

Pemrosesan Citra Satelit dan Pemodelan untuk Prediksi Penyebaran Banjir Bengawan Solo

Ratna Nur Tiara Shanty ¹⁾, Ir. Dadet Pramadihanto, M.Eng, Ph.D ²⁾, Ir. Wahjoe Tjatur Sesulihatien,
MT ³⁾

Jurusan Teknik Informatika, PENS – ITS Surabaya

Jl. Raya ITS, Surabaya

+62(31) 594 7280; Fax: +62(31) 594 6114

E-mail : tiara@student.eepis-its.edu , dadet@eepis-its.edu , wahyu@eepis-its.edu

Abstrak

Banjir adalah bencana yang hampir setiap tahun melanda Indonesia. Hal ini dapat disebabkan berbagai macam sebab. Curah hujan yang tinggi yang dapat menyebabkan air sungai meluber, terhambatnya saluran-saluran air, media penyerapan air yang sangat sedikit, pengrusakan lingkungan, dan sebagainya. Banjir akan mengakibatkan berbagai macam kerugian materiil atau mungkin kerugian moril. Berbagai hal dilakukan untuk mencegah ataupun menanggulangi, namun banjir masih saja terjadi.

Bengawan Solo merupakan sungai terpanjang di Pulau Jawa. Daerah-daerah di sekitar sungai tersebut juga merupakan daerah rawan banjir. Kejadian semacam ini tentu saja akan menyebabkan kerugian yang sangat besar, bahkan memungkinkan terjadinya korban jiwa. Oleh karena itu perlu adanya pemikiran kembali tentang pencegahan bencana banjir. Dalam hal ini diperlukan sistem permodelan penyebaran air untuk mengetahui perkiraan pergerakan air di sungai Bengawan Solo. Tentu saja sistem ini harus di sertai dengan penyaluran informasi yang akurat, tindakan penanganan dini banjir yang tepat, dan manajemen evakuasi yang bagus seandainya banjir sudah tidak terelakan. Jika hal ini terpenuhi, maka resiko terjadi banjir dapat dikurangi. Dan walaupun banjir masih terjadi, pergerakan air dapat diketahui dan dapat dilakukan upaya pencegahan-pencegahan ataupun evakuasi.

Kata Kunci : *Banjir, Sebaran, NDVI, Cellular Automata, Infiltrasi, Horton*

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan. Sehingga mempunyai sumber air yang melimpah. Dan air adalah unsur yang sangat penting untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari, baik individu ataupun industri.

Namun, hampir setiap tahun di Indonesia terjadi banjir. Hal ini dapat disebabkan berbagai macam sebab. Curah hujan yang tinggi yang dapat menyebabkan air sungai meluber, terhambatnya saluran-saluran air, media penyerapan air yang sangat sedikit, perusakan lingkungan, dan sebagainya. Banjir akan mengakibatkan berbagai macam kerugian materiil atau mungkin kerugian moril. Berbagai hal dilakukan untuk mencegah ataupun menanggulangi, namun banjir masih saja terjadi.

Bengawan Solo merupakan sungai terpanjang di Pulau Jawa. Daerah-daerah di sekitar sungai tersebut juga merupakan daerah rawan banjir. Kejadian semacam ini tentu saja akan menyebabkan kerugian yang sangat besar, bahkan memungkinkan terjadinya korban jiwa. Oleh karena itu perlu adanya pemikiran kembali tentang pencegahan bencana banjir.

Dalam hal ini diperlukan sistem permodelan penyebaran air untuk mengetahui perkiraan pergerakan air di sungai Bengawan Solo. Tentu saja sistem ini harus di sertai dengan penyaluran informasi yang akurat, tindakan penanganan dini banjir yang tepat, dan manajemen evakuasi yang bagus seandainya banjir sudah tidak terelakan. Jika hal ini terpenuhi, maka resiko terjadi banjir dapat dikurangi. Dan walaupun banjir masih terjadi, pergerakan air dapat diketahui dan dapat dilakukan upaya pencegahan-pencegahan ataupun evakuasi.

Proyek akhir ini dilakukan untuk membuat aplikasi tentang permodelan penyebaran air berdasarkan sungai Bengawan Solo. Data-data yang berasal dari satelit mengenai peta, kontur tanah, curah hujan, dan ketinggian air diolah dengan suatu algoritma sehingga mengeluarkan sebuah peta tentang perkiraan penyebaran air.

1.2 Rumusan Permasalahan

1. Mengklasifikasi area klasifikasi area terjadinya banjir berdasarkan daerah genangan air yang berada disekitar sungai bengawan solo.
2. Menentukan variabel-variabel yang mempengaruhi penyebaran. Yaitu : curah hujan dan durasi waktu. Dan dibutuhkan data-data mengenai ketinggian air, elevasi tanah, curah hujan, kecepatan aliran sungai, dan daya serap tanah yang dibuat dinamis.

3. Memodelkan penyebaran banjir pada daerah aliran sungai (DAS) Bengawan Solo dengan visualisasi (2 dimensi).

1.3 Penelitian Terkait

Pada tinjauan pustaka ini akan dibahas tentang teori – teori dan penelitian terdahulu yang menunjang dalam menyelesaikan proyek akhir ini. Beberapa penunjang pada proyek akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Arif Rachman Himawan. *Klasifikasi Area Pada Citra Satelit Dan Penerapannya Pada Pedeteksian Banjir Di Situs Bengawan Solo*, PENS–ITS, 2009

Pada penelitian ini, penulis menggunakan konsep-konsep sebagai berikut :

Citra Normalisasi (NDVI) : adalah perhitungan citra yang digunakan untuk mengetahui tingkat kehijauan, yang sangat baik sebagai awal dari pembagian daerah vegetasi. NDVI dapat menunjukkan parameter yang berhubungan dengan parameter vegetasi, antara lain, biomass dedaunan hijau, daerah dedaunan hijau dan *hence* yang merupakan nilai yang dapat diperkirakan untuk pembagian vegetasi.

Hasil keseluruhan dari penelitian ini, adalah sistem dapat telah dapat mendeteksi area awal terjadinya banjir berdasarkan daerah genangan air yang berada disekitar sungai bengawan solo.

2. Muhammad Nunu Sanusi. *Prediksi Penyebaran Banjir Disitus Bengawan Solo Berdasarkan Curah Hujan Dan Elevasi Permukaan Tanah*, PENS–ITS, 2009

Pada penelitian ini, penulis menggunakan metode cellular automata untuk membuat sistem yang dapat memprediksi penyebaran banjir di daerah aliran sungai Bengawan Solo. Dan masih terdapat kekurangan pada hasil output. Adapun kekurangan tersebut adalah sebagai berikut :

- a. Variabel daya serap tanah masih dalam kondisi konstan. Akibatnya menghasilkan akurasi prediksi yang kurang.
- b. Jika terdapat dataran yang lebih rendah dari area yang diseleksi sebagai daerah yang terkena hujan, maka air belum dapat dimodelkan mengalir ke dataran yang lebih rendah tersebut. Mengingat sifat air adalah mengalir dari tempat yang tinggi ke tempat yang rendah.

1.4 Tujuan Proyek

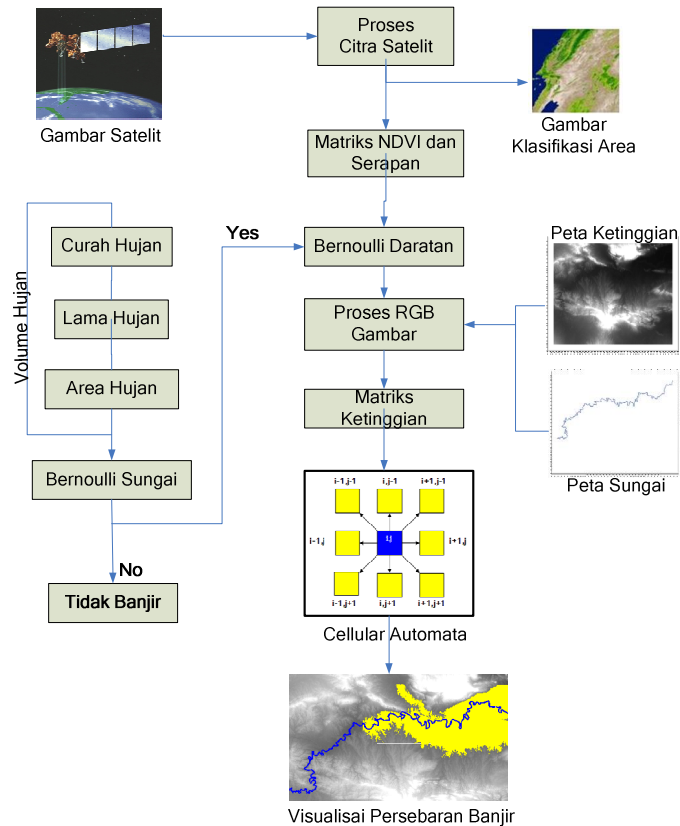
Tujuan proyek akhir ini adalah memproses data satelit dan membuat permodelan dari penyebaran air bengawan solo yang kemudian dapat digunakan untuk memprediksi penyebaran banjir selanjutnya.

1.5 Kontribusi Proyek

Hasil dari proyek akhir ini yaitu diharapkan dapat membuat visualisasi tentang penyebaran air di daerah aliran sungai Bengawan Solo berdasarkan ketinggian permukaan tanah, dan tekanan air menggunakan software open source. Sehingga pengguna aplikasi komersial dapat beralih kepada software open source.

2. Rancangan Sistem

Pada proyek akhir ini, terdapat beberapa sub proses yang memiliki keterkaitan. Berikut adalah blok diagram gambaran proses yang dilakukan secara keseluruhan.



Terdapat dua proses utama yang saling berhubungan, yaitu :

1. Pemrosesan citra satelit, yang digunakan untuk melakukan composite gambar satelit, penghitungan nilai NDVI, mengklasifikasi data vegetasi, mengklasifikasi daerah banjir, mentransformasi citra satelit
2. Pemodelan dan Visualisasi secara 2 dimensi. Digunakan untuk mengetahui prediksi persebaran air berdasarkan curah hujan dan durasi tertentu.

2.1 Memasukkan 3 channel dari 10 data satelit landsat

- a. Band 5 (untuk : membedakan tipe tanaman dan kesehatan tanaman. Membedakan awan, salju dan es).
- b. Band 4 (untuk : meneliti biomas tanaman dan juga membedakan batas tanah-tanaman, dan daratan-air).
- c. Band 2 (untuk : mendeteksi tanaman).

2.2 Melakukan proses penggabungan

Penggabungan citra dilakukan dengan cara menggabungkan tiap pixel dari band – band yang digunakan (5, 4, 3), sehingga menjadi sebuah gambar baru.

Dari proses ini didapatkan gambar RGB yang berasal dari gabungan 3 channel yaitu channel 5 (sebagai R), 4 (sebagai G), dan 2 (sebagai B).

2.3 Citra Normalisasi (Normalized Difference Vegetation Index)

Proses ini dilakukan untuk menormalisasi gambar, sehingga didapatkan nilai tingkat vegetasi (penghijauan), untuk mengetahui pembagian area vegetasi atau non vegetasi.

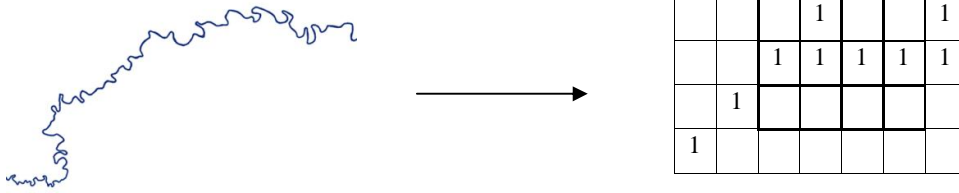
Pada proses ini, diperlukan dua channel dari citra satelit, untuk didapatkan nilai NDVI nya, yaitu :

- a. Band 4 (untuk : meneliti biomas tanaman dan juga membedakan batas tanah-tanaman, dan daratan-air).
- b. Band 3 (yang paling berguna untuk membedakan tipe tanaman)

Proses perhitungan dilakukan dengan membandingkan pengurangan *channel* 4 dan *channel* 3 dengan penjumlahan dari keduanya. Perhitungan tersebut dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$NDVI = \frac{\text{Band 4} - \text{Band 3}}{\text{Band 4} + \text{Band 3}}$$

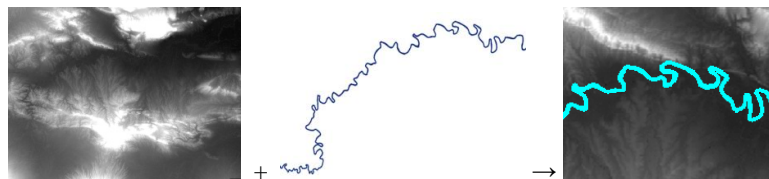
2.4 Memberikan nilai 1 untuk gambar sungai



Untuk memudahkan dalam pendeteksian gambar sungai, maka pada matriks peta sungai diberikan nilai 1. Sedangkan untuk non sungai, diberi nilai 0.

2.5 Load Gambar dan penggabungan Peta sungai + DEM

Gambar di atas, merepresentasikan ketinggian di wilayah bojonegoro. Semakin terang atau mendekati putih maka ketinggian daerah tersebut semakin tinggi.



Gambar : Hasil Penggabungan Peta Sungai + DEM

Termasuk gambar grayscale yang terdiri dari penggabungan dua object, yaitu peta sungai dan peta ketinggian, yaitu :

- Variabel untuk peta ketinggian menyimpan nilai RGB dalam jangkauan 0 sampai 255 dan koordinat X, Y dari masing-masing pixel gambar tersebut.
- Sedangkan variabel untuk peta sungai hanya menyimpan nilai matriks 0 (bukan sungai) dan 1 (sungai). Variabel sungai juga menyimpan koordinat X dan Y dari masing-masing pixel.

2.6 Curah Hujan

Satuan curah hujan menurut Standar Internasional adalah milimeter. Pada sistem ini, nilai curah hujan dapat diinputkan oleh user. Jadi, curah hujan di sini bersifat dinamis.

Berikut adalah penghitungan konversi curah hujan dari satuan *milimeter* ke satuan *meter* :

$$\text{Curah Hujan} = \text{curah Hujan} / 1000;$$

2.7 Durasi Hujan

Nilai durasi hujan disini, juga dapat diinputkan oleh user. Satuan durasi (lama) hujan yang dapat dimasukkan adalah jam.

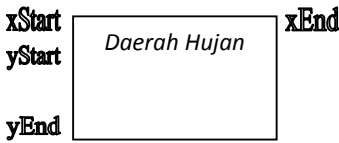
Namun, untuk mengetahui proses per-menitnya, maka sistem akan mengubahnya ke dalam satuan *menit*.

Jika diketahui : 1 jam = 60 menit, maka penghitungannya adalah

$$\text{Lama Menit} = \text{lama Jam} * 60;$$

2.8 Daerah Hujan dan Luas Hujan

Daerah Hujan dapat dimasukkan oleh user dengan cara *drag and drop* pada gambar di sekitar sungai. Daerah tersebut ditandai berupa segi empat (rectangle), yang kemudian dapat dihitung sebagai luas wilayah hujan. Untuk detailnya, berikut adalah ilustrasi dan prinsip matematisnya :



$$\text{horizontal} = x\text{End} - x\text{Start}$$

$$\text{vertikal} = y\text{End} - y\text{Start}$$

Tiap meter pada daerah yang terkena hujan mempunyai 100 meter x 100 meter daerah sebenarnya. Maka penghitungannya adalah sebagai berikut :

$$\text{Luas Hujan} = \text{horizontal} * \text{vertikal} * 10 * 10;$$

2.9 Volume Hujan

Dari hasil penghitungan luas hujan dan curah hujan yang telah dilakukan di atas, maka dapat dihitung volume hujan yang turun. Berikut adalah penghitungan untuk mendapatkan volume hujan total :

$$\text{Volume Hujan} = \text{luas Hujan} * \text{curah Hujan} * \text{lama Jam};$$

Sedangkan untuk menghitung volume hujan yang dihasilkan per satuan **menit** adalah :

$$\text{Volume Hujan} = (\text{luas Hujan} * \text{curah Hujan}) / 60;$$

2.10 Volume Hujan yang masuk ke sungai

Perlu diketahui, bahwa tidak semua volume hujan masuk ke sungai. Namun, ada beberapa volume yang turun ke daratan di sekitar sungai. Maka untuk mengetahuinya, dapat dilakukan penghitungan kasar sebagai berikut :

- Menghitung luas sungai yang ada di dalam kotak hujan yang dibuat oleh user.

			1			
		1	1		1	
	1			1		1
1						
1						

Gambar di atas adalah representasi peta ketinggian (kotak yang tidak bernilai) dan sungai (yang bernilai 1), serta daerah hujan (kotak yang berwarna cokelat).

Maka, untuk menghitung luas sungai yang di wilayah hujan, sistem akan menelusuri kotak yang bernilai 1 sepanjang wilayah hujan yang diberi warna cokelat pada gambar di atas.

- Setelah mendapatkan nilai luasnya, barulah menghitung volume hujan yang turun ke sungai.

$$\text{volume} = \text{luasSungai di wilayah hujan} * \text{curah Hujan};$$

2.11 Kapasitas Sungai dan Volume normal air yang ada di sungai sebelum hujan

Berdasarkan data yang diperoleh dari Bojonegoro, kapasitas sungai yang dimiliki adalah sekitar 28.700.000 meter³.

Dalam kondisi sebelum hujan, sungai Bengawan Solo mempunyai volume air sebesar 25.880.000 meter³ hingga 26.420.000 meter³.

2.12 Fungsi menghitung Luas Sungai pada Peta :

Sistem ini dapat menghitung luas sungai yang ada pada peta. Adapun cara yang dilakukan adalah dengan menelusuri seluruh gambar, dan menyisipkan kondisi pencarian matriks gambar sungai yang bernilai 1.

		1		
	1		1	1
1				

Kemudian, hitung jumlah matriks yang bernilai 1 pada seluruh peta. Simpan pada variabel `Pixel`. Untuk mencari luas keseluruhan, maka penghitungannya adalah :

$$\text{Luas Sungai} = \text{Pixel} * \text{skala gambar}$$

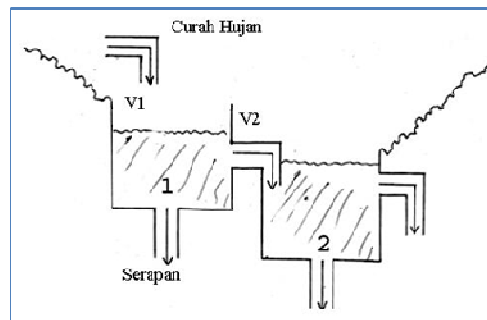
2.13 Kedalaman Sungai

Pada poin – poin sebelumnya, telah diketahui bagaimana mendapatkan luas sungai pada peta, dan data kapasitas sungai seluruhnya. Jadi, untuk menghitung kedalaman rata-rata sungai adalah sebagai berikut :

$$\text{kedalaman} = \text{kapasitasSungai} / (\text{luasSungai});$$

2.14 Persamaan Bernoulli

Pada gambar di bawah ini terlihat ada dua bejana. Bejana nomor 1 dan nomor 2. Bejana tersebut diibaratkan sebagai sungai dan dataran yang mempunyai ketinggian berbeda. Sesuai dengan prinsipnya, maka air akan mengalir dari tempat tinggi ke tempat yang rendah.



$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \text{serapan}$$

dimana:

- P_1 adalah tekanan udara atmosfer di bejana nomor 1. Sedangkan P_2 adalah tekanan di bejana nomor 2.
- v_1 dan v_2 adalah kecepatan di bejana nomor 1 dan 2 dalam mengalirkan air ke tempat yang lebih rendah. (m/s^2)
- ρ adalah massa jenis air. Yaitu : 1000 kg/m^3 .
- h_1 adalah ketinggian di bejana nomor 1. Sedangkan h_2 adalah ketinggian di bejana nomor 2.
- serapan* adalah nilai daya serap tanah terhadap air.

Karena nilai P_1 dan P_2 diasumsikan tidak ada tekanan, serta nilai ρ pada ruas kiri dan kanan nilainya adalah sama, maka variabel–variabel tersebut dilenyapkan menjadi :

$$gh_1 + \frac{1}{2}v_1^2 = gh_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + \text{serapan}$$

Dari persamaan diatas, disederhanakan lagi menjadi :

$$g(h_2 - h_1) - \text{serapan} = \frac{1}{2}v_2^2 - \frac{1}{2}v_1^2$$

$$g(h_2 - h_1) - \text{serapan} = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$$

$$2g(h_2 - h_1) - \text{serapan} = v_2^2 - v_1^2$$

$$2g(h_2 - h_1) - \text{serapan} + v_1^2 = v_2^2$$

Karena tidak diketahuinya kecepatan awal, maka nilai v_1 pada awal waktu, diasumsikan dengan nilai 0. Untuk mengetahui nilai kecepatan aliran di v_2 adalah

$$v_2 = \sqrt{2g(h_2 - h_1) - \text{serapan} + v_1^2}$$

Nilai v_1 yang tadinya 0, maka untuk selanjutnya nilai tersebut adalah assignment dari nilai v_2 . Jadi dituliskan seperti ini:

$$v_1 = v_2$$

2.15 Proses Hujan Masuk Sungai

Berikut adalah alur proses hujan yang masuk ke sungai sehingga menyebabkan luapan pada sungai :

hujan masuk sungai → sungai menampung → alirkan ke laut

- Pertama, sejumlah volume hujan yang telah dihitung (per-menit) di atas, masuk ke dalam sungai.
- Kemudian, sungai akan menampung dan mengalirkannya ke laut (dihitung per-menit).
- Dua alur di atas ini, akan terus diproses (di-looping) hingga batas kondisi :

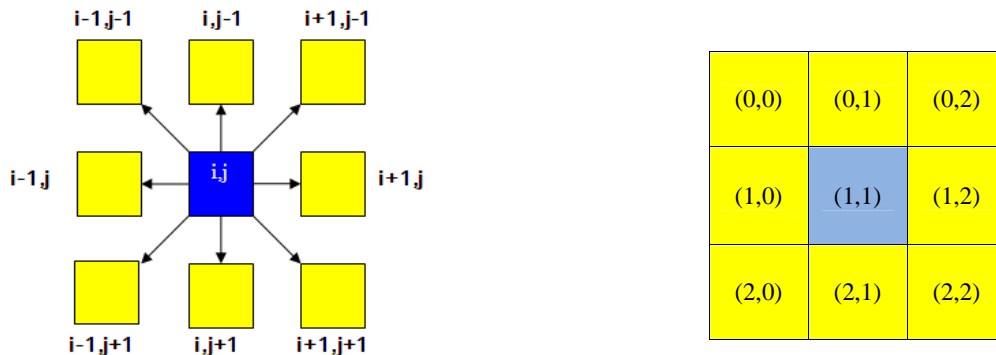
hujan masuk sungai > (sungai menampung - alirkan ke laut)

Artinya, jika volume hujan yang turun lebih besar dari kemampuan daya tampung dan kemampuan sungai untuk mengalirkan airnya, maka sistem memutuskan bahwa terjadi **banjir**.

2.16 Metode Cellular Automata untuk visualisasi 2 dimensi penyebaran banjir

Sesuai dengan sifat air yaitu mengalir dari tempat tinggi ke tempat rendah. Dengan metode ini yang prinsipnya adalah ketetanggaan, maka titik pusat diasumsikan oleh sebagai tempat yang pertama kali ada genangan air. Kemudian 8 tetangganya adalah tempat yang siap menampung genangan yang meluber dari titik pusat.

Untuk mengetahui tetangga mana yang akan menerima luberan, maka yang mempunyai nilai terkecil adalah yang akan menerimanya. Berikut ini adalah representasi model dari cellular automata 2 dimensi, ukuran 3x3.



Gambar : Metode Cellular Automata 3x3

2.17 Penerapan Persamaan Bernoulli pada Cellular Automata

Hasil penyederhanaan persamaan bernoulli di atas, selanjutnya digunakan sebagai perbandingan nilai bernoulli pada titik pusat dengan 8 titik tetangganya. Yang mana, nilai bernoulli yang terkecil diantara 8 titik tetangganya, akan menerima luberan air dari titik pusat yang telah melebihi kapasitas. Berikut adalah proses-prosesnya :

- Mendapatkan nilai bernoulli masing-masing pixel :

$b[i-1][j-1]$	$b[i][j-1]$	$b[i+1][j-1]$
$b[i-1][j]$	$b[i][j]$	$b[i+1][j]$
$b[i-1][j+1]$	$b[i][j+1]$	$b[i+1][j+1]$

Nilai bernouli tiap pixel, disimpan dalam variabel $b[][]$

- Membandingkan nilai terkecil titik pusat dengan 8 titik tetangganya, contoh pada cell 3x3 berikut :

5	4	4
2	1	3
6	3	7

Hitung selisih antara pixel pusat dengan 8 pixel tetangganya :
Yaitu : (5-1), (4-1), (2-1), (3-1), (6-1), (3-1), (7-1)

Tentukan selisih minimum diantara mereka :

Minimum Value ((5-1), (4-1), (2-1), (3-1), (6-1), (3-1), (7-1))

Maka persebaran banjir selanjutnya akan mengarah ke pixel (2-1)

2.18 Proses Peluberan Air dari Sungai ke Daratan

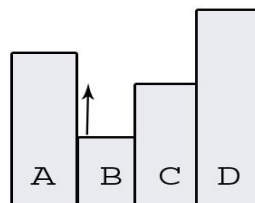
Setelah sistem memutuskan bahwa terjadi **banjir**, maka tugas selanjutnya adalah memproses peluberan air yang dihasilkan dari sungai untuk disebarakan ke daratan. Berikut adalah alurnya :

Air dari Sungai → meluber ke daratan → air di serap

- Pertama, sistem menelusuri daerah pinggiran sungai. Kemudian, daerah tersebut, dicari nilai bernoulli terendah.
- Air ditampung oleh daratan tersebut hingga batas volume maksimum tampungan. Adapun nilai volume maksimum air yang dapat ditampung per pixel daratan, adalah :

$$volume = panjang \times lebar \times kedalaman \text{ per pixel}$$

- Kedalaman per pixel, didapatkan dari hasil pengurangan nilai ketinggian pixel tersebut dengan ketinggian 8 pixel tetangganya. Berikut adalah representasi gambar ketinggian tiap cell dilihat dari samping :



Jika kita ingin mendapatkan kedalaman pada koordinat (B), maka yang terlebih dahulu harus dilakukan adalah mencari selisih koordinat (B) dengan koordinat (A) (C) (D)

Selanjutnya, cari nilai selisih ketinggian terkecil dari hasil penghitungan tadi, untuk mendapatkan kedalaman pixel koordinat (B).

- Alur di atas akan diproses terus (di-looping) hingga kondisi :

Air dari Sungai > daratan menampung - menyerap air

Artinya, jika luberan yang dihasilkan oleh sungai lebih besar dari daya tampung tiap pixel daratan dan kemampuan tanah dalam menyerap air, maka dataran yang lebih tinggi, siap menampung air dari luberan sungai.

2.19 Mendapatkan Nilai Ketinggian berdasarkan Warna Peta

Nilai ketinggian diperlukan untuk patokan proses penyebaran banjir. Karena adanya gravitasi bumi, maka air akan mengalir dari dataran tinggi ke dataran rendah. Berikut adalah function untuk mendapatkan ketinggian :

```
baseHeightMap[i][j]=heightImage.getRGB(j, i) >> 16 & 0xFF;
```

Untuk proses membaca warnanya digunakan fungsi yang telah disediakan di java. Yaitu, fungsi `getRGB`.

Statement `>> 16 & 0xFF` adalah mengambil sampel warna merah, karena pada prinsipnya gambar Grayscale mempunyai nilai **Red**, **Green**, dan **Blue** yang sama. Jadi, boleh diambil sampel warna salah satu dari ketiganya.

Kemudian dari hasil pengolahan warna, akan didapatkan matriks nilai-nilai ketinggian, yang kemudian dimasukkan ke dalam variable `baseHeightMap[i][j]`.

2.20 Persamaan Horton untuk Daya Serap Tanah terhadap Waktu

Nilai serapan bergantung pada jenis tanah. Apakah itu tanah yang bervegetasi (mempunyai daya serap tinggi) ataukah tanah yang non vegetasi (mempunyai daya serap rendah). Nilai-nilai vegetasi, didapatkan dari hasil penghitungan NDVI yang telah dilakukan pada langkah 4 pada sub pembuatan sistem *Pemrosesan Citra Satelit*.

Tanah yang berbeda-beda menyebabkan air yang meresap dengan laju yang berbeda-beda pula. Setiap tanah memiliki daya serap yang berbeda, f , yang diukur dalam mm/jam. Tingkat resapan tanah adalah jumlah air yang masuk dalam tanah. Bertambah terus untuk jangka waktu yang lama. Maka dari itu, nilai f_c turun ke bawah hingga batas waktu yang ditentukan.

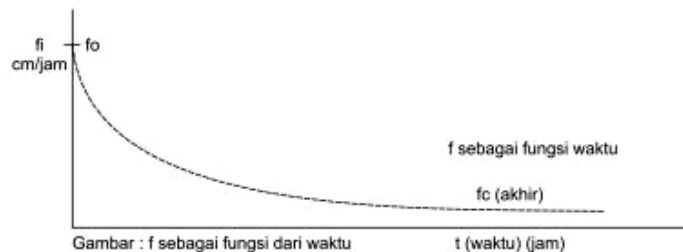
Adapun hubungan antara kapasitas daya serap tanah dengan waktu, dinyatakan dalam persamaan Horton sebagai berikut :

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt}$$

Dimana :

- t adalah waktu.
- e adalah konstanta yang nilainya 0.45
- f adalah kapasitas infiltrasi (daya serap tanah) pada sembarang waktu,
- f_o adalah kapasitas infiltrasi awal pada $t = 0$,
- f_c adalah kapasitas infiltrasi setelah mencapai harga konstan,
- k adalah konstanta positif yang bergantung pada jenis tanah dan tumbuhan penutup tanah,

Hubungan antara nilai daya serap dengan waktu, direpresentasikan melalui grafik di bawah ini :



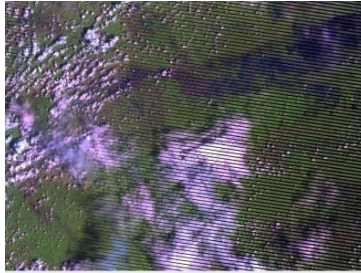
Gambar : Grafik Hubungan Nilai Daya Serap dengan Waktu

Berikut adalah data nilai f_o dan f_c yang mewakili untuk jenis wilayah yang berbeda-beda :

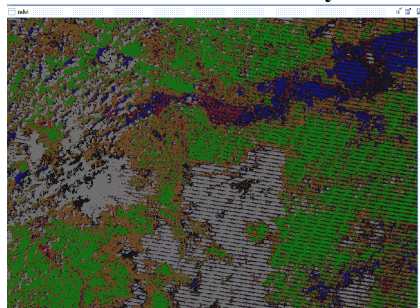
Nama Wilayah	f_c	f_o	Konstanta
	m/menit	m/menit	
Wilayah Air	0	0	0
Perumahan Penduduk	0.03	4.06	0.45
Daerah Bebatuan	0.002	0.03	0.02
Padang Rumput dan Semak – Semak	0.005	11.62	0.78
Hutan	0.079	12.84	0.65

3. Pengolahan Data

3.1 Hasil pengolahan tiga channel untuk digabung menjadi gambar baru yang berkomposisi R,G dan B :



3.2 Hasil pengolahan channel 4 dan 3 untuk diklasifikasi NDVI nya :



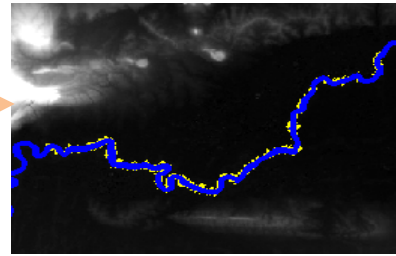
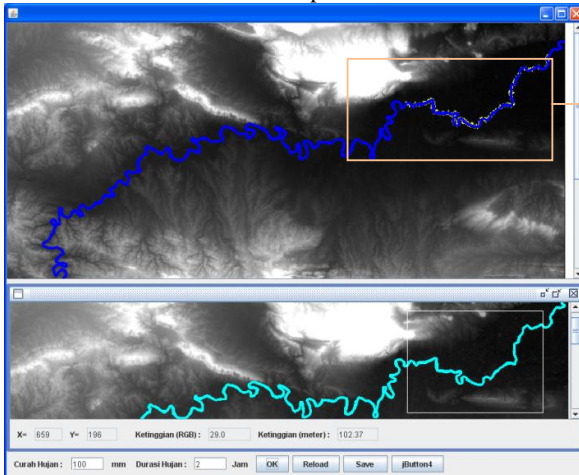
3.3 Output hasil pembagian daerah berdasarkan nilai NDVI masing-masing.

Daerah Klasifikasi	Range nilai NDVI dan RGB
Daerah Air	NDVI = - 0,3 – 0 R = 16 – 50 G = 18 – 59 B = 8 – 255
Daerah Awan	NDVI = -1 – 0,01 R = 110 – 255 G = R ± (0,1 X R) B = R ± (0,1 X R)
Daerah Daratan & Tanah Kosong	NDVI = 0 – 1
Daerah Padang Rumput dan Semak – semak	NDVI = 0,15 – 0,3
Daerah Hutan Tropis	NDVI = 0,35 – 0,8

Hasil yang terlihat di atas, dapat disimpulkan bahwa nilai serapan telah diketahui untuk masing-masing daerah. Yang kemudian nilai-nilai itu diproses lagi, untuk pengaruh persebaran banjir.

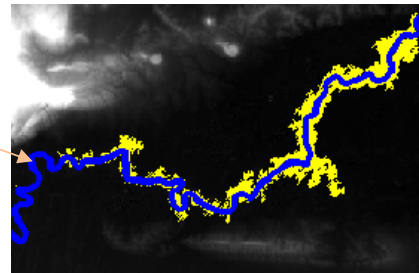
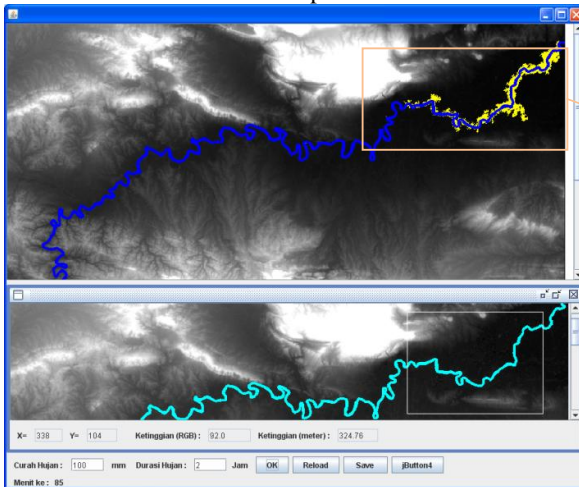
3.4 Output hasil uji coba sistem persebaran banjir dengan durasi dan curah hujan tertentu

- Hasil visualisasi sebaran pada menit ke 34 :



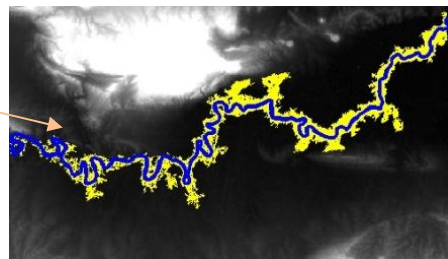
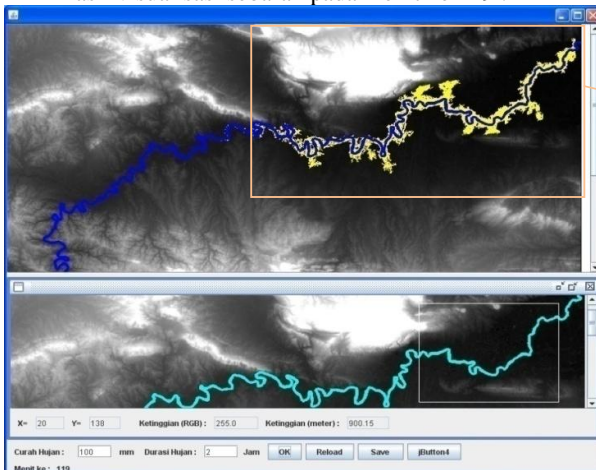
Pada gambar diatas, terlihat bahwa sebaran banjir di sekitar sungai, masih sedikit.

- Hasil visualisasi sebaran pada menit ke 85 :



Setelah menit ke-85, genangan yang awalnya di daerah terendah, menyebar ke daerah lain yang lebih tinggi.

- Hasil visualisasi sebaran pada menit ke 119 :



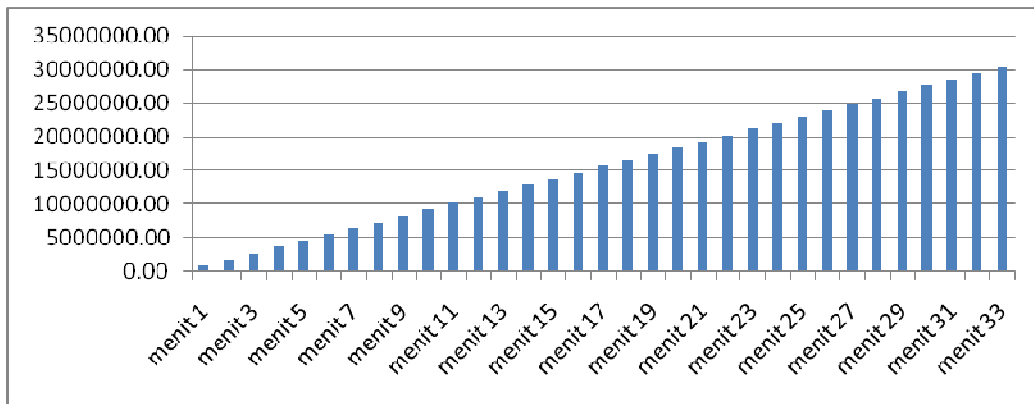
Setelah menit ke-119, sebaran banjir terlihat lebih besar dibandingkan dengan menit-menit sebelumnya.

- Tabel hasil proses penghitungan penambahan volume sungai dengan waktu (per menit), hingga sungai dinyatakan meluber karena melampaui batas maksimum kapasitas sungai.

Waktu	Perubahan Volume Sungai
menit 1	920723.94
menit 2	1841447.90
menit 3	2762171.80
menit 4	3682895.80
menit 5	4603619.50
menit 6	5524343.50
menit 7	6445067.50
menit 8	7365791.50
menit 9	8286515.50
menit 10	9207239.00
menit 11	10127963.00
menit 12	11048687.00
menit 13	11969411.00
menit 14	12890135.00
menit 15	13810859.00
menit 16	14731583.00

menit 17	15652307.00
menit 18	16573031.00
menit 19	17493754.00
menit 20	18414478.00
menit 21	19335202.00
menit 22	20255926.00
menit 23	21176650.00
menit 24	22097374.00
menit 25	23018098.00
menit 26	23938822.00
menit 27	24859546.00
menit 28	25780270.00
menit 29	26700994.00
menit 30	27621718.00
menit 31	28542442.00
menit 32	29463166.00
menit 33	30383890.00

- Diagram hasil proses penghitungan penambahan volume sungai dengan waktu (per menit)



Pada diagram di atas, diketahui bahwa tiap menit, volume air dalam sungai mengalami peningkatan yang signifikan. Hingga pada akhirnya, sungai tersebut meluber.

- Hasil perbandingan bernouli titik pusat dengan 8 tetangganya :

```

Output - Gdms (run-single)
Kooridinat Pusat = 603 128
---Perbandingan dg 8 Tetangganya---
bernouli tetangga 602 127 = 40.750679996979436
bernouli tetangga - bernouli pusat = -6.534705546421179

bernouli tetangga 602 128 = 40.79853771885678
bernouli tetangga - bernouli pusat = -6.486847824543837

bernouli tetangga 602 129 = 40.799124227351456
bernouli tetangga - bernouli pusat = -6.486261316049159

bernouli tetangga 603 127 = 47.3076859880403
bernouli tetangga - bernouli pusat = 0.022300444639682837

MINIMUM SEMENTARA = 0.022300444639682837
bernouli tetangga 603 128 = 47.285385543400615
bernouli tetangga - bernouli pusat = 0.0

bernouli tetangga 603 129 = 48.02588245460358
bernouli tetangga - bernouli pusat = 0.7404969112029676

bernouli tetangga 604 127 = 44.97228666923402
bernouli tetangga - bernouli pusat = -2.3130988741665917

bernouli tetangga 604 128 = 44.964122216154
bernouli tetangga - bernouli pusat = -2.321263327246612

bernouli tetangga 604 129 = 44.96403142753276
bernouli tetangga - bernouli pusat = -2.3213541158678552

Pixel wilayah hujan: k = 603 l = 127
SELISIH MINIMUM = 0.022300444639682837
Wilayah : Tidak Jelas
Luberan Masuk = 6.230494E7
serapan total : 0.0
kapasitas maks pixel = 1.0943E8
luberan yg ditampung : 6.230494E7

```

Cellular Automata bekerja untuk menentukan arah pergerakan selanjutnya. Dari hasil diatas, terlihat bahwa selisih bernouli pusat dengan 8 tetangganya yang paling minimum, yang akan menerima luberan selanjutnya. Lihat gambar lingkaran pada hasil diatas.

- Tabel hasil penghitungan serapan di wilayah yang berbeda.

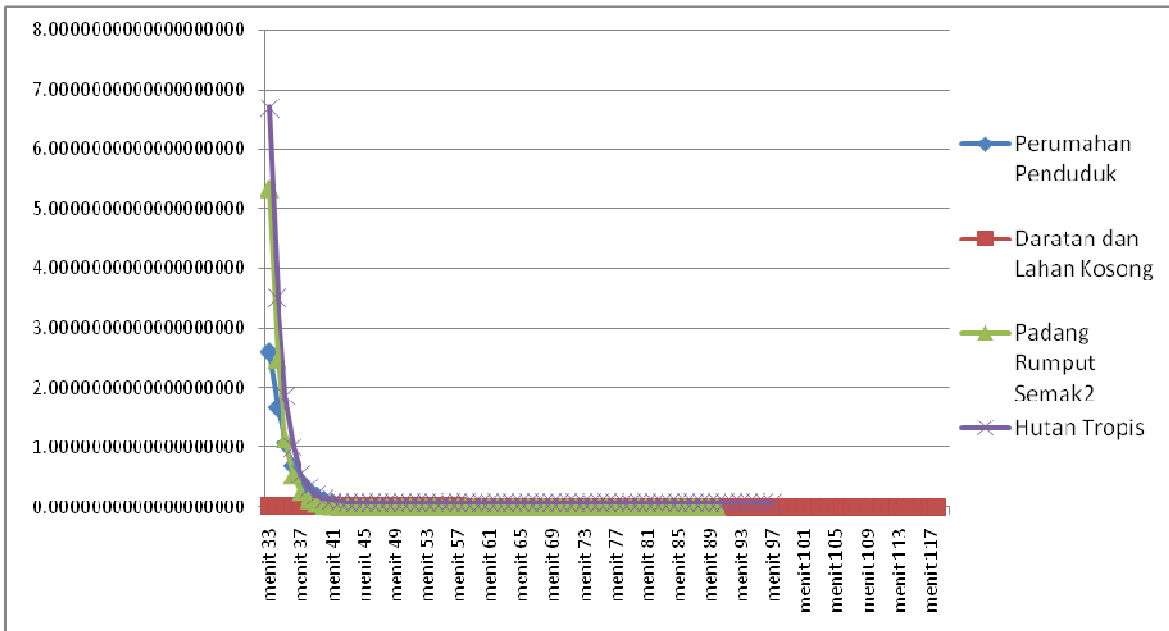
menit	Perumahan Penduduk	Daratan dan Lahan Kosong	Padang Rumput Semak2	Hutan Tropis
33	2.6038522206097500000	0.0294	5.35287698425171000000	6.70446164693110000000
34	1.6725475985024600000	0.0289	2.46943672888316000000	3.51914514981670000000
35	1.0769155401123500000	0.0284	1.14067466277801000000	1.86546121811832000000
36	0.6959687042862020000	0.0279	0.52834755628335800000	1.00693725403665000000
37	0.4523275340674750000	0.0274	0.24617176656718200000	0.56122729533522500000
38	0.2965025888443030000	0.0269	0.11613803874846700000	0.32983321014142500000
39	0.1968420366806180000	0.0264	0.05621521408856540000	0.20970301870780100000
40	0.1331023983104860000	0.0259	0.02860126365081970000	0.14733641637312000000
41	0.0923366047106041000	0.0254	0.01587605813679230000	0.11495826862895900000
42	0.0662641328497188000	0.0250	0.01001196217054160000	0.09814888007646200000
43	0.0495890302966165000	0.0245	0.00730963870209218000	0.08942214420072680000

44	0.0389241786231687000	0.0241	0.00606433982394276000	0.08489158564965280000
45	0.0321032873660124000	0.0236	0.00549047466160155000	0.08253950795680270000
46	0.0277408678062745000	0.0232	0.00522602310677618000	0.08131840697977400000
47	0.0249508065521507000	0.0228	0.00510415715386793000	0.08068446210599990000
48	0.0231663743820752000	0.0224	0.00504799824609353000	0.08035534427664370000
49	0.0220251097718829000	0.0220	0.00502211880358191000	0.08018447997900330000
50	0.0212951941537272000	0.0216	0.00501019290311028000	0.08009577433742430000
51	0.0208283639332249000	0.0212	0.00500469714708713000	0.08004972205525290000
52	0.0205297945515684000	0.0208	0.00500216456396371000	0.08002581362445370000
53	0.0203388393139943000	0.0204	0.00500099748572188000	0.08001340136090610000
54	0.0202167105727460000	0.0201	0.00500045966660355000	0.08000695742957200000
55	0.0201386010135196000	0.0197	0.00500021182597583000	0.08000361200825710000
56	0.0200886446872677000	0.0194	0.00500009761475750000	0.08000187520455860000
57	0.0200566942505054000	0.0190	0.00500004498334467000	0.08000097352826630000
58	0.0200362597933327000	0.0187	0.00500002072946089000	0.08000050541541240000
59	0.0200231905810697000	0.0184	0.00500000955265892000	0.08000026239067510000
60	0.0200148319392064000	0.0181	0.00500000440210640000	0.08000013622233260000
61	0.0200094860245184000	0.0177	0.00500000202860176000	0.08000007072097310000
62	0.0200060669518606000	0.0174	0.00500000093483090000	0.08000003671538980000
63	0.0200038802245141000	0.0171	0.00500000043079368000	0.08000001906110430000
64	0.0200024816650315000	0.0168	0.00500000019852060000	0.08000000989573310000
65	0.0200015871920055000	0.0165	0.00500000009148330000	0.08000000513745330000
66	0.0200010151162346000	0.0163	0.00500000004215781000	0.08000000266715220000
67	0.0200006492352319000	0.0160	0.00500000001942738000	0.08000000138467450000
68	0.0200004152296771000	0.0157	0.00500000000895263000	0.08000000071886550000
69	0.0200002655673572000	0.0154	0.00500000000412559000	0.08000000037320510000
70	0.0200001698482192000	0.0152	0.00500000000190118000	0.08000000019375250000
71	0.0200001086293808000	0.0149	0.00500000000087611000	0.08000000010058820000
72	0.0200000694758086000	0.0146	0.00500000000040373000	0.08000000005222120000
73	0.0200000444344609000	0.0144	0.00500000000018605000	0.08000000002711110000
74	0.0200000284188318000	0.0142	0.00500000000008573000	0.08000000001407490000
75	0.0200000181757578000	0.0139	0.00500000000003951000	0.08000000000730710000
76	0.0200000116246218000	0.0137	0.00500000000001820000	0.08000000000379350000
77	0.0200000074347289000	0.0135	0.00500000000000839000	0.08000000000196940000
78	0.0200000047550101000	0.0132	0.00500000000000386000	0.08000000000102240000
79	0.0200000030411493000	0.0130	0.00500000000000178000	0.08000000000053080000
80	0.0200000019450199000	0.0128	0.00500000000000082000	0.08000000000027550000
81	0.0200000012439713000	0.0126	0.00500000000000037000	0.08000000000014300000
82	0.0200000007956034000	0.0124	0.00500000000000017000	0.08000000000007420000
83	0.0200000005088420000	0.0122	0.00500000000000008000	0.08000000000003850000
84	0.0200000003254387000	0.0120	0.00500000000000003000	0.08000000000002000000
85	0.0200000002081400000	0.0118	0.00500000000000001000	0.08000000000001040000
86	0.0200000001331195000	0.0116	0.00500000000000000000	0.08000000000000540000
87	0.0200000000851389000	0.0114	0.00500000000000000000	0.08000000000000280000

88	0.0200000000544520000	0.0112	0.0050000000000000000	0.08000000000000140000
89	0.0200000000348257000	0.0110	0.0050000000000000000	0.08000000000000070000
90	0.0200000000222734000	0.0108	0.0050000000000000000	0.08000000000000030000
91	0.0200000000142453000	0.0107		0.08000000000000020000
92	0.0200000000091108000	0.0105		0.08000000000000010000
93	0.0200000000058270000	0.0103		0.08000000000000000000
94	0.0200000000037267000	0.0102		0.08000000000000000000
95	0.0200000000023835000	0.0100		0.08000000000000000000
96	0.0200000000015244000	0.0099		0.08000000000000000000
97	0.0200000000009749000	0.0097		0.08000000000000000000
98	0.0200000000006235000	0.0095		
99	0.0200000000003988000	0.0094		
100	0.0200000000002550000	0.0093		
101	0.0200000000001631000	0.0091		
102	0.0200000000001043000	0.0090		
103	0.0200000000000667000	0.0088		
104	0.0200000000000426000	0.0087		
105	0.0200000000000272000	0.0086		
106	0.0200000000000174000	0.0084		
107	0.0200000000000111000	0.0083		
108	0.0200000000000071000	0.0082		
109	0.0200000000000045000	0.0081		
110	0.0200000000000029000	0.0079		
111	0.0200000000000018000	0.0078		
112	0.0200000000000011000	0.0077		
113	0.0200000000000007000	0.0076		
114	0.0200000000000004000	0.0075		
115	0.0200000000000003000	0.0074		
116	0.0200000000000002000	0.0073		
117	0.0200000000000001000	0.0072		
118	0.0200000000000000000	0.0071		
Total	8.908752457003072	1.321716025821	10.208633890693797	18.97680746996899

Pada hasil tabel diatas, dapat dilihat bahwa penghitungan dimulai dari menit ke 33 waktu peluberan dan diakhiri dengan waktu masing-masing wilayah yang dibutuhkan untuk mencapai serapan konstan.

- Diagram hasil penghitungan serapan di wilayah yang berbeda :



Dari diagram dan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa :

1. Wilayah yang mempunyai serapan tertinggi adalah wilayah *Hutan Tropis*, yang selanjutnya disebut sebagai daerah vegetasi. Sedangkan wilayah dengan serapan terendah ada di wilayah *Daratan dan Lahan Kosong*, yang selanjutnya disebut sebagai daerah non vegetasi.
2. Nilai serapan berbanding terbalik dengan waktu. Semakin waktu bertambah, maka semakin kecil daya serap yang dihasilkan masing-masing wilayah. Hingga mencapai batas waktu yang ditentukan oleh user atau serapan konstan masing-masing wilayah.
3. Tiap wilayah membutuhkan jumlah menit yang berbeda untuk mencapai kondisi konstan pada nilai daya serapnya.

- Hasil Penghitungan secara keseluruhan :

Keterangan

Hasil Perhitungan

Variabel Input

Curah Hujan :	100.0	mm
Durasi Hujan :	2	jam
Daerah Horizontal (Panjang) :	17300	meter
Daerah Vertikal (Lebar) :	12200	meter
Luas Wilayah Hujan :	864501.76	meter ²
Total Volume Hujan :	1.72900352E7	dam ³

Output

Luas Genangan :	10487.0	meter ²
-----------------	---------	--------------------

Kecamatan di Bojonegoro yang terkena Banjir :

- Kanor
- Baureno
- Balen
- Kapas
- Sumber Rejo
- Kalitidu

4. Kesimpulan

- Variabel yang mempengaruhi banyaknya persebaran air pada prediksi ini, adalah curah hujan, durasi, luas wilayah hujan, dan kecepatan aliran sungai.
- Variabel selanjutnya yang mempengaruhi persebaran adalah serapan tanah terhadap air. Semakin daerah itu mempunyai tanah yang dapat menyerap air dengan baik, maka semakin sedikit sebaran air yang akan terjadi.
- Faktor Bernoulli masing-masing area, digunakan sebagai faktor untuk menentukan arah persebaran air.
- Di wilayah hujan bisa terjadi banjir. Karena, kondisi sungai yang tidak mempunyai ketinggian secara ekstrim dari hilir ke hulu sungai.
- Tiap pixel mempunyai daya tampung yang berbeda-beda. Hal itu disebabkan oleh selisih ketinggian pixel tersebut dengan ketinggian pixel 8 tetangganya, serta nilai daya serap awal dan daya serap konstan masing-masing pixel yang berbeda-beda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Purnama, Ig Setyawan. 2004. *Infiltrasi Tanah di Kecamatan Nguter Kabupaten Sukoharjo*. Jawa Tengah.
- [2] *Penerapan Prinsip dan Persamaan Bernoulli*, <http://www.gurumuda.com/>
- [3] Jay A. Parsons dan Mark A. Fonstad. 2007 *A cellular automata model of surface water flow*. San Marcos.
- [4] *Simulasi Cellular Automata*. <http://commonemitter.wordpress.com>
- [5] Himawan, Arif Rachman. 2009. *Klasifikasi Area Pada Citra Satelit Dan Penerapannya Pada Pedeteksian Banjir Di Situs Bengawan Solo*. Surabaya : PENS-ITS.
- [6] Sanusi, Muhammad Nunu. 2009. *Prediksi Penyebaran Banjir Disitus Bengawan Solo Berdasarkan Curah Hujan Dan Elevasi Permukaan Tanah*. Surabaya : PENS-ITS.