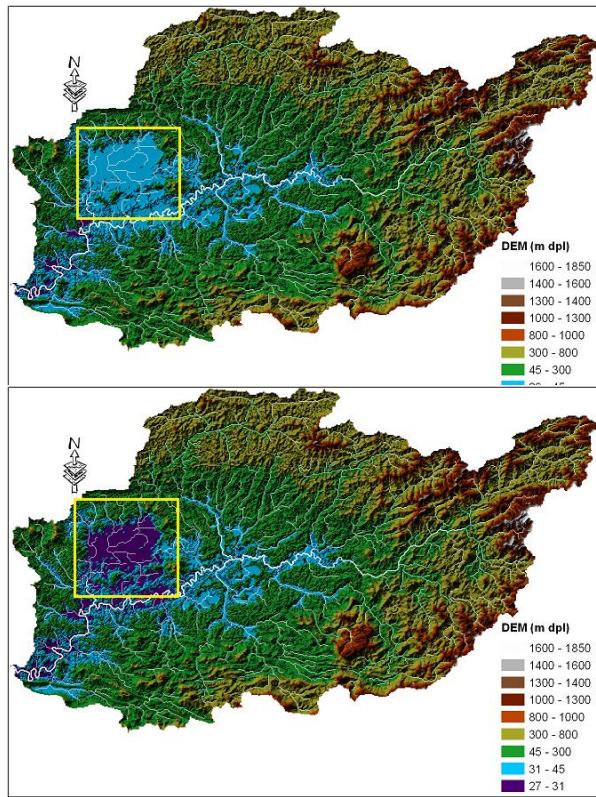


Gambar 4. Variasi topografi dari HydroSHEDS 500 m (kiri) dan kondisi tutupan lahan (kanan) di DTA kompleks Danau Sentarum yang mencakup wilayah bagian hulu DAS Kapuas, Kalimantan Barat.

Bagian dari beberapa tahapan penting dalam aplikasi model adalah evaluasi tingkat akurasi luaran yang dihasilkan. Salah satu luaran model hujan-limpasan-inundasi yang dapat diuji tingkat validitasnya adalah pola distribusi dan luas area genangan

serta variasi kedalamannya. Pola genangan pada saat puncak kejadian banjir di kompleks Danau Sentarum yang terjadi selama bulan Oktober 2010 akan menjadi salah satu periode yang akan dipergunakan untuk uji validitas luaran model. Air yang masuk kompleks Danau Sentarum selain berasal dari DAS-DAS yang jaringan sungainya masuk langsung ke sistem danau dipengaruhi juga oleh kondisi aliran dan tinggi muka air di Sungai Utama Kapuas. Oleh karena itu target area untuk proses simulasi mencakup bagian hulu DAS Kapuas.

Gambar 4 menunjukkan variasi topografi dan pola penggunaan lahan di DTA Danau Sentarum dan di bagian Hulu Kapuas dengan outlet di sekitar Kota Kecamatan Semitau (luas total = 31.116 km^2). Data topografi yang dipergunakan berasal dari HydroSHEDS dengan resolusi grid $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$. Dengan resolusi tersebut, area simulasi secara total terdiri dari 260.288 grid. Selain topografi, data set lainnya yang berasal dari HydroSHEDS adalah arah aliran dan akumulasi aliran (drainase). Segmen grid dengan akumulasi aliran berjumlah lebih dari lima dikategorikan sebagai segmen sungai. Karena belum dilakukan survey dan pengukuran dimensi penampang maka informasi spasial geometri sungai diestimasi dengan persamaan regresi: lebar (m) = $2,5A^{0,35}$, kedalaman (m) = $0,95A^{0,2}$, dimana $A(\text{km}^2)$ adalah jumlah akumulasi aliran.



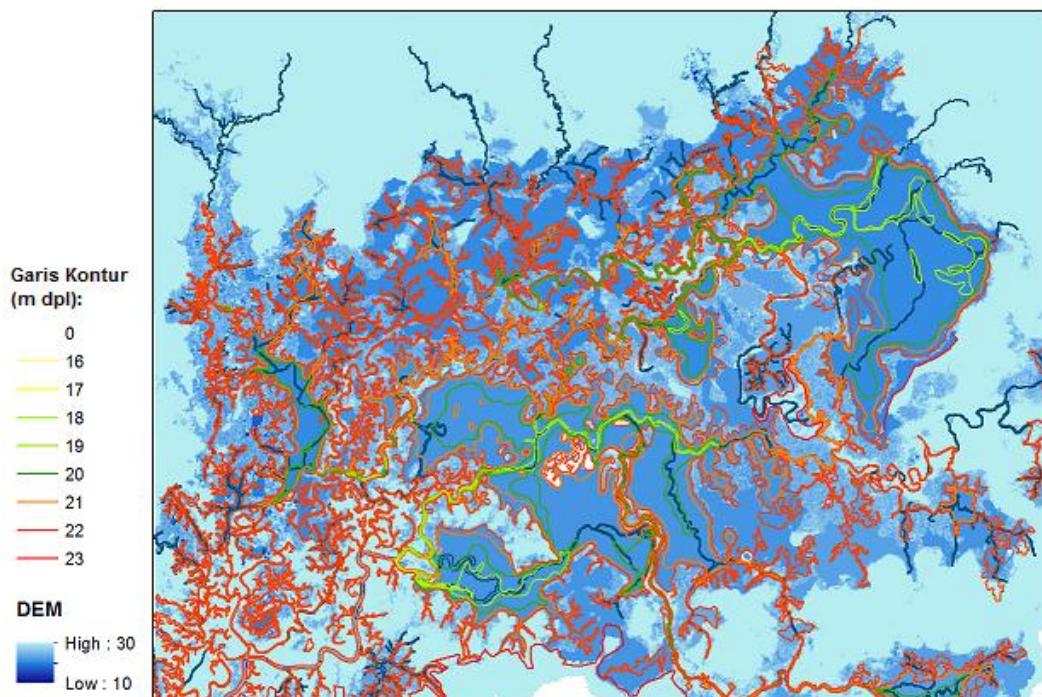
Gambar 5. Representasi topografi di sekitar kompleks Danau Paparan Banjir Sentarum (area di dalam garis kotak berwarna kuning) dari DEM HydroSHEDS 500 m.

Dengan membandingkan gambar di sebelah kanan dan kiri maka dapat dilihat bahwa paparan banjir Danau Sentarum baru terlihat pada ketinggian minimum 30-31 m dpl (warna biru, gambar sebelah kanan). Kondisi ini tidak realistik karena berdasarkan hasil awal survei batimetri diketahui bahwa garis kontur kompleks Danau Sentarum berada pada kisaran 17-23 m dpl.

Simulasi pendugaan kembali proses terjadinya genangan (pengisian badan air kompleks Danau Sentarum), distribusi genangan di semua lokasi bagian Hulu DAS Kapuas beserta estimasi kedalamannya ditujukan untuk periode Oktober 2010. Input hujan yang dipakai berasal dari Stasiun Iklim Putussibau yang mempunyai resolusi waktu harian, yang kemudian diinterpolasi menjadi durasi per jam. Selanjutnya, interval waktu simulasi dan perhitungan respon hidrologi untuk segmen lerang diset per 10 menit dan 1 menit untuk segmen sungai.

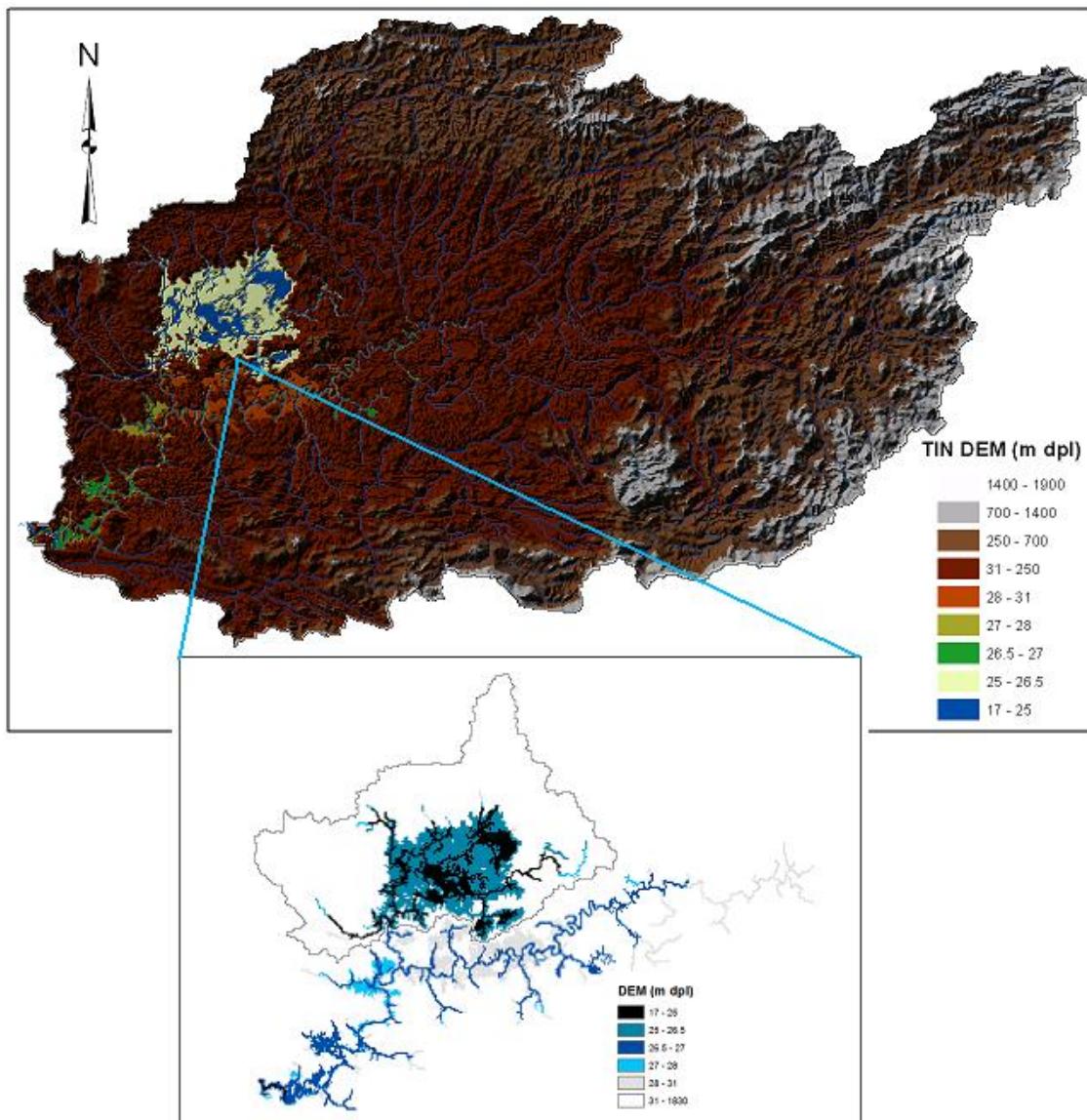
Data raster hidrotopografi HydroSHEDS 500 m tidak dapat dipergunakan secara langsung untuk tujuan simulasi seperti di atas karena variasi ketinggian

topografi yang dihasilkan khususnya di sekitar kompleks Danau Sentarum tidak sesuai dengan hasil survei batimetri (lihat Gambar 5). Berdasarkan data HydroSHEDS 500 m, kompleks Danau Sentarum berada pada ketinggian 30-31 m dpl. Kondisi ini berbeda dengan hasil survei batimetri oleh tim peneliti dari Pusat Penelitian Limnologi LIPI, yang menghasilkan informasi awal bahwa kompleks Danau Sentarum mempunyai variasi garis ketinggian 17-23 m dpl (Gambar 8.6).



Gambar 6. Variasi spasial garis kontur (ketinggian, m dpl) di kompleks Danau Paparan Banjir Sentarum yang dihasilkan dari pengukuran langsung batimetri danau pada bulan Mei dan November 2014. Kemudian garis kontur tersebut digabungkan dengan data spasial DEM 30 m dari SRTM.

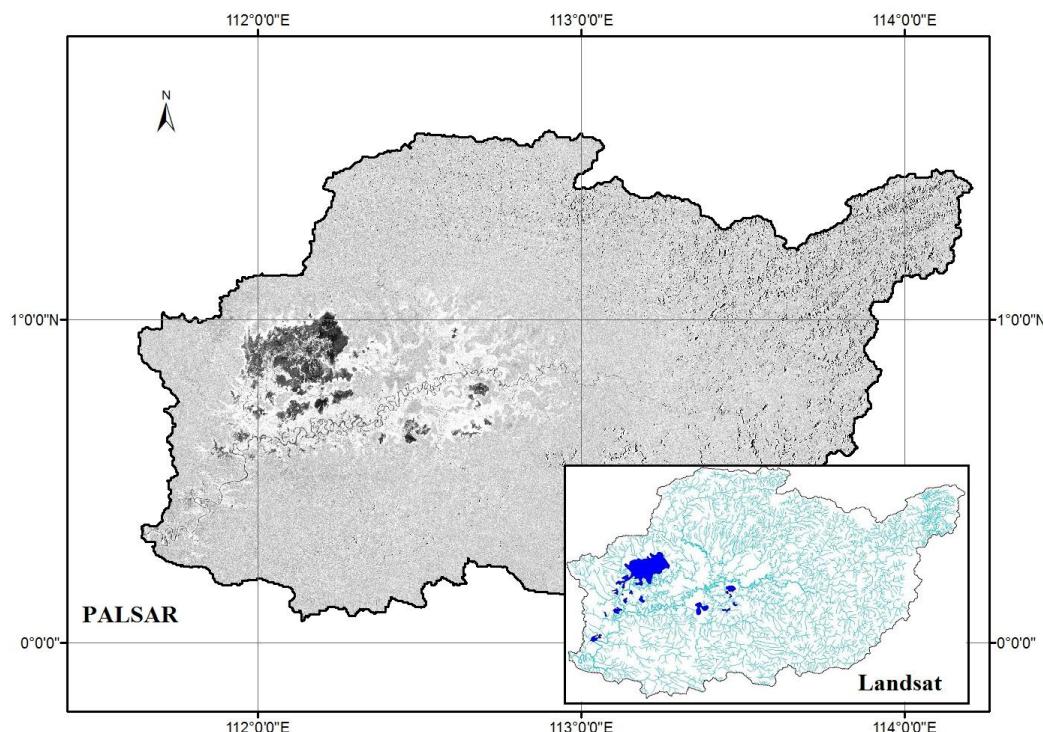
Untuk menghasilkan luaran model yang lebih baik maka dilakukan proses koreksi terhadap DEM HydroSHEDS 500 m dengan data kontur hasil pemetaan batimetri danau. Dengan menggunakan piranti lunak Arc GIS dan Compaq Visual Fortran maka proses koreksi selain dilakukan terhadap DEM, dilakukan juga terhadap data spasial akumulasi aliran, arah aliran dan jaringan sungai. Hasil akhir dari proses koreksi untuk DEM 500 m dapat dilihat pada Gambar 7. Hasil koreksi menunjukkan bahwa kompleks Danau Sentarum sampai outlet di sekitar Sungai Tawang mempunyai variasi topografi pada kisaran 17-26.5 m dpl.



Gambar 7. Representasi topografi di Hulu DAS Kapuas yang dihasilkan dari koreksi DEM HydroSHEDS 500 m dengan data kontur hasil survei batimetri di kompleks Danau Sentarum.

Karena tidak tersedianya data hasil observasi luas dan dimensi genangan (kedalaman dan durasi) serta tinggi muka air atau debit aliran sungai maka estimasi distribusi genangan hasil interpretasi citra satelit merupakan salah satu solusi untuk evaluasi luaran model. Citra Landsat dan PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) digunakan untuk interpretasi distribusi genangan pada bulan Oktober 2010. Citra PALSAR digunakan untuk mengamati dinamika daerah paparan banjir di wilayah Kapuas Hulu (Taman nasional Danau Sentarum dan sekitarnya). Citra radar lebih sesuai untuk mengamati dinamika penggenangan di daerah tropis karena radar

tidak terpengaruh tutupan awan dan pada tingkat tertentu radar dapat menembus tutupan vegetasi. *Backscatter* radar pada genangan terbuka (*open water*) berbeda dengan genangan di bawah tutupan vegetasi. Pada genangan terbuka sinyal *backscatter* radar sangat kecil sehingga terlihat gelap. Sementara itu pada genangan di bawah tutupan vegetasi terjadi efek *double bounce* atau pantulan sinyal berganda dari vegetasi sendiri ditambah sinyal yang dipantulkan permukaan air ke batang/ranting sehingga nilai *backscatter* menjadi relatif lebih tinggi dan akan terlihat terang pada citra Radar.

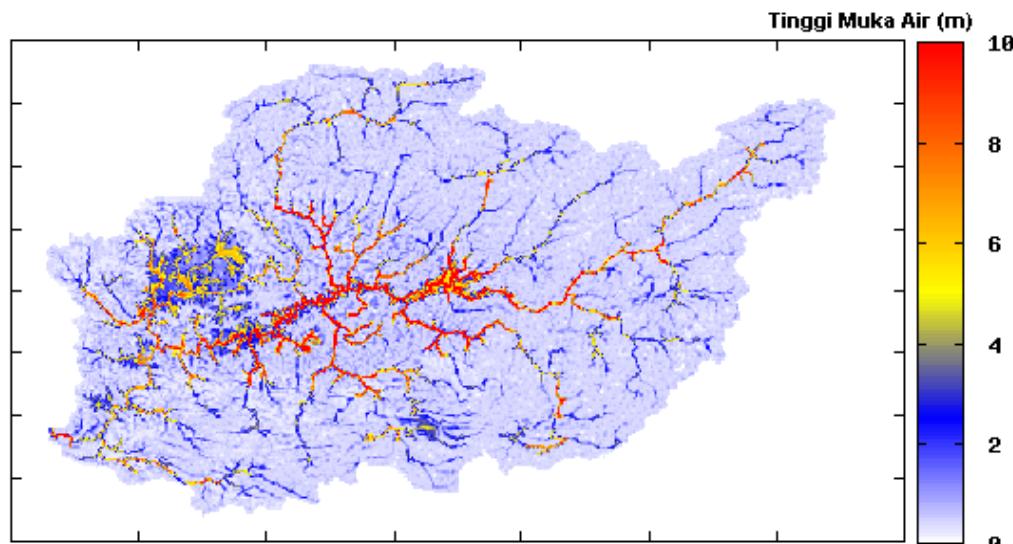


Gambar 8.8.Citra PALSAR tanggal 12 Oktober 2010 yang menunjukkan bahwa radar dapat digunakan untuk membedakan antara lahan kering dan lahan basah yang sulit dilakukan pada area tertutup vegetasi seperti pada kubah gambut.

Informasi luasan banjir dapat diekstrak dari citra radar wilayah kajian. Wilayah yang sepenuhnya tergenang dapat dikenali dengan mudah sebagai area gelap pada citra radar. Analisis intensitas *backscatter* radar pada area paparan banjir bervegetasi secara konsisten menunjukkan nilai *backscatter* yang tinggi dengan area berwarna putih, mengindikasikan genangan di bawah tutupan hutan. Citra Landsat hanya mendeteksi area genangan (warna biru) di area yang tidak bervegetasi.

Hasil simulasi tahap awal dari proses penggenangan dan inundasi di sekitar kompleks Danau Sentarum dan hulu DAS Kapuas pada saat puncak banjir periode

Oktober 2010 dapat dilihat pada Gambar 8.9. Hasil awal ini menunjukkan bahwa model dapat merepresentasikan kembali dengan baik pola distribusi spasial lokasi-lokasi yang mengalami penggenangan dan inundasi, baik yang ada di sekitar kompleks Danau Sentarum maupun di wilayah lainnya di Kapuas Hulu yang terjadi akibat proses inundasi sungai utama Kapuas. Pola distribusi genangan yang dihasilkan relatif sama dengan hasil yang diperoleh dari proses interpretasi citra PALSAR maupun Landsat (Gambar 8.8), meskipun distribusi genangan di area tertutup vegetasi masih belum dapat disimulasikan dengan baik. Pola distribusi genangan terbuka (tidak di bawah tutupan tajuk tanaman) yang dihasilkan model relatif menyerupai pola genangan yang terdeteksi PALSAR.

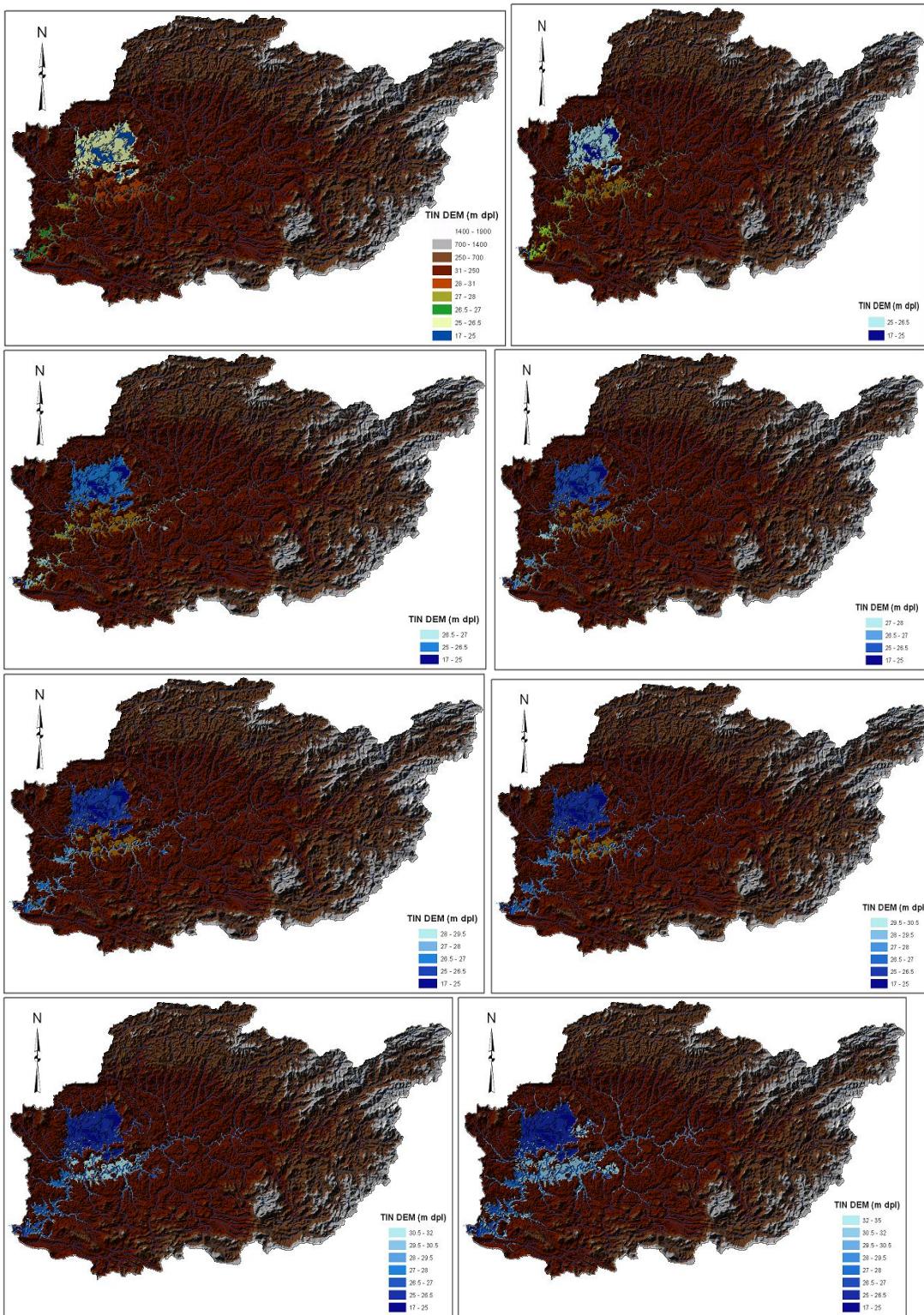


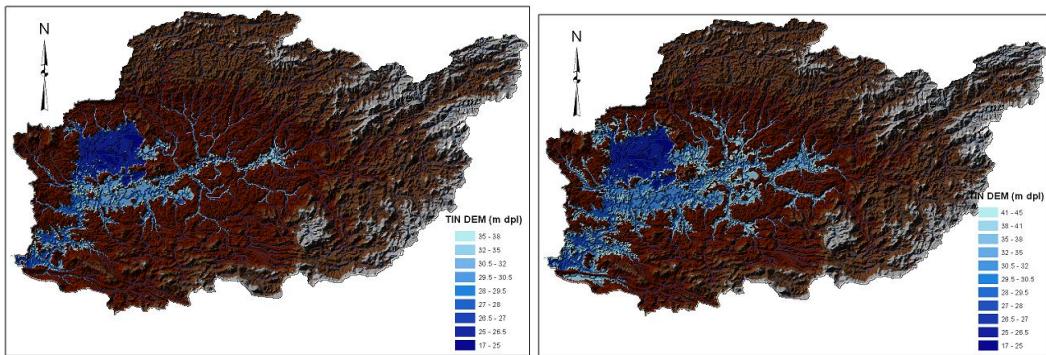
Gambar 8.9. Hasil simulasi pola sebaran daerah genangan yang terjadi akibat proses inundasi pada saat puncak banjir periode Oktober 2010 di kompleks Danau Sentarum dan hulu DAS Kapuas.

Selain distribusi daerah genangan, hasil simulasi memberikan informasi mengenai tinggi genangan atau kedalamam air. Dari Gambar 8.9, kedalaman air di sekitar kompleks Danau Sentarum (di bagian segmen lereng) pada saat puncak banjir berkisar 1-10 m. Akibat tingginya kedalaman air, semua danau yang membentuk kompleks Danau Sentarum yaitu Danau Seriang, Danau Pengembung, Danau Genali, Danau Blida, Danau Secawan, dan Danau Luar bersatu membentuk satu badan air. Tinggi air di bagian segmen sungai khususnya di bagian sungai utama mempunyai kedalaman lebih dari 10 m.

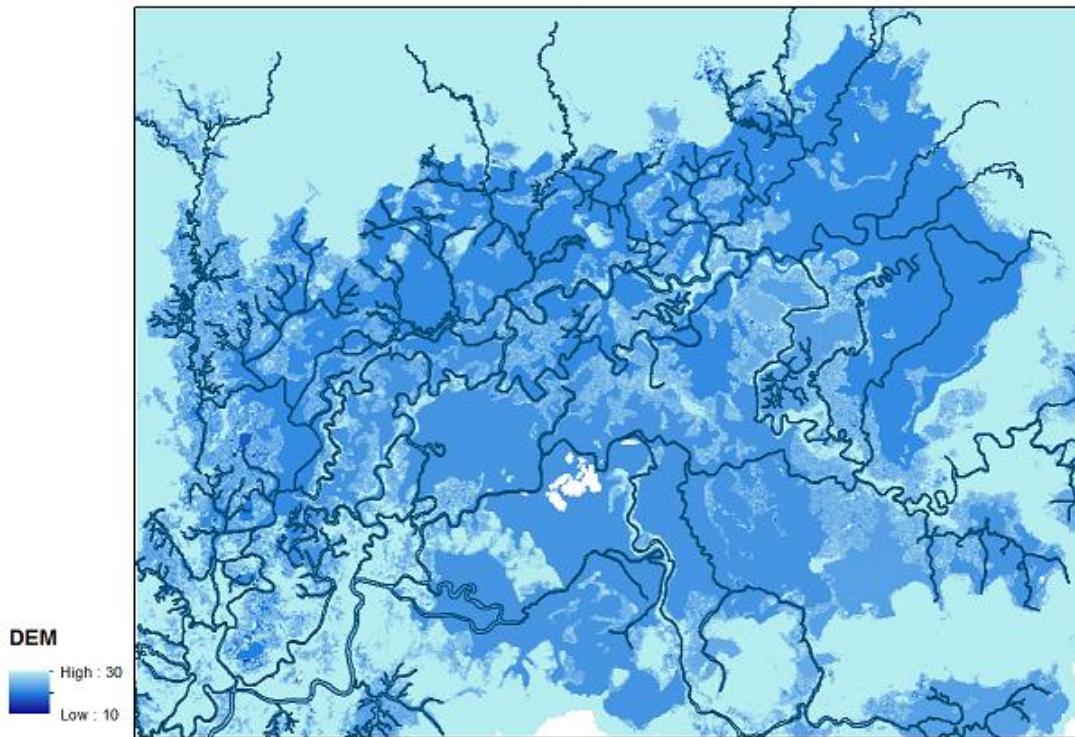
Hasil simulasi lainnya menunjukkan bahwa proses inundasi dan penggenangan di kompleks Danau Sentarum terjadi lebih intensif ketika ketinggian air di Sungai Utama Kapuas telah tinggi, lebih tinggi dari Sungai Tawang sehingga aliran massa air yang berasal dari DTA Danau Sentarum mengalami perlambatan atau tidak bisa masuk ke Sungai Kapuas. Akibatnya terjadi aliran kembali (*backwater effect*) serta dispersi aliran sungai Kapuas ke Sungai Tawang, kedua proses ini menyebakan perluasan area genangan kompleks Danau Sentarum. Hasil simulasi awal menunjukkan bahwa sumber air kompleks Danau Sentarum berasal dari respon hidrologi DTA danau yang mengalami inundasi dan massa air dari Sungai Kapuas yang mengalami proses dispersi di titik pertemuan antara Sungai Tawang dan Sungai Kapuas.

Sebagai aplikasi awal, selanjutnya model telah dipergunakan untuk estimasi perluasan area genangan jika terjadi kenaikan tinggi muka air di kompleks Danau Sentarum. Sejumlah peta pada Gambar 10 menunjukkan mekanisme perluasan area genangan yang terjadi secara bertahap akibat adanya kenaikan tinggi air di kompleks Danau Sentarum dan Sungai Kapuas. Dalam tahap awal penerapan model inianalisis spasial rata-rata lama genangan per musim yang terjadi di dalam kompleks Danau Sentarum belum disimulasikan serta diperhitungkan. Sebagai tahapan selanjutnya model akan diaplikasikan untuk hanya fokus ke internal area dari kompleks Danau Sentarum dengan menggunakan data hidrotopografik yang mempunyai resolusi tinggi, seperti SRTM 30 m (Gambar 11). Dalam hal ini, luaran model dengan menggunakan Hydrosheds 500 m yang mencakup Kapuas Hulu akan dijadikan sebagai variabel dalam setup kondisi awal (*initial conditions*) dan kondisi batas (*boundary conditions*) model. Topik lainnya, skenario dampak perubahan iklim terhadap perubahan dimensi genangan danau akan menjadi materi kajian pada tahap selanjutnya.





Gambar 10. Hasil simulasi skenario kenaikan tinggi muka air di Kompleks Danau Sentarum dan luas area yang mengalami penggenangan. Berturut-turut dari arah atas-kanan-bawah menunjukkan kenaikan air sebagai berikut: DEM, posisi awal (*baseline*), + 2 m, + 3 m, + 4.5 m, + 6.5 m, + 7 m, + 10 m, + 13 m, dan + 20 m.



Gambar 11. Variasi spasial DEM 30 m dari SRTM dan jaringan aliran sungai yang akan digunakan untuk tahap pemodelan yang lebih detail dan beresolusi tinggi di dalam kompleks Danau Sentarum.

KESIMPULAN

Kompleks Danau Sentarum adalah danau yang terbentuk di daerah paparan banjir yang keberadaannya sangat tergantung pada lamanya periode musim hujan, intensitas hujan, dan kondisi hidrologis Sungai Kapuas Hulu serta DTA danau. Karena tidak adanya sistem pengukuran, dinamika pembentukan dan perubahan dimensi genangan Danau Sentarum dan respon hidrologi sungai-sungai di hulu DAS Kapuas dapat diestimasi dengan menggunakan model hidrologi 2-D Hujan-Limpasan-Inundasi yang menjadi luaran utama dari studi ini. Model yang dibuat cukup baik dalam mensimulasikan kembali luas badan air Danau Sentarum dan distribusi genangan di hulu DAS Kapuas (khususnya untuk area tanpa vegetasi) pada saat kejadian puncak banjir yang terjadi pada bulan Oktober 2010. Pola yang dihasilkan relatif sama dengan pola sebaran genangan yang terdeteksi PALSAR.

Hasil simulasi awal menunjukkan bahwa sumber air kompleks Danau Sentarum berasal dari respon hidrologi DTA danau yang mengalami inundasi dan massa air dari Sungai Kapuas yang mengalami proses dispersi di titik pertemuan antara Sungai Tawang dan Sungai Kapuas.

DAFTAR PUSTAKA

- Apip, Sayama T, Tachikawa Y, and Takara K. (2012). Spatial lumping of a distributed rainfall sediment runoff model and effective lumping scale. *Hydrological Processes*, Vol. 26, pp. 855–871. DOI 10.1002/hyp.8300.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P. (1992). Adaptive stepsize control for Runge-Kuta. Numerical Receipes in Fortran 77, The Art of Scientific Computing Second Edition, Cambridge University Press, pp. 708-716.
- Raws, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. & Shirmohammadi, A. (1992). Infiltration and soil water movement. Handbook of Hydrology, McGrow-Hill Inc., New York, 5.1-5.51.
- Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., Fukami, K. (2012). Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), pp. 298-312, 2012.