

PEMODELAN SPASIAL REGRESI LOGISTIK DAN *CELLULAR AUTOMATA* BERBASIS CITRA PENGINDERAAN JAUH UNTUK PREDIKSI PENDANGKALAN SECARA 2 DIMENSI WADUK GAJAH MUNGKUR KABUPATEN WONOGIRI

Dyah Arshinta Narmaningrum
dyaharshintanrm@gmail.com

Bowo Susilo
bowo.susilo@gmail.com

Abstract

Waduk Gajah Mungkur is located in Kabupaten Wonogiri. The dynamic which is chosen for modeling of Logistic Regression and Cellular Automata is the reservoir's dynamic which include silting up in this reservoir. The first objective of this research is examining the changes of Waduk Gajah Mungkur in 2000 and 2003 with the utilization of image. Its use to assess the factors associated with the changes of Waduk Gajah Mungkur that is the second goal of research. The purpose of the latter prediction map is the preparation of Waduk Gajah Mungkur through modeling and logistic regression spatial use Cellular Automata. The results of research conducted produce a simulation and by prediction the condition of Waduk Gajah Mungkur. Simulation and by prediction divided into two according to the condition that is modeling simulation and by prediction reservoir broad year 2006-2014 with accuracy 86,83%; modeling simulation and by prediction broad spatial distribution sediment in 2006-2014 with accuracy 87,88%. The prediction of the final result of the changes in the condition of Waduk Gajah Mungkur in 2017 and 2020, in 2017 obtained reservoirs space in the way this time there is water area 27.815 pixels , while in 2020 obtained broad as many as 26.749 pixels. In 2017 obtained existing space sediment scattered 40.395 pixels, while in the year 2020 obtained broad as many as 41.624 pixels.

Keyword : *Logistic Regression, Cellular Automata, Modeling, Silting up, Waduk Gajah Mungkur*

Abstrak

Waduk Gajah Mungkur terletak di Kabupaten Wonogiri. Sedimen yang masuk ke dalam waduk mempengaruhi dinamika waduk. Pada penelitian ini dinamika dikaji dengan menggunakan Regresi Logistik dan *Cellular Automata* adalah dinamika waduk. Tujuan pertama dari penelitian ini adalah mengkaji perubahan kondisi Waduk Gajah Mungkur tahun 2000 dan 2003 dengan pemanfaatan citra penginderaan jauh. Pemanfaatannya adalah penggunaannya untuk mengkaji faktor yang berhubungan dengan perubahan kondisi Waduk Gajah Mungkur yang merupakan tujuan kedua dari penelitian. Tujuan yang terakhir yaitu penyusunan peta prediksi pendangkalan Waduk Gajah Mungkur melalui pemodelan spasial menggunakan regresi logistik dan *Cellular Automata*. Hasil penelitian yang dilakukan menghasilkan simulasi dan prediksi kondisi Waduk Gajah Mungkur. Simulasi dan prediksi dibagi menjadi dua menurut kondisinya yaitu pemodelan simulasi dan prediksi luas waduk tahun 2006-2014 dengan akurasi 86,83%; pemodelan simulasi dan prediksi distribusi spasial sedimen tahun 2006-2014 dengan akurasi 87,88%. Dari akurasi tersebut maka digunakan sebagai dasar untuk prediksi tahun 2017 dan 2020.

Kata kunci : Regresi Logistik, *Cellular Automata*, Pemodelan, Pendangkalan, Waduk Gajah Mungkur

PENDAHULUAN

Waduk (reservoir) merupakan bangunan penampung air pada suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) yang dimanfaatkan untuk mengairi lahan pertanian, perikanan, regulator air (pengendali banjir), tanggul penampungan air limpasan yang

dialirkan oleh outlet (sungai) ke Waduk itu agar tidak mengalir dan tergenang pada tempat di bawahnya dan dimanfaatkan untuk air minum serta pariwisata. Ekosistem Waduk tak lepas dari pengaruh kondisi sungai-sungai yang mengalir masuk (inlet) dari suatu daerah aliran

sungai. Hakikatnya fenomena-fenomena alam tempat dimana suatu tempat dihuni, secara fisik maupun sosial akan selalu memiliki hubungan kausal dan keterkaitan (Bintarto, 1982). Waduk dan Daerah Aliran Sungai merupakan suatu unit kesatuan yang berfungsi sebagai daerah tangkapan air (*catchment area*). Kerusakan ekosistem yang terjadi pada suatu DAS akibat pemanfaatan dan penggunaan lahan seperti lahan pertanian, perladangan, dan permukiman oleh masyarakat berpengaruh terhadap keseimbangan alam daerah itu. Kerusakan tersebut mengakibatkan perubahan luasan penggunaan lahan sebagai penyangga air sehingga akan menimbulkan terjadinya erosi dipercepat atau erosi tanah menuju proses kerusakan tanah. Bencana erosi merupakan peristiwa transportasi atau pengangkutan tanah atau bagian-bagian tanah oleh media alami terutama air. Tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu DAS terkikis dan terangkut kemudian diendapkan ke tempat yang lebih rendah membentuk sedimentasi di waduk. Sedimentasi mengakibatkan pendangkalan sungai dan waduk yang akhirnya akan menimbulkan banjir dan merusak fungsi waduk. Jumlah sedimen (*sediment yield*) hasil dari erosi di waduk akan menghasilkan suatu bentukan (morfologi) tubuh tanah yang menciptakan bentuk muka waduk yang baru. Perubahan morfologi sedimen di waduk tersebut mempunyai pengaruh terhadap nilai guna bangunan waduk. Sedimentasi mengakibatkan pendangkalan yang dapat mengurangi fungsi dari waduk sehingga tidak dapat dimanfaatkan secara optimal. Selain itu juga dapat mengurangi umur waduk yang didesain ketika proyek pembangunan waduk direncanakan. Data bahan endapan yang masuk ke waduk terutama jumlah sedimen yang terangkut oleh transportasi erosi dari Daerah Aliran Sungai ke aliran sungai kemudian masuk ke waduk, secara umum dapat digunakan untuk mengevaluasi besarnya sediment yield dan perkiraan sisa umur waduk.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini secara umum dapat dikelompokkan menjadi empat bagian. Tiap-tiap bagian memiliki sub-sub metode secara mendetail yang perlu dilakukan dalam melakukan penelitian tersebut.

Keempat bagian secara umum tersebut antara lain persiapan, simulasi dan prediksi perubahan luas waduk dan distribusi spasial sedimen, kerja lapangan, dan analisis.

Pemetaan Kondisi Waduk Gajah Mungkur

Kondisi waduk merupakan suatu keadaan yang mencakup luas waduk dan distribusi spasial sedimen dari waduk tersebut. Pembuatan peta luas waduk dan distribusi spasial sedimen didapatkan dari hasil interpretasi dua citra dengan tahun yang berbeda yaitu tahun 2000 dan 2003. Kedua citra tersebut tentu saja akan menghasilkan dua peta yang berbeda karena adanya perubahan yang terjadi akibat adanya sedimentasi itu sendiri.

Sebelum pemrosesan citra Penginderaan Jauh yang digunakan pada penelitian ini terdapat empat tahapan awal yang dilakukan yaitu koreksi geometrik, koreksi radiometrik, dan transformasi citra. Tahapan pertama adalah koreksi geometrik. Citra satelit sendiri yang dihasilkan pada dasarnya belum terlepas dari yang namanya kesalahan setelah perekaman. Banyak hal yang dapat menyebabkan adanya kesalahan-kesalahan yang timbul ini. Adapun kesalahan tersebut seperti gerakan satelit, rotasi bumi, gerakan cermin pada sensor *scanner*, dan juga kelengkungan bumi. Untuk itu perlu dilakukan koreksi geometrik. Koreksi geometrik yaitu mengoreksi posisi suatu obyek pada citra pada posisi yang sebenarnya di lapangan. Koreksi ini menggunakan transformasi dengan menempatkan kembali posisi pixel sedemikian rupa, sehingga pada citra digital yang ditransformasikan dapat dilihat gambaran obyek di permukaan bumi yang terekam sensor. Koreksi geometrik memiliki tujuan yaitu menyamakan datum, sistem proyeksi, dan sistem koordinat. Tahapan ini sangat penting untuk dilakukan karena semua citra haruslah memiliki referensi yang sama. Tahap yang kedua adalah koreksi radiometrik citra. Dalam Danoedoro (2012), kesalahan berupa anomali piksel dapat terjadi akibat inkonsistensi detektor yang mengakibatkan terlalu tinggi atau rendahnya nilai piksel dari nilai seharusnya. Akibat dari mekanisme gerakan cermin yang berputar juga akan mengakibatkan kecacatan baris perekaman. Gangguan sinyal juga akan berpengaruh pada kurangnya informasi spektral

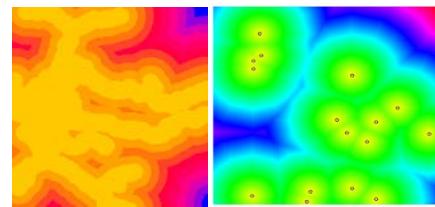
yang tervisualisasikan akibat dari tidak berfungsi detektor pada suatu periode tertentu. Koreksi radiometrik dilakukan dengan memperbaiki kualitas visual citra dan sekaligus memperbaiki nilai-nilai pixel yang tidak sesuai dengan nilai pantulan atau pancaran spektral yang sebenarnya. Transformasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah NDVI. Indeks vegetasi atau NDVI adalah indeks yang menggambarkan tingkat kehijauan suatu tanaman. Indeks vegetasi merupakan kombinasi matematis antara band merah dan band NIR (*Near-Infrared Radiation*) yang telah lama digunakan sebagai indikator keberadaan dan kondisi vegetasi (Lillesand dan Kiefer, 1997). Atau dalam artian lain NDVI merupakan kombinasi antara teknik penisihan dengan teknik pengurangan citra. Menurut Ryan (1997), perhitungan NDVI didasarkan pada prinsip bahwa tanaman hijau tumbuh secara sangat efektif dengan menyerap radiasi di daerah spektrum cahaya tampak (PAR atau *Photosynthetically Aktif Radiation*), sementara itu tanaman hijau sangat memantulkan radiasi dari daerah inframerah dekat. Konsep pola spektral di dasarkan oleh prinsip ini menggunakan hanya citra band merah adalah sebagai berikut:

$$NDVI = \frac{(BV_{inframerah\ dekat} - BV_{merah})}{BV_{inframerah\ dekat} + BV_{merah}}$$

Pemetaan dan Analisis Faktor Perubahan Waduk Gajah Mungkur

Perubahan luas waduk dapat dibuat peta probabilitas pendangkalan yaitu pada lokasi mana saja yang dapat terjadi pendangkalan lebih cepat. Peta probabilitas pendangkalan waduk didapatkan dari model regresi logistik biner yang melibatkan variabel dependen berupa perubahan luas waduk dan distribusi spasial sedimen secara temporal serta variabel independen/prediktor berupa faktor lingkungan pendorong yang dapat mengakibatkan pendangkalan waduk tersebut. Sedangkan variabel independen yang digunakan dalam pembuatan probabilitas ini merupakan faktor-faktor yang berpengaruh. Faktor-faktor yang digunakan dalam penentuan probabilitas adalah jarak terhadap batas terluar sedimen eksisting, jarak terhadap muara sungai, jarak terhadap tepi waduk, serta kemiringan lereng. Faktor tersebut

dianalisis dengan analisis jarak kecuali kemiringan lereng. Jarak merupakan faktor yang berpengaruh dalam suatu dinamika keruangan, dalam hal ini adalah fenomena terjadinya sedimentasi atau tidak. Hubungan sebuah fenomena keruangan dengan faktor jarak dari suatu objek/fenomena dapat bernilai positif maupun negatif. Jarak merupakan salah satu penentu dalam proses sedimentasi.



Gambar 1 : Euclidean Distance dengan Area dan Titik

Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pembuatan probabilitas perubahan waduk gajah mungkur. Probabilitas pendangkalan waduk dilakukan dengan regresi logistik. Probabilitas waduk merupakan salah satu data yang diperlukan dalam melakukan prediksi pendangkalan waduk. Nilai probabilitas waduk memiliki rentang dari 0 sampai 1. Nilai yang mendekati angka 1 merupakan suatu nilai dimana kemungkinan terjadinya pendangkalan semakin besar.

Analisis yang selanjutnya adalah analisis koefisien regresi logistik dari variabel yang digunakan. Dalam analisis ini dilihat nilai koefisien. Besar kecilnya nilai koefisien tersebut berhubungan erat dengan seberapa besar variabel tersebut berpengaruh pada perubahan waduk yang terjadi. Semakin besar koefisien tersebut maka semakin besar pula pengaruh dari variabel tersebut dalam perubahan waduk yang terjadi. Analisis lain yang dilakukan adalah analisis regresi sederhana dimana untuk melihat hubungan variabel dependen dan independen.

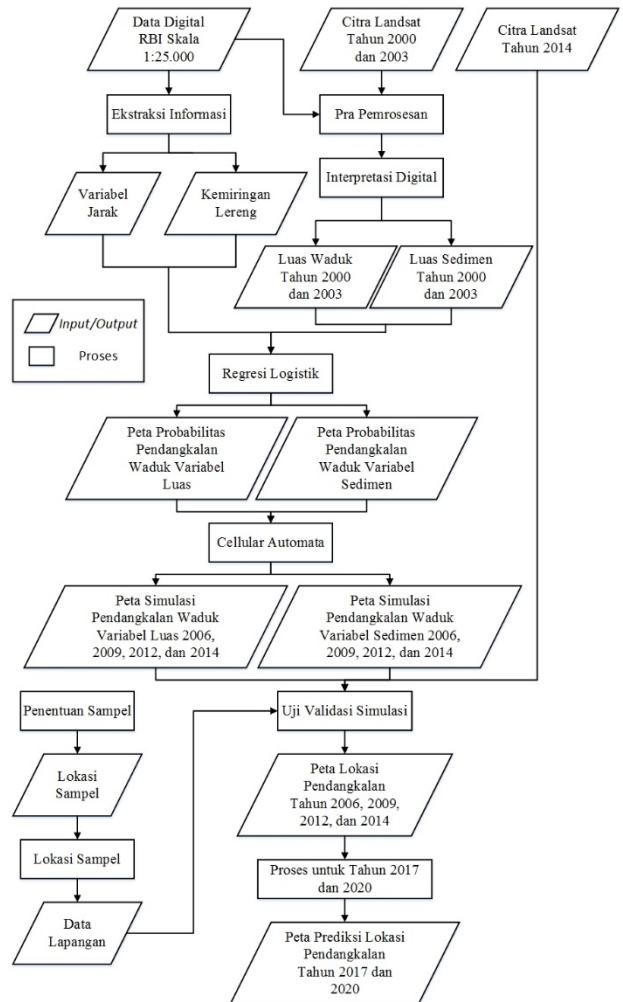
Pemodelan Spasial untuk Prediksi Pendangkalan Waduk Gajah Mungkur

Pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan *Cellular Automata* merupakan simulasi yang dilakukan untuk mencari ke arah mana pendangkalan yang terjadi. Penelitian ini menggunakan beberapa input yang digunakan sebagai data dalam pemodelan yaitu peta luas waduk tahun 2003 sebagai data multitemporal

terakhir, peta probabilitas pendangkalan waduk dari hasil spasial regresi logistik biner, dan hasil prediksi lokasi pendangkalan untuk tahun 2003. Untuk tahun 2014 ini dilakukan uji validasi yaitu dengan membandingkan apakah lokasi pendangkalan sesuai dengan citra tahun 2014 atau dengan kata lain sesuai dengan areal waduk pada tahun 2014.

Pemodelan yang dilakukan ada dua macam model. Pemodelan dilakukan dengan variabel dependen luas waduk dan distribusi spasial sedimen. Keduanya dilakukan dengan tujuan membandingkan hasil prediksi pendangkalan dengan menggunakan kedua variabel dependen yang akan menunjukkan distribusi pendangkalan.

Hasil pemodelan yang telah dilakukan nantinya akan dilakukan validasi model dimana dalam melakukan validasi memerlukan sampel di lapangan. Metode penentuan sampel dilakukan dengan *stratified random sampling*. Strata (stratum) dimaksudkan agar setiap kelas penutup lahan yang dalam kasus ini adalah tanah dan tubuh air dapat dibedakan dengan jelas. Kategori perubahan penutup lahan menjadi pertimbangan utama dalam penentuan sampel. Titik sampel ditentukan secara acak/random pada setiap strata/kelas yang terdistribusi merata di seluruh daerah penelitian. Pengambilan sampel sendiri dilakukan untuk menguji akurasi prediksi yang dilakukan. Untuk itu sampel yang diambil adalah penutup lahan yang ada apakah masih berupa perairan atau sudah menjadi daratan dan distribusi spasial sedimen yang terlihat dari citra atau belum ada distribusi spasial sedimen yang terlihat dari citra.



Gambar 2 : Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Salah satu input yang sudah disebutkan sebelumnya dalam penyusunan model *Cellular Automata* adalah luas waduk dan distribusi spasial sedimen secara multitemporal. Dalam melakukan ekstrasi luas waduk dan distribusi spasial sedimen secara multitemporal perlu dilakukan pra-pemrosesan untuk citra penginderaan jauh yang digunakan yaitu koreksi geometrik, koreksi radiometrik, dan transformasi. Suatu citra perlu dilakukan koreksi geometrik untuk mentransformasi citra agar piksel pada citra sesuai dengan piksel di lapangan dan memberikan koordinat pada citra sesuai dengan koordinat di lapangan. Koreksi yang selanjutnya adalah koreksi radiometrik. Koreksi radiometrik dilakukan untuk mengoreksi kualitas spektral dari nilai piksel suatu citra penginderaan jauh. Proses selanjutnya dalam penelitian ini adalah transformasi. NDVI (*Normalized Difference*

Vegetation Index) di mana merupakan salah satu indeks vegetasi dasar atau generik. . NDVI merupakan salah satu indeks vegetasi yang dapat mengenali air, tanah, dan vegetasi. Dalam hal ini transformasi ini digunakan untuk melihat bagaimana *Digital Number* (DN) antara air, tanah, dan vegetasi. Rentang nilai NDVI adalah -1 sampai +1 di mana -1 merupakan tanah dan +1 merupakan vegetasi. Sedangkan untuk air sendiri memiliki nilai 0. Jika berada diantara kedua nilai maka dapat dikatakan penutup lahan daerah tersebut merupakan gabungan antara keduanya.

Luas waduk secara multitemporal menunjukkan adanya perbedaan luasan antara waduk tahun 2000 dan tahun 2003. Hasil perhitungan luasan didapatkan nilai luasan waduk tahun 2000 sebesar 66,2354 km² sedangkan luasan waduk tahun 2003 sebesar 53,155 km². Dari hasil kalkulasi luasan kedua waduk tersebut maka didapatkan bahwa perubahan luasan kedua waduk tersebut sebesar 13,0804 km². Hanya dalam rentang waktu tiga tahun cukup besar perubahan luasan yang terjadi. Hal ini banyak faktor yang mempengaruhi termasuk di dalamnya sedimentasi yang terjadi dan mengendapkan sedimen di sekeliling waduk.

Hasil identifikasi distribusi sedimen yang terlihat pada citra menghasilkan sebaran sedimen yang berbeda pada tahun 2000 dan 2003. Hasil kalkulasi yang dilakukan pada distribusi spasial sedimen yang dapat dilihat dari citra pada tahun 2000 didapatkan luasan untuk sedimen tersebut sebesar 13,5776 km². Semakin bertambahnya tahun maka sedimen yang terakumulasi dalam waduk juga bertambah. Pada kalkulasi yang dilakukan untuk tahun 2003 menghasilkan luasan sedimen sebesar 31,4361 km². Hanya dalam rentang waktu tiga tahun saja luas distribusi spasial sedimen mengalami perluasan yang cukup besar. Dari tahun 2000 sampai tahun 2003 sedimen yang terdapat pada waduk bertambah seluas 17,8585 km². Jumlah tersebut sangatlah besar mengingat waduk tersebut merupakan waduk yang menjadi tumpuan masyarakat. Dengan bertambahnya sedimen yang masuk dengan luasan yang cukup besar tentu akan berpengaruh pada daya tampung waduk tersebut. Sedimen yang besar akan mengganggu fungsi waduk tersebut secara signifikan.

Pemetaan dan Analisis Faktor Perubahan Waduk Gajah Mungkur

Peta probabilitas merupakan peta yang dihasilkan dari regresi logistik biner dengan menggunakan input berupa variabel-variabel yang dianggap dapat mempengaruhi laju persebaran sedimen di dalam waduk. Probabilitas ini dilakukan dengan membandingkan seberapa besar persebaran sedimen yang mungkin terjadi.

Hasil persamaan model regresi biner dapat digunakan sebagai dasar dalam pembuatan peta probabilitas perubahan penutup lahan. Komponen yang dibandingkan dalam analisis regresi logistik biner yang dilakukan adalah ada tidaknya perubahan yang terjadi pada penutup lahan tahun 2000 dengan tahun 2003 dan luas distribusi spasial sedimen yang terlihat dari citra tahun 2000 dengan tahun 2003 yang merupakan variabel dependen dalam kasus ini dengan berbagai kondisi faktor pendorong terjadinya sedimentasi yang merupakan variabel independen yang dapat dipresentasikan dalam sebuah piksel pada data raster.

Pemrosesan yang pertama adalah pemrosesan dengan menggunakan variabel dependen luas waduk. Perhitungan regresi logistik biner dilakukan dengan bantuan *software*. Dari hasil kalkulasi *software* yang dilakukan maka didapatkan persamaan regresi dengan rumus

$$\text{Logit Perubahan} = -0,93574639 + (5,25083344 * X_1) - (9,42504534 * X_2) - (8,40585272 * X_3) - (0,24622695 * X_4)$$

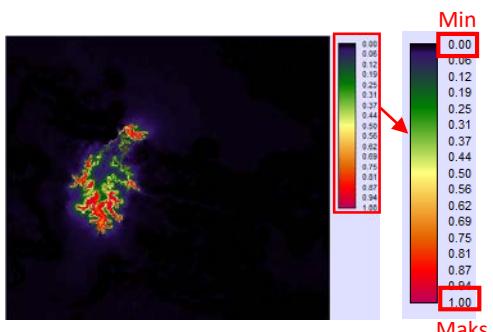
Keterangan:

Y: Perubahan dari perairan menjadi daratan;
X1: Batas Luar Sedimen Eksisting; X2: Muara Sungai; X3: Tepi Waduk; X4: Kemiringan Lereng.

Menurut Clark dan Hosking (1986) nilai *Pseudo R Square* dinyatakan relatif kuat jika lebih besar dari 0,2. Nilai *Pseudo R Square* yang dihasilkan dari pemrosesan pada penelitian ini sebesar 0,5418. Nilai tersebut sudah cukup besar dari 0,2 yang berarti pada penelitian ini hubungan antara variabel dependen dan independen dapat dikatakan kuat. Indeks kedua yang didapatkan dari hasil pemrosesan adalah *Odd Ratio*. *Odd Ratio* adalah nilai/rasio perbandingan antara kejadian sebenarnya suatu prediksi dan kejadian yang tidak sebenarnya

suatu prediksi. Batasan pemisah yang digunakan dalam *Odd Ratio* sendiri sebesar 0,5 dimana probabilitas di atas 0,5 dianggap berubah sedangkan probabilitas di bawah 0,5 dianggap tidak berubah. Hasil regresi yang dilakukan menghasilkan nilai *Odd Ratio* sebesar 86,2165. *Odd Ratio* dapat dikatakan dapat digunakan untuk prediksi jika nilainya lebih dari 1. Nilai yang didapat dari hasil pemrosesan dapat dikatakan sudah sangat jauh dari nilai 1 yaitu sebesar 86,2165. Sehingga dari sini dapat dikatakan bahwa proses prediksi dapat dilakukan sehingga penelitian dapat berlanjut. Hasil proses yang dilakukan mendapatkan nilai Kappa sebesar 0,3252. Nilai tersebut dianggap merupakan nilai tertinggi hasil kalkulasi yang dilakukan oleh software. Semua nilai probabilitas yang berada di bawah angka tersebut dianggap tidak berubah sedangkan nilai yang berada di atas angka tersebut dianggap berubah. Pada nilai yang dianggap berubah akan diberi identitas 1 dan identitas 0 untuk nilai yang dianggap tetap atau tidak berubah. Pemrosesan yang telah dilakukan telah disebutkan sebelumnya memiliki Indeks Kappa untuk perubahan luas waduk sebesar 0,3252. Dengan kata lain Indeks Kappa tersebut masuk dalam klasifikasi *Fair Agreement*. Indeks tersebut dapat dikatakan sedang.

Hasil pemrosesan yang telah dilakukan didapatkan nilai probabilitas dengan rentang nilai minimal 0 dan nilai maksimal 1. Pemrosesan yang dilakukan menggunakan unit pemetaan batas Daerah Aliran Sungai sehingga didapatkan nilai 0 yang dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3 : Nilai Probabilitas untuk Variabel Dependen Luas Waduk Multitemporal

Pemrosesan yang kedua adalah pemrosesan dengan menggunakan variabel dependen luas sedimen eksisting. Perhitungan regresi logistik

biner dilakukan dengan bantuan software. Dari hasil kalkulasi software yang dilakukan maka didapatkan persamaan regresi dengan rumus Logit Perubahan (Y) = 6,77717576 - (9.77247978*X1) + (1.56682787*X2) - (10.31502066*X3) - (0.02235513*X4)

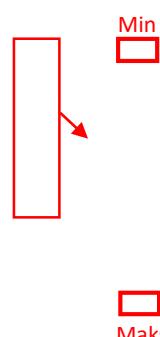
Keterangan:

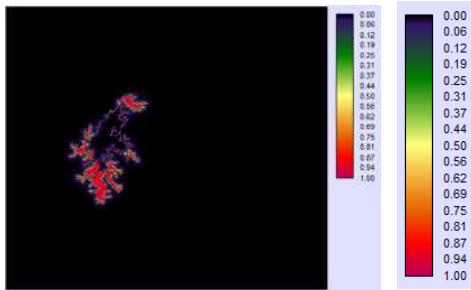
Y: Perubahan dari perairan menjadi daratan;
X1: Batas Luar Sedimen Eksisting; X2: Muara Sungai; X3: Tepi Waduk; X4: Kemiringan Lereng.

Menurut Clark dan Hosking (1986) nilai *Pseudo R Square* dinyatakan relatif kuat jika lebih besar dari 0,2. Nilai *Pseudo R Square* yang dihasilkan dari pemrosesan pada penelitian ini sebesar 0,8220. Nilai tersebut sudah cukup besar dari 0,2 yang berarti pada penelitian ini hubungan antara variabel dependen dan independen dapat dikatakan kuat. Indeks kedua yang didapatkan dari hasil pemrosesan adalah *Odd Ratio*. Hasil regresi yang dilakukan menghasilkan nilai *Odd Ratio* sebesar 2004,8516. *Odd Ratio* dapat dikatakan dapat digunakan untuk prediksi jika nilainya lebih dari 1. Nilai yang didapat dari hasil pemrosesan dapat dikatakan sudah sangat jauh dari nilai 1 yaitu sebesar 2004,8516. Sehingga dari sini dapat dikatakan bahwa proses prediksi dapat dilakukan sehingga penelitian dapat berlanjut. Hasil proses yang dilakukan mendapatkan nilai Kappa sebesar 0,5763. Indeks Kappa memiliki klasifikasi yang telah ditetapkan sebelumnya. Pemrosesan yang telah dilakukan telah disebutkan sebelumnya memiliki Indeks Kappa untuk perubahan luas waduk sebesar 0,5763. Dengan kata lain Indeks Kappa tersebut masuk dalam klasifikasi *Moderate Agreement*. Indeks tersebut dapat dikatakan besar.

Hasil pemrosesan yang telah dilakukan didapatkan nilai probabilitas dengan rentang nilai minimal 0 dan nilai maksimal 1.

Pemrosesan yang dilakukan menggunakan unit pemetaan batas Daerah Aliran Sungai sehingga didapatkan nilai 0 yang dapat dilihat pada gambar 4.





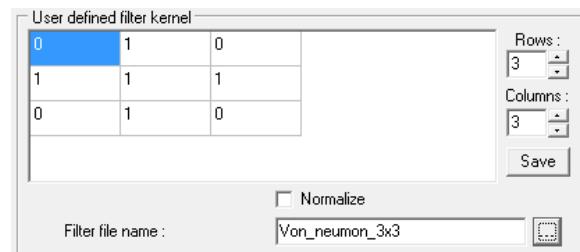
Gambar 4 : Nilai Probabilitas untuk Variabel Dependen Distribusi Spasial Sedimen Waduk Multitemporal

Pemodelan Spasial untuk Prediksi Pendangkalan Waduk Gajah Mungkur

Simulasi perlu dilakukan dalam sebuah pemodelan. Simulasi sendiri bertujuan untuk mendapatkan hasil akurasi yang baik dari sebuah model sehingga sebuah model dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. Simulasi yang digunakan merupakan hasil prediksi untuk tahun 2014.

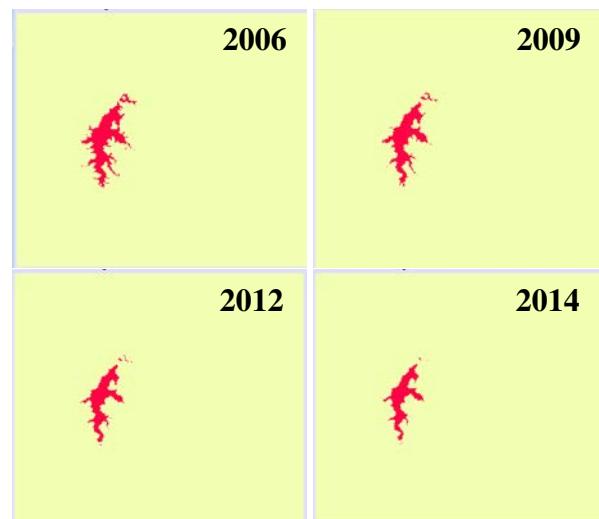
Pemodelan *Cellular Automata* merupakan pemodelan yang digunakan untuk mempertimbangkan suatu piksel dapat diprediksi akan berubah atau tidak. Dalam penelitian ini perubahan yang dimaksud ada dua macam. Perubahan yang pertama adalah perubahan yang terjadi dari tubuh air menjadi daratan yang dalam hal ini menggunakan variabel dependen perubahan luas waduk. Dalam hal ini perubahan yang terjadi adalah berkurangnya luasan dari waduk tersebut. Sedangkan perubahan yang kedua adalah perubahan dari tidak adanya sedimen yang dapat dilihat dari citra menjadi adanya sedimen yang dapat dilihat dari citra. Dalam hal ini perubahan yang terjadi adalah bertambahnya luasan sedimen yang dapat dilihat dari citra.

Filtering yang digunakan dalam pemodelan menggunakan *Von Neuman Neighborhood 3x3*. Model ketetanggan tersebut merupakan model ketetanggan dengan sembilan jendela. Model ini dipilih mengingat dari penelitian-penelitian sebelumnya memiliki akurasi model yang baik. Filtering yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5 : Von Neuman Neighborhood 3x3

Pemodelan simulasi dan prediksi ini menggunakan variabel dependen luas waduk multitemporal. Batasan piksel yang digunakan berfungsi sebagai pembatas perubahan piksel dalam pemodelan. Batas yang ditentukan merupakan batas yang telah ditentukan berdasarkan perhitungan pengurangan luas secara matematis. Hasil simulasi pemodelan luas waduk untuk tahun 2006, 2009, 2012, dan 2014 dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6 : Pemodelan Luas Waduk dengan *Cellular Automata*

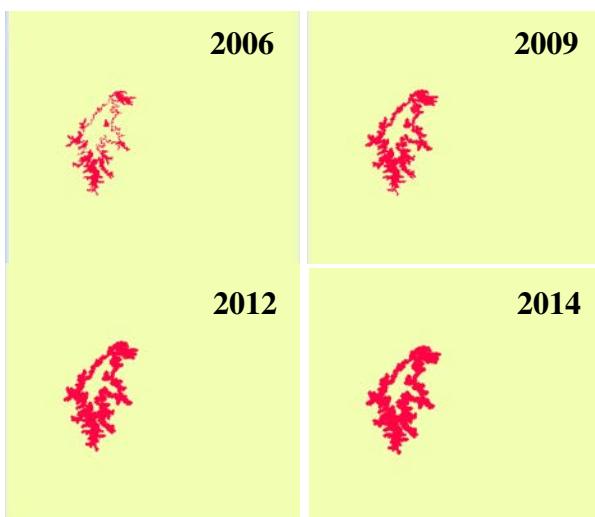
Gambar 6 menunjukkan luasan perairan yang masih belum menjadi daratan dimana simbol magenta adalah perairan dan simbol kuning adalah daratan. Pada luasan waduk terakhir yaitu tahun 2003 perairan memiliki luas sebesar 59.048 piksel atau setara dengan 53.143.200 m². Perubahan luas waduk yang terjadi dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 : Luas Simulasi Luasan Waduk

No.	Tahun	Luas
1.	2006	42.660.900 m ²
2.	2009	34.756.200 m ²
3.	2012	29.290.500 m ²
4.	2014	26.474.400 m ²

Sumber: Pemrosesan, 2014

Pemodelan simulasi dan prediksi yang kedua menggunakan variabel dependen distribusi spasial sedimen multitemporal. Batasan piksel yang digunakan berfungsi sebagai pembatas perubahan piksel dalam pemodelan. Batas yang ditentukan merupakan batas yang telah ditentukan berdasarkan perhitungan penambahan luas secara matematis. Hasil simulasi pemodelan luas waduk untuk tahun 2006, 2009, 2012, dan 2014 dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7 : Pemodelan Distribusi Spasial Sedimen dengan *Cellular Automata*

Gambar 7 menunjukkan luasan distribusi spasial sedimen yang tersebar diseluruh waduk dimana simbol magenta adalah distribusi sedimen dan simbol kuning adalah nonsedimen. Pada luasan sedimen terakhir yaitu tahun 2003 perairan memiliki luas sebesar 34.918 piksel atau setara dengan $31.426.200 \text{ m}^2$. Perubahan luas waduk yang terjadi dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 : Luas Simulasi Distribusi Spasial Sedimen Waduk

No.	Tahun	Luas
1.	2006	$33.732.000 \text{ m}^2$
2.	2009	$41.879.700 \text{ m}^2$
3.	2012	$45.330.900 \text{ m}^2$
4.	2014	$47.428.200 \text{ m}^2$

Sumber: Pemrosesan, 2014

Validasi Model

Validasi model merupakan salah satu komponen penting yang perlu dilakukan agar model yang dibangun dapat

dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Pada penelitian ini dilakukan validasi model pada hasil prediksi tahun 2006, 2009, 2012, dan 2014 di mana merupakan tahun saat penelitian ini dilakukan. Uji validasi dilakukan dengan metode *convolutions matrix* untuk menghitung overall akurasi serta indeks kappa.

Validasi Model Perubahan Luas Waduk

Validasi model perubahan luas waduk tahun 2006 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 85 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu perairan sebanyak 55 sampel dan daratan sebanyak 30 sampel. Akurasi model untuk prediksi luas waduk dengan estimasi luas waduk didapat 89,41% dengan Indeks Kappa sebesar 0,773.

Validasi model perubahan luas waduk tahun 2009 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 84 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu perairan sebanyak 45 sampel dan daratan sebanyak 40 sampel. Akurasi model untuk prediksi luas waduk dengan estimasi luas waduk didapat 82,14% dengan Indeks Kappa sebesar 0,644.

Validasi model perubahan luas waduk tahun 2012 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 84 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu perairan sebanyak 37 sampel dan daratan sebanyak 47 sampel. Akurasi model untuk prediksi luas waduk dengan estimasi luas waduk didapat 88,10% dengan Indeks Kappa sebesar 0,765.

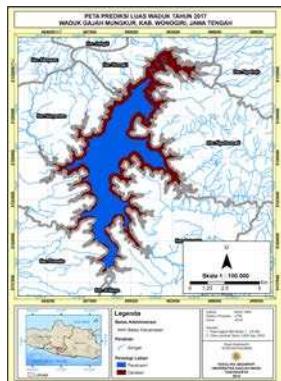
Validasi model perubahan luas waduk tahun 2014 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 84 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu perairan sebanyak 34 sampel dan daratan sebanyak 51 sampel. Akurasi model untuk prediksi luas waduk dengan estimasi luas waduk didapat 87,06% dengan Indeks Kappa sebesar 0,737.

Validasi Model Perubahan Distribusi Spasial Sedimen

Validasi model perubahan distribusi spasial sedimen tahun 2006 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 84 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu nonsedimen sebanyak 41 sampel dan sedimen sebanyak 43 sampel. Akurasi model untuk prediksi distribusi spasial waduk dengan estimasi distribusinya didapat 89,29% dengan Indeks Kappa sebesar 0,784.

Validasi model perubahan distribusi spasial sedimen tahun 2009 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 84 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu nonsedimen sebanyak 31 sampel dan sedimen sebanyak 53 sampel. Akurasi model untuk prediksi distribusi spasial waduk dengan estimasi distribusinya didapat 88,10% dengan Indeks Kappa sebesar 0,726.

Validasi model perubahan distribusi spasial

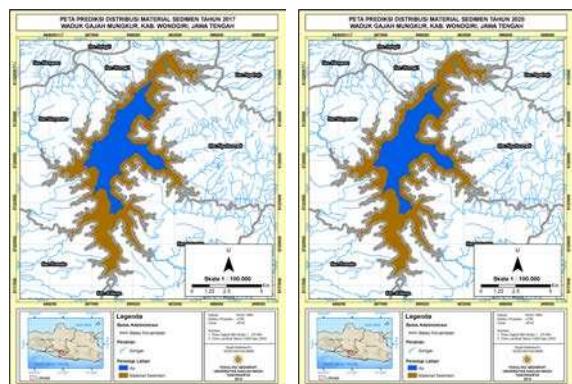


sedimen tahun 2012 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 85 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu nonsedimen sebanyak 58 sampel dan sedimen sebanyak 27 sampel. Akurasi model untuk prediksi distribusi spasial waduk dengan estimasi distribusinya didapat 89,41% dengan Indeks Kappa sebesar 0,776.

Validasi model perubahan distribusi spasial sedimen tahun 2014 menggunakan sampel yang diambil untuk model yang pertama ini sebanyak 85 sampel dengan persebaran yang merata. Jumlah sampel untuk masing-masing kelas yaitu nonsedimen sebanyak 61 sampel dan sedimen sebanyak 24 sampel. Akurasi model untuk prediksi distribusi spasial waduk dengan estimasi distribusinya didapat 84,71% dengan Indeks Kappa sebesar 0,776.

Analisis Prediksi Perubahan Luas Waduk dan Distribusi Spasial Sedimen Tahun 2017 dan 2020

Hasil pemodelan dengan menggunakan dua macam variabel dependen menunjukkan berbagai macam perubahan yang terlihat baik



dari segi luas waduk maupun distribusi spasial sedimen yang ada. Rata-rata akurasi yang diperoleh dapat dikatakan cukup tinggi. Untuk akurasi luas waduk didapatkan rata-rata sebesar 86,83%. Sedangkan nilai rata-rata akurasi yang diperoleh distribusi spasial sedimen memiliki rata-rata sebesar 87,88%. Dengan demikian prediksi yang digunakan untuk ke depannya menggunakan variabel dependen luas waduk dan luas distribusi spasial sedimen. Hal tersebut dilakukan untuk melakukan perbandingan antara kedua variabel dimana keduanya memiliki hasil validasi yang hampir seragam.

Gambar 8 : Peta Prediksi Luas Waduk Tahun 2017 dan 2020

Prediksi yang dilakukan adalah prediksi untuk 6 tahun ke depan yaitu tahun 2017 dan 2020. Prediksi yang dilakukan mengikuti rentang tiga tahunan. Hal tersebut dilakukan karena setiap tiga tahun sekali waduk dilakukan penggerukan sehingga waktu maksimal kondisi yang bisa didapatkan hanyalah rentang tiga tahun. Hasil yang pertama adalah prediksi luas waduk tahun 2017. Dalam hal ini yang dilihat merupakan luas waduk secara keseluruhan dimana prediksi dilakukan untuk melihat perairan yang benar-benar berubah menjadi daratan. Untuk tahun 2017 didapatkan luasan waduk yang dalam artian kali ini ada perairannya seluas 27.815 piksel yang setara dengan 25.033.500 m². Sedangkan pada tahun 2020 didapatkan luas sebanyak 26.749 piksel atau setara dengan 24.074.100 m². Untuk tahun 2017 didapatkan luasan distribusi spasial

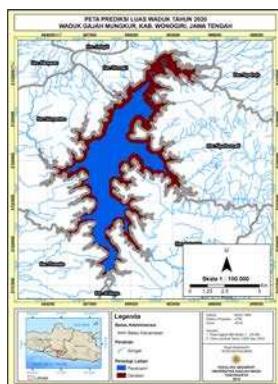
sedimen yang tersebar 40.395 piksel yang setara dengan 36.355.500 m². Sedangkan pada tahun 2020 didapatkan luas sebanyak 41.624 piksel atau setara dengan 37.461.600 m².

Gambar 8 : Peta Prediksi Distribusi Material Sedimen Tahun 2017 dan 2020

KESIMPULAN

Kondisi Waduk Gajah Mungkur mengalami perubahan. Untuk perubahan luas waduk pada tahun 2000 sampai 2003 didapatkan angka sebesar 13,08 km². Perubahan kondisi yang kedua adalah perubahan luas distribusi sedimen dari tahun 2000 sampai tahun 2003. Penambahan distribusi spasial sedimen dalam rentang waktu tiga tahun tersebut seluas 17,86 km².

Faktor yang berpengaruh pada perubahan kondisi waduk adalah jarak terhadap batas terluar sedimen eksisting, jarak dengan muara



sungai, jarak dari tepi waduk, serta kemiringan lereng. Pengaruh terbesar pada perubahan luas waduk adalah jarak terhadap muara sungai dengan nilai koefisien regresi 9,42504534. Pengaruh terbesar pada perubahan distribusi spasial sedimen waduk adalah jarak terhadap tepi waduk dengan koefisien regresi -10,31502066.

Akurasi luas waduk didapatkan rata-rata sebesar 86,83%. Sedangkan nilai rata-rata akurasi yang diperoleh distribusi spasial sedimen memiliki rata-rata sebesar 87,88%. Berdasarkan hasil simulasi dapat dilakukan pemetaan prediksi luas waduk dan distribusi spasial sedimen untuk tahun 2017 dan 2020. Untuk tahun 2017 didapatkan luasan waduk yang dalam artian kali ini ada perairannya seluas 27.815 piksel yang setara dengan 25.033.500 m². Sedangkan pada tahun 2020 didapatkan luas sebanyak 26.749 piksel atau setara dengan

24.074.100 m². Untuk tahun 2017 didapatkan luasan distribusi spasial sedimen yang tersebar 40.395 piksel yang setara dengan 36.355.500 m². Sedangkan pada tahun 2020 didapatkan luas sebanyak 41.624 piksel atau setara dengan 37.461.600 m².

DAFTAR PUSTAKA

- Asdak, C. 2004. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gajah mada University Press.
- Bintarto, R. 1982. *Metode Analisa Geografi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Burrough, P. A., & McDonell, R. A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. New York: Oxford University Press
- Central Water Commision. 1996. *Experience in Sedimentation of Indian Reservoirs and Current Scenario. Proceedings of the International Conference on Reservoir Sedimentation*, 1996, Volume I, pp.53-72.
- Danoedoro, Projo. 2012. *Pengantar Penginderaan Jauh Digital*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Deliar, A. 2010. *Pemodelan Hibrid Dalam Prediksi Dinamika Perubahan Tutupan Lahan (Studi Kasus: Wilayah Bandung)*, *Disertasi*. Bandung: Teknik Geodesi dan Geomatika, Institut Teknologi Bandung.
- Dibyosaputro, Suprapto, dan Sutikno. 1988. *Coastal Geomorphology of Parangtritis Yogyakarta*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Esri (Enviromental System Research Institute, Inc). 2005. *ArcGIS Help*. New York: ESRI.
- Greenlee, D. D. 1987. *Raster and Vector Processing for Scanned Linework*. USA: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 53 (10): 1383–1387.
- Jenson, S. K., and J. O. Domingue. 1988. *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. USA: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593–1600.
- Lillesand, T. M. and R. W. Kiefer. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley and Sons.
- Liu, J., Zhan, J., & Deng, X. 2005. *Spatio Temporal Pattern and Driving Forces of Urban Land Expansion in China During The*

- Economics Reform Area.* Diakses tanggal 3 Januari 2013 dari <http://www.ambio.kva.se>
- Liu, X., Li, X., Shi, X., Wu, S., & Liu, T. 2007. *Simulating Complex Urban Development Using Kernel-Based Non-Linear Cellular Automata. Ecological Modeling*, 211, 169-181. Diakses tanggal 3 Januari 2013 dari <http://www.sciencedirect.com/>
- M. Rahman, Mahyaya, Harisuseno, Donny, & Sisinggih, Dian. 2012. *Studi Penanganan Konservasi Lahan Di Sub Das Keduang Das Bengawan Solo Kabupaten Wonogiri*. Malang: Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang.
- Mohammad Arief Ilyas dan T. Budiharjo. 2002. *Tinjauan Pengaruh Erosi-Sedimentasi dan Upaya Konservasi Pada Beberapa Waduk di Pulau Jawa*. Prosiding Simposium Nasional Pencegahan Bencana Alam Sedimen. Yogyakarta: ISDM Project.
- Nursaban, Muhammad. 2008. *Evaluasi Sediment Yield Di Daerah Aliran Sungai Cisanggarung Bagian Hulu Dalam Memperkirakan Sisa Umur Waduk Darma*. Jurnal Penelitian Saintek, Vol. 13, No. 1, April 2008: 47-64.
- Paramitha, B. A. P. 2011. *Model Cellular Automata untuk Prediksi Perkembangan Wilayah menggunakan Citra Penginderaan Jauh Resolusi Menengah (Studi Kasus Wilayah Kedungsepur)*, Tesis. Yogyakarta: Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air. 2009. *Pedoman Pengelolaan dan Pengukuran Sedimen*. Jawa Barat: Badan Penelitian dan Pengembangan – Kementerian Pekerjaan Umum.
- Schiefer, Erik, Menounos, Brian, & Slaymaker, Olav. 2005. *Extreme Sediment Delivery Events Recorded in The Contemporary Sediment Record of a Montane Lake, Southern Coast*. Canadian Journal of Earth Sciences, Dec 2006; 43, 12; ProQuest Research Library pg. 1777.
- Sitanala Arsyad. 2012. *Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: Penerbit IPB.
- Soedibyo. 1993. *Teknik Bendungan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Star, J. and Estes, J. 1990. *Geographic Information Systems: An Introduction*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Susilo, B. 2005. *Model SIG-Binary Logistic Regression Untuk Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan (Studi Kasus di Daerah Pinggiran Kota Yogyakarta)*, Tesis. Bandung: Teknik Geodesi dan Geomatika, Institut Teknologi Bandung. Susilo, B. (2006). *Geokomputasi Berbasis Sistem Informasi Geografi dan Cellular Automata untuk Pemodelan Dinamika Perubahan Penggunaan Lahan di Daerah Pinggiran Kota Yogyakarta*, Laporan Penelitian. Yogyakarta: Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada
- Sutanto. 1987. *Penginderaan Jauh Jilid 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Sutanto. 1987. *Penginderaan Jauh Jilid 2*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. 1991. *On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data*. USA: Hydrological Processes 5: 81–100.
- Totok Gunawan. 1995. *Penginderaan Jauh Terapan untuk Studi Ekologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada.
- Willy H, Radolph. 2005. *Sedimentation Rate Predictive Model Using Digital Images at Bintuni Bay in Papua: A Methodological Approach*. Pertemuan Ilmiah Tahunan MAPIN XIV. pp. 109-112.
- Wyatt & Ralphs. 2003. *GIS in Land and Property Management*. Spon Press: New York.