

**SIMULASI ALIRAN PERMUKAAN DENGAN PARAMETER
KECEPATAN ALIR MENGGUNAKAN PERSAMAAN
BERNOULLI**

***SIMULATION OF SURFACE FLOW WITH FLOW RATE PARAMETERS
USING BERNOULLI EQUATION***

MASNA WATI



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2012

**SIMULASI ALIRAN PERMUKAAN DENGAN PARAMETER
KECEPATAN ALIR MENGGUNAKAN PERSAMAAN BERNOULLI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

MASNA WATI

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2012**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Masna Wati
Nomor Mahasiswa : P2700210027
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Agustus 2012

Yang menyatakan,

Masna Wati

PRAKATA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas karunia yang dilimpahkan kepada penulis sehingga penyusunan tesis yang berjudul “*Simulasi Aliran Permukaan dengan Parameter Kecepatan Alir Menggunakan Persamaan Bernoulli*” ini dapat terselesaikan.

Penyusunan tesis ini terselesaikan berkat bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin sampaikan penghargaan dan rasa terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc dan Dr. Armin Lawi, S.Si, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan tenaga dalam membimbing sehingga penulisan ini dapat terselesaikan
2. Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, MT, Prof. Dr. Ir. H. Nadjamuddin Harun, MS, dan Dr. Loeky Haryanto, MS, M.Sc, MAT selaku penguji yang telah memberikan masukan dalam perbaikan penulisan ini.
3. Segenap dosen dan staf Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah banyak membantu hingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.
4. Ketua Program Pascasarjana, Ketua Program Studi S2 Teknik Elektro dan para dosen Teknik Elektro Unhas yang telah banyak memberikan ilmu dan keterampilan yang tak ternilai harganya.
5. Teman-teman Magister Teknik Elektro khususnya konsentrasi Teknik Informatika dan teman-teman seperjuangan di Program Pascasarjana Unhas serta semua pihak yang telah memberikan bantuan dan

dukungannya dalam penulisan tesis ini. Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan kalian.

Rasa kasih sayang, terima kasih, dan penghargaan yang setinggi-tingginya penulis hanturkan kepada kedua orang tua saya yang senantiasa mengiringi penulis dengan doa, perhatian dan dukungan moril maupun materil sehingga tesis ini dapat terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, dengan segenap ketulusan hati, penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak. Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Makassar, Agustus 2012

Penulis

ABSTRAK

Masna Wati, Simulasi Aliran Permukaan Dengan Parameter Kecepatan Alir Menggunakan Persamaan Bernoulli (dibimbing oleh **Zahir Zainuddin** dan **Armin Lawi**)

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan algoritma yang dapat memodelkan aliran dan distribusi air permukaan dengan menerapkan teori *cellular automata* menggunakan algoritma *Flow Direction (MD8)* dan persamaan Bernoulli di atas permukaan tiga dimensi dan menentukan daerah-daerah yang dianggap rawan banjir berdasarkan *Digital Elevation Model (DEM)*.

Penelitian ini bersifat studi kasus yang diawali dengan perumusan masalah, studi kepustakaan dan penelitian eksperimental dengan mengembangkan teori *cellular automata* menggunakan algoritma *Flow Direction (MD8)* dan persamaan Bernoulli. *Cellular automata* digunakan untuk menentukan pola sebaran aliran permukaan dengan menggunakan algoritma MD8 dalam menentukan arah aliran air. Persamaan Bernoulli digunakan untuk menentukan kecepatan aliran air yang didistribusikan dari sel pusat ke sel tetangga yang memiliki ketinggian lebih rendah.

Hasil penelitian ini diperoleh informasi daerah-daerah yang dilalui air dengan kecepatan dan volume air tertentu serta daerah-daerah rawan banjir dengan estimasi volume air yang dapat tergenang pada daerah tersebut.

Keywords: Cellular automata, Persamaan Bernoulli, DEM, MD8;

ABSTRACT

Masna Wati. Simulation of Surface Flow by Flow Rate Parameters Using Bernoulli Equation (supervised by Zahir Zainuddin dan Armin Lawi)

The research aimed at developing which could model the surface water flow and distribution by applying the theory of cellular automata using the algorithm of Flow Direction (MD8) algorithm and Bernoulli equation on three-dimensional surface and determining the areas which were regarded as easily flooded areas based on Digital Elevation Models (DEM).

This was a case study research started from the problem statement, literature study research and then experimental research by developing the theory of cellular automata using the algorithm of Flow Direction (MD8) and Bernoulli equation. The Cellular automata was used to determine the surface flow distribution pattern by using MD8 algorithm in determining the water flow direction. Bernoulli equation was used to determine the water flow rate which was distributed from the central cell to the neighbouring cells which had the lower altitude.

The research results indicates that the informations is obtained on the areas which are passed by the certain water speed and volume, and the easily which flooded areas with the volume estimation which can be stagnant in the areas.

Keywords: Cellular automata, Bernoulli's Equation, DEM, MD8;

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR SIMBOL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian	4
E. Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Aliran Fluida	5
B. Sistem Informasi Geografis	9

C. Teori Cellular automata	15
D. Algoritma Flow Direction.....	23
E. Persamaan dan Konsep Bernoulli	26
F. Penerapan Persamaan Bernoulli pada Cellular Automata	29
G. Roadmap Penelitian	31
H. Kerangka Pemikiran	35

BAB III METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian	36
B. Jenis Penelitian	36
C. Perangkat Penelitian	36
D. Prosedur Penelitian	37
E. Rancangan Sistem	39
F. Metode Validasi.....	40

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Sistem	41
B. Model Elevasi Digital dengan Sistem Informasi Geografis	45
C. Pengembangan Algoritma <i>Cellular Automata</i> Menggunakan Persamaan Bernoulli.....	48
D. Pembahasan	54
E. Pengujian Perangkat Lunak	71

BAB V PENUTUP

A. Kesimpulan	92
B. Saran.....	93
Daftar Pustaka	94
Lampiran-Lampiran	96

DAFTAR GAMBAR

Nama Gambar	hal
Gambar 1 Model Elevasi Digital bentuk Raster/Grid.....	14
Gambar 2 Model Elevasi Digital bentuk TIN	14
Gambar 3 (a), (b), (c) contoh sel yang saling bertetangga.....	16
Gambar 4 Susunan sel-sel Cellular automata	16
Gambar 5 <i>Von Neumann neighbourhood</i>	18
Gambar 6 <i>Moore neighbourhood</i>	18
Gambar 7 <i>Margolus Neighbourhood</i>	19
Gambar 8 Bentuk sistem yang disusun oleh sel sel.....	20
Gambar 9 Cellular automata dengan himpunan <i>state</i>	20
Gambar 10 Ilustrasi <i>neighbourhood</i>	21
Gambar 11 Arah Aliran Algoritma D8.....	24
Gambar 12 Skema Aplikasi Algoritma <i>Flow Direction</i>	25
Gambar 13 Algoritma <i>Flow Direction</i> dengankaidah D8	25
Gambar 14 Algoritma <i>Flow Direction</i> dengankaidah MD8	26
Gambar 15 Bejana dengan ketinggian yang berbeda.....	27
Gambar 16 Penampang aliran fluida	28
Gambar 17 Konsep Pengembangan Sistem Deteksi Dini Bencana Banjir.....	32
Gambar 18 Kerangka Pemikiran.....	35
Gambar 19 Prosedur Penelitian.....	37

Gambar 20 Use Case Diagram sistem simulasi aliran dan distribusi air permukaan.....	41
Gambar 21 <i>Flowchart</i> pengembangan algoritma MD8	44
Gambar 22 Tahap-tahap pengolahan peta	46
Gambar 23 Data ketinggian	47
Gambar 24 Algoritma MD8	48
Gambar 25 Ilustrasi kedalaman sel.....	50
Gambar 26 Ilustrasi kondisi sel tetangga lebih rendah daripada sel pusat.....	56
Gambar 27 Ilustrasi kondisi semua sel tetangga lebih tinggi daripada sel pusat.....	57
Gambar 28 Ilustrasi kondisi ada sel tetangga memiliki ketinggian yang sama dengan sel pusat.....	58
Gambar 29 Desain Menu utama.....	68
Gambar 30 Desain Form Proses	69
Gambar 31 Preview Image	70
Gambar 32 Result MD8	70
Gambar 33 Hasil pengujian pertama	77
Gambar 34 Proses percobaan pertama.....	77
Gambar 35 (a) Tabel hasil secara manual dan (b) Gambar hasil program	78
Gambar 36 Hasil pengujian kedua.....	84
Gambar 37 Proses percobaan kedua	87

Gambar 38 (a) Tabel hasil secara manual dan (b) Gambar hasil program	87
Gambar 39 Hasil pengujian ketiga	86
Gambar 40 Proses percobaan ketiga	87
Gambar 41 Peta Sinjai.....	88
Gambar 42 Perbesaran kota sinjai sungai kalamesu.....	88
Gambar 43 Hasil Plot Peta Sinjai pada Google Earth.....	89
Gambar 44 Hasil Plot Peta Sungai Appareng pada Google Earth	89
Gambar 45 Hasil program.....	90

DAFTAR SIMBOL

N	: himpunan sel tetangga
r	: jari-jari dari sel pusat
k	: bilangan asli (1,2,3,...)
L	: Geometri (bentuk sel serta bentuk sistem yang disusun oleh sel-sel- tersebut)
Q	: himpunan berhingga <i>state</i>
C_0	: Konfigurasi awal sistem
P_1 dan P_2	: Tekanan udara atmosfer di bejana 1 dan bejana 2 dengan satuan N/m^2
v_1 dan v_2	: kecepatan aliran air di bejana 1 dan 2 dalam mengalirkan air ke tempat yang lebih rendah dengan satuan m/s
h_1 dan h_2	: kedalaman di bejana 1 dan 2 dengan satuan m
ρ	: massa jenis air dengan satuan kg/m^3
g	: percepatan gravitasi dengan satuan m/s^2
\dot{m}	: Laju aliran massa dari sebuah sisi keluar dengan satuan kg/s
A	: Luas penampang fluida
Q	: Laju aliran volume (volume per satuan waktu) dengan satuan m^3/s
$P_{(x,y)}$: sel pusat
$h_{(x,y)}$: kedalaman sel (x,y) dengan satuan m
$H_{(x,y)}$: elevasi sel (x,y) dengan satuan m
$S_{(x,y)}$: Serapan tanah pada sel (x,y) disimbolkan sebagai dengan satuan m^3
$v_{in(x,y)}$: Kecepatan aliran air yang masuk pada sel (x,y) dengan satuan m/s
v_{out}	: Kecepatan aliran air yang keluar dari sel tinjauan (x,y) ke sel tetangga dengan satuan m/s
$V_{awal(x,y)}$: volume awal air yang masuk ke sel pusat (x,y) dengan satuan m^3 , yang merupakan nilai dari curah hujan (m) dikali luas sel (m^2) dengan durasi hujan selama t detik
$V_{in(x,y)}$: volume air yang masuk ke sel (x,y) dengan satuan m^3
$V_{alir(x,y)}$: volume air yang dialirkan dari sel tinjauan (x,y) menuju sel tetangga dengan satuan m^3

- V_{out} : volume air yang keluar dari sel tinjauan menuju sel tetangganya yang lebih rendah, dengan satuan m^3
- $V_{sel(x,y)}$: sisa air yang dapat dialirkan ke sel tetangga yang ketinggiannya lebih rendah, jika semua sel tetangga $\geq H_{(x,y)}$
- $V_{maks(x,y)}$: Volume air maksimum yang dapat ditampung oleh sel (x,y) , dengan satuan m^3

DAFTAR LAMPIRAN

Nama Lampiran

Lampiran 1. Simulasi Aliran dan distribusi air permukaan dengan satu titik hujan

Lampiran 2. Simulasi Aliran dan distribusi air permukaan dengan beberapa titik hujan

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Banjir adalah bencana yang hampir setiap tahun melanda Indonesia. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai macam faktor. Curah hujan yang tinggi yang dapat menyebabkan air sungai meluber, terhambatnya saluran-saluran air, media penyerapan air yang sangat sedikit, pengrusakan lingkungan, dan akibat dari adanya pemanasan global yang membuat perubahan iklim yang cukup ekstrim. Banjir akan mengakibatkan berbagai macam kerugian materiil atau kerugian moril.

Selain faktor iklim ekstrim (hujan ekstrim) yang dapat mengakibatkan banjir pada beberapa tempat, terdapat pula beberapa faktor lain seperti faktor penurunan daya dukung daerah aliran sungai (DAS) termasuk di dalamnya faktor pola pembangunan sungai, faktor kesalahan perencanaan dan implementasi pengembangan kawasan, faktor kesalahan konsep drainase dan faktor *sosio-hidrolik* (kesalahan perilaku masyarakat terhadap komponen hidrologi-hidrolik), (Zainuddin, 2010).

Antisipasi dini dapat dilakukan dengan adanya pengetahuan atau informasi mengenai daerah-daerah rawan banjir. Untuk itu diperlukan ketersediaan data dan informasi spasial (keruangan dan kewilayahan) yang detil, komprehensif dan *up-to date*, baik dalam bentuk peta kertas

maupun sistem informasi geografis (SIG atau GIS), yang dapat memberikan gambaran secara jelas mengenai pola aliran, sirkulasi dan limpahan air hujan sehingga dapat dipelajari dan disimulasikan secara baik. Oleh karena itu perlu adanya pemikiran kembali tentang pencegahan bencana banjir.

Untuk itu menangani masalah tersebut, diperlukan suatu sistem permodelan penyebaran air untuk mengetahui perkiraan pergerakan aliran permukaan. Tentu saja sistem ini harus disertai dengan penyaluran informasi yang akurat, tindakan penanganan dini banjir yang tepat, dan manajemen evakuasi yang bagus bila banjir sudah tidak dapat dicegah. Jika hal ini terpenuhi, maka resiko terjadi banjir dapat dikurangi. Ketika banjir masih terjadi, pergerakan air dapat diketahui dan dapat dilakukan upaya pencegahan-pencegahan ataupun evakuasi.

Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yaitu penelitian yang dilakukan oleh Irmawati pada tahun 2010, dimana pada penelitian tersebut hanya membahas pola aliran air permukaan menggunakan algoritma D8 dengan tidak memperhitungkan serapan tanah dan volume air. Kemudian Nurhasanah Rasyid mengembangkan penelitian tersebut pada tahun 2011. Pembahasan pada penelitian ini yaitu aliran dan distribusi air permukaan menggunakan model elevasi digital dan menerapkan konsep *Cellular Automata* dengan memperhitungkan volume serta mengasumsikan serapan tanah terhadap air adalah homogen.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, maka penulis akan melanjutkan untuk membahas mengenai masalah ini, dimana penulis akan menambahkan parameter yang mempengaruhi penyebaran air yaitu memperhitungkan kecepatan aliran air dengan memanfaatkan persamaan Bernoulli.

B. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana membuat sistem yang dapat memodelkan aliran permukaan menggunakan konsep *Cellular Automata* dengan memperhitungkan kecepatan aliran air menggunakan persamaan Bernoulli, dimana parameter yang digunakan yaitu ketinggian daerah tinjauan, volume air dan kecepatan aliran air serta serapan tanah (*soil absorption*) yang diasumsikan homogen. Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian-penelitian sebelumnya.

C. Tujuan Penelitian

Dengan memperhatikan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan serta berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya maka tujuan penelitian ini adalah mengembangkan konsep *Cellular Automata* yang dapat memodelkan aliran permukaan dengan menerapkan persamaan Bernoulli untuk menghitung kecepatan aliran air dan algoritma MD8 dalam menentukan arah aliran air.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk:

1. Membantu instansi yang berwenang dalam mengantisipasi bahaya banjir dan memprediksi banjir selanjutnya, sehingga mengurangi dampak negatif yang dapat ditimbulkan dari bahaya banjir.
2. Menginventarisasi lokasi-lokasi yang rawan terhadap bencana alam utamanya banjir untuk dijadikan pedoman pengeluaran izin pembangunan.
3. Peringatan dini dapat dikeluarkan berdasarkan model GIS ini.

E. Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini akan dibuat perangkat lunak sistem simulasi aliran dan distribusi air permukaan menggunakan algoritma *Cellular Automata* dan menerapkan persamaan Bernoulli dengan memperhitungkan volume air dan kecepatan aliran air. Serapan tanah (*soil absorption*) terhadap air diasumsikan homogen.

Dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana aliran dan pendistribusian air permukaan berdasarkan kecepatan aliran air tanpa memperhitungkan karakteristik aliran air sehingga diasumsikan air mengalir menurut lintasan yang teratur atau lurus di sepanjang lintasan yang terbentuk diasumsikan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Aliran Fluida

Fluida diartikan sebagai zat yang bergerak dan dapat berubah bentuk secara berkesinambungan apabila dibebani dengan tegangan geser betapapun kecilnya. Sedangkan zat padat mempertahankan bentuk dan ukuran yang tetap sampai dengan gaya yang mengenainya melebihi elastisitas benda padat tersebut. Secara sederhana fluida ditandai dengan adanya keseimbangan dan berubah bentuk atau mengalir bila diberi gaya geser. Sedangkan material padat akan terjadi deformasi atau kerusakan struktur apabila terdapat gaya geser yang melebihi ambang batas elastisitas (Mahmud Mustain, 2011).

Cairan disebut fluida sebab zat cair tersebut dapat mengalir. Adapun sifat-sifat dasar fluida yaitu kerapatan (*density*), berat jenis (*specific gravity*), tekanan (*pressure*), kekentalan (*viscosity*). Aliran air dalam suatu saluran dapat berupa aliran terbuka (*open channel flow*) dan saluran tertutup (*pipe flow*).

Pada aliran saluran terbuka terdapat permukaan air yang bebas (*free surface*), permukaan bebas ini dapat dipengaruhi oleh tekanan udara luar secara langsung. Sedangkan pada saluran tertutup tidak dapat permukaan yang bebas dan permukaan air secara langsung tidak dipengaruhi oleh tekanan udara luar, kecuali oleh tekanan hidraulik yang

ada dalam aliran saja (Tim Pengajar, 1997). Pada penelitian ini, aliran air yang akan diteliti merupakan aliran terbuka (*open channel flow*).

Jenis aliran pada saluran terbuka dapat digolongkan berdasarkan perubahan kedalaman aliran sesuai dengan perubahan ruang dan waktu, sebagai berikut:

a. Aliran Tunak (*Steady Flow*)

Suatu aliran dikatakan tunak, jika berbagai karakter seperti kecepatan, tekanan, kerapatan, temperatur dan lain sebagainya pada tiap titik alirannya tidak berubah dengan perubahan waktu. Aliran tunak adalah aliran yang mempunyai kedalaman tetap untuk selang waktu tertentu.

Aliran tunak diklasifikasikan menjadi:

1. Aliran seragam (*uniform flow*)

Aliran saluran terbuka dikatakan seragam apabila kedalaman air sama pada setiap penampang saluran.

2. Aliran berubah (*varied flow*)

Aliran saluran terbuka dikatakan berubah apabila kedalaman air berubah di sepanjang saluran.

1) Aliran berubah lambat laun

Aliran saluran terbuka dikatakan berubah lambat laun apabila kedalaman aliran berubah secara lambat laun.

2) Aliran berubah tiba-tiba

Aliran saluran terbuka dikatakan berubah tiba-tiba apabila kedalaman aliran berubah tiba-tiba apabila keselamatan berubah secara tiba-tiba

b. Aliran tidak tunak (*Unsteady flow*)

Aliran tidak tunak adalah aliran yang mempunyai kedalaman aliran yang berubah terhadap waktu. Jika salah satu atau seluruh karakter fluida dalam gerakannya berubah dengan perubahan waktu pada tiap titik dalam fluida atau secara matematika dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{dV}{dt} \neq 0, \text{ dan karakteristik lainnya.}$$

Banjir merupakan salah satu contoh aliran tidak tunak. Aliran tidak tunak diklasifikasikan:

1. Aliran seragam tidak tunak (*unsteady uniform flow*)

Aliran saluran terbuka dimana alirannya mempunyai permukaan yang berfluktuasi sepanjang waktu dan tetap sejajar dengan dasar saluran. Aliran ini jarang dijumpai dalam praktek.

2. Aliran berubah tidak tunak (*unsteady varied flow*)

Aliran saluran terbuka dimana kedalaman aliran berubah sepanjang waktu dan ruang.

a) Aliran tidak tunak berubah lambat laun

Aliran saluran terbuka dimana kedalaman aliran berubah sepanjang waktu dan ruang dengan perubahan kedalaman secara lambat laun.

b) Aliran tidak tunak berubah tiba-tiba

Aliran saluran terbuka dimana aliran berubah sepanjang waktu dan ruang dengan perubahan kedalaman secara tiba-tiba.

Kekentalan dan gravitasi mempengaruhi sifat atau perilaku aliran pada saluran terbuka.

a. Aliran laminar

Aliran saluran terbuka dikatakan laminar apabila gaya kekentalan (*viscosity*) relatif sangat besar dibandingkan dengan gaya inersia sehingga kekentalan berpengaruh besar terhadap perilaku aliran. Butir-butir air bergerak menurut lintasan tertentu yang teratur atau lurus, dan selapis cairan tipis seolah-olah menggelincir diatas lapisan lain. Pada aliran laminar partikel fluida bergerak sepanjang alirannya berupa garis lurus yang sejajar dalam lapisan-lapisan fluida, sebab itu garis-garis laluannya tidak akan bersilangan satu dengan lainnya dan ini terjadi pada kecepatan alir yang rendah dan menyebabkan gaya yang timbul akibat kekentalan (*viscosity*) fluida ini menjadi sangat menonjol.

b. Aliran turbulen

Aliran saluran terbuka dikatakan turbulen apabila gaya kekentalan relatif lemah dibandingkan dengan gaya inersia. Butir-butir air bergerak menurut lintasan yang tidak teratur dan tidak tetap, walaupun butir-butir tersebut tetap bergerak maju didalam aliran secara keseluruhan. Partikel fluida bergejolak sedemikian sehingga kecepatannya berfluktuasi tak

menentu dengan aliran yang bergulung-gulung yang mengembang dengan cepat.

B. Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Georafis atau *Georaphic Information Sistem (GIS)* merupakan suatu sistem informasi yang berbasis komputer, dirancang untuk bekerja dengan menggunakan data yang memiliki informasi spasial (bereferensi keruangan). Sistem ini meng*capture*, mengecek, mengintegrasikan, memanipulasi, menganalisa, dan menampilkan data yang secara spasial mereferensikan kepada kondisi bumi. Kemampuan inilah yang membedakan SIG dengan Sistem Informasi lainnya yang membuatnya menjadi berguna di berbagai kalangan untuk menjelaskan kejadian, merencanakan strategi, dan memprediksi apa yang terjadi.

Garis ketinggian pada peta untuk mengetahui berapa tingginya suatu tempat dari permukaan laut, mempunyai karakteristik sebagai berikut:

- a. Garis ketinggian yang lebih rendah selalu mengelilingi garis ketinggian yang lebih tinggi.
- b. Garis ketinggian tidak akan saling berpotongan dan tidak akan bercabang.
- c. Pada daerah yang landai garis ketinggian akan berjauhan, sebaliknya pada daerah yang terjal akan saling merapat.

- d. Garis ketinggian yang menjorok keluar, merupakan punggung bukit dan selalu berbentuk huruf 'U'.
- e. Garis ketinggian yang menjorok ke dalam, merupakan lembah dan selalu berbentuk huruf 'V'.
- f. Selisih tinggi antara dua garis ketinggian yang berurutan (interval) adalah setengah dari bilangan skala ribuan, (contoh: $1/200 \times 50.000 = 25$ meter). Kecuali bila dinyatakan dengan ketentuan lain.
- g. Garis ketinggian pembantu, menyatakan ketinggian antara dua garis ketinggian yang berurutan.
- h. Warna garis-garis ketinggian pada peta digambarkan dengan warna coklat (Nurhasanah Rasyid, 2011).

a. Model Data Spasial

Pada dasarnya, secara konseptual, terdapat dua model data spasial, yaitu raster dan vektor, (Prahasta, 2009). Pada mulanya, setiap perangkat SIG memiliki data spasial dengan format tersendiri tetapi saat ini, perangkat SIG sudah dapat memberikan fungsionalitas *export* dan *import* ke dan dari format-format data spasial.

Model data raster bertugas untuk menampilkan, menempatkan dan menyimpan isi data spasial dengan struktur matriks ataupun susunan piksel-piksel yang membentuk suatu grid (segi-empat). Setiap piksel ini memiliki atribut tersendiri, seperti koordinat yang unik dan nilai elevasi. Sedangkan model data vektor dapat menampilkan, menempatkan, dan

menyimpan data spasial dengan menggunakan titik-titik dan garis-garis atau polygon.

Akurasi data spasial sangat tergantung pada resolusi spasial atau ukuran pikselnya pada permukaan bumi. Beberapa sumber data raster adalah citra digital satelit, citra digital radar, dan model ketinggian digital (DEM).

Pada model data raster, matriks dapat diurutkan menurut koordinat lokalnya, kolom (x) dan baris (y). Selain itu pada sistem koordinat piksel monitor komputer, titik asal sistem koordinat raster diletakkan di sudut kiri atas. Oleh karena itu nilai x akan meningkat ke arah bawah dan nilai y akan meningkat ke arah kanan. Sistem koordinat lokal ini dapat pula ditransformasikan sedemikian rupa sehingga titik asal koordinatnya terletak pada sudut kiri bawah, makin ke atas nilai x semakin besar dan nilai y akan semakin besar jika bergerak ke kanan. Pada model data vektor, system koordinat yang digunakan adalah koordinat kartesian dua dimensi (x, y).

b. *Digital Elevation Model (DEM)*

Digital Elevation Model atau disingkat (DEM) merupakan suatu model digital yang merepresentasikan permukaan topografi bumi atau elevasi suatu wilayah dengan basis piksel demi piksel dalam format raster, (Prahasta, 2008).

Digital Elevation Model (DEM) merupakan turunan dari tipe data vektor atau tipe data raster yang menggambarkan variabilitas spasial

permukaan, seperti elevasi permukaan tanah. Data DEM dapat dikembangkan dalam format raster atau vektor. DEM raster adalah struktur grid dimana setiap sel grid dapat memiliki nilai elevasi yang unik sedangkan DEM vektor biasanya merupakan Jaringan *Triangular Irregular* (TIN) yang terdiri dari himpunan titik koordinat x, y, z yang saling terhubung. DEM raster dan TIN merupakan jenis DEM yang berbeda (Chris J. Ryan, 2004).

DEM adalah susunan angka yang menggambarkan distribusi spasial data ketinggian (elevasi) suatu tempat pada suatu lanskap dengan interval jarak horisontal yang teratur.

Menurut Usman dkk (2008), prinsip pengolahan DEM adalah:

1. Fungsi *Fill Pits*

Merupakan suatu fungsi yang diterapkan untuk menghilangkan piksel-piksel berelevasi rendah yang menyebabkan cekungan-cekungan pada DEM. Metode yang dipakai untuk menghilangkan cekungan adalah mengidentifikasi semua piksel yang menyebabkan terjadinya cekungan kemudian menaikkan elevasinya sesuai elevasi terendah yang terdapat di sekeliling piksel tersebut.

2. Fungsi *Flow Direction*

Fungsi ini digunakan untuk menentukan arah aliran pada masing-masing piksel dalam DEM.

3. Fungsi *Contributing Area*

Digunakan untuk mengecek kontribusi aliran pada masing-masing piksel dalam pembentukan sub-aliran. Salah satu pikselnya akan dijadikan *outlet* terhadap piksel-piksel yang ada di sekelilingnya. Kemudian kontribusi aliran dihitung dari *outlet* piksel ke piksel hulunya yang memberikan kontribusi aliran pada piksel tersebut.

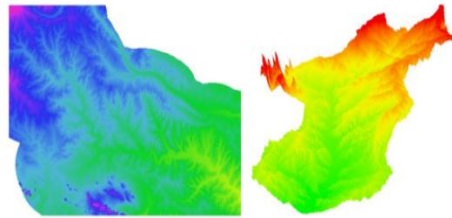
4. Fungsi *Grid Network Order and Flow Path Lengths*

Fungsi ini mendefinisikan *flow direction grid* menjadi sebuah jaringan secara luas pada masing-masing piksel menggunakan metode *strahler*. Pada metode *strahler*, sistem penomoran anak sungai dimulai dari angka satu di bagian hulu dan bertambah besar ke bagian muara. Metode ini diimplementasikan dengan aturan jika terdapat dua anak sungai (*flow path*) yang berada di bawahnya maka diberi nomor yang sama dengan nomor orde anak sungai yang paling besar. Jika anak sungai yang bertemu memiliki orde yang sama maka nomor orde sungai di bawahnya ditambah satu. Keluaran fungsi ini menggambarkan panjang aliran dari titik terjauh yang mengalirkan air ke masing-masing piksel *outlet* dan menggambarkan panjang aliran secara keseluruhan di hulu masing-masing piksel.

1. Raster/ Grid

Raster atau *grid square* merupakan struktur yang paling umum dan sering digunakan untuk merepresentasikan DEM. Struktur data ini menyajikan model permukaan dalam bentuk bujur sangkar atau segi

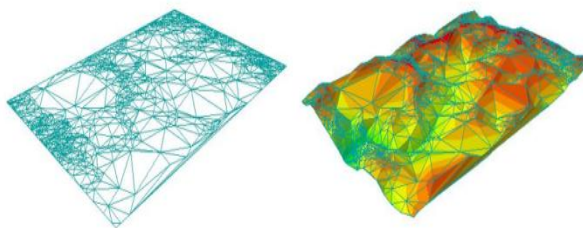
empat teratur. Grid disimpan sebagai citra raster, yang berisi matriks dari sel/piksel di mana tiap pikselnya mempunyai informasi elevasi.



Gambar 1. Model Elevasi Digital bentuk Raster/Grid

2. TIN

Struktur data ini menyajikan model permukaan dalam bentuk sekumpulan bidang-bidang kecil yang berbentuk segitiga yang saling terhubung. Model TIN disusun oleh himpunan segitiga yang bersebelahan dan tidak overlap, dimana segitiga disusun oleh himpunan titik-titik yang disebut *mass point*. *Mass point* tersebut semakin jelas terlihat pada lokasi yang terdapat perubahan permukaan medan cukup besar seperti di lembah paling dalam, puncak gunung atau bagian ujung atas dan bawah tebing.



Gambar 2. Model Elevasi Digital bentuk TIN

Meskipun model raster/grid tidak seefisien dalam penyimpanan data dan kurang mampu menyajikan variasi area pada beberapa level resolusi seperti TIN, tetapi raster/grid lebih menarik karena strukturnya

yang sederhana, lebih mudah dimanipulasi atau diproses, efisien dalam komputasi, terlihat lebih natural dalam menampilkan medan dan lebih mudah diintegrasikan dengan data SIG yang lain (Chris J. Ryan, 2004).

C. Teori *Cellular Automata*

1. Definisi *Cellular Automata*

Cellular Automata mengambil analogi dari penunjukan jalan untuk menampilkan semua populasi yang berinteraksi dalam sel-sel, yang setiap selnya adalah otomata. Dengan membangun aturan-aturan pendekatan ke dalam *Cellular Automata*, dapat disimulasi berbagai macam keadaan yang kompleks, seperti gerakan fluida yang dikenalkan oleh Navier Stokes.

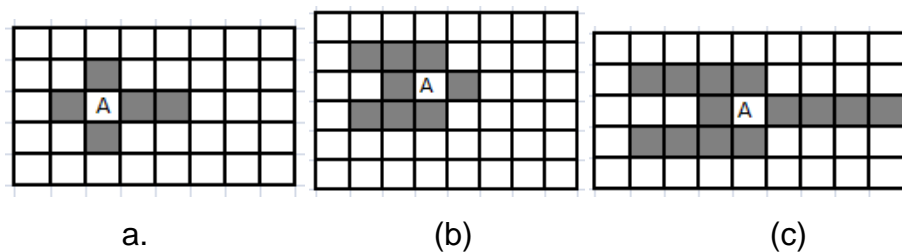
Cellular Automata adalah sekumpulan array yang identik dengan program otomata, atau dinamakan sel, dimana berinteraksi satu dengan lainnya. Model array biasanya disajikan dalam bentuk 1 dimensi, 2 dimensi grid atau 3 dimensi solid. Kebanyakan sel-sel diatur dalam grid persegipanjang yang sederhana, tetapi dalam aturan yang lain, seperti sarang lebah terkadang juga digunakan.

Fitur-fitur dasar yang ada dalam sebuah model *Cellular Automata* adalah:

- (1) *State*: *State* adalah *variable* yang diberikan untuk membedakan setiap sel. *State* ini dapat berupa bilangan atau *property*. Secara sederhana setiap sel dinyatakan sebagai bagian dari suatu *landscape*, kemudian

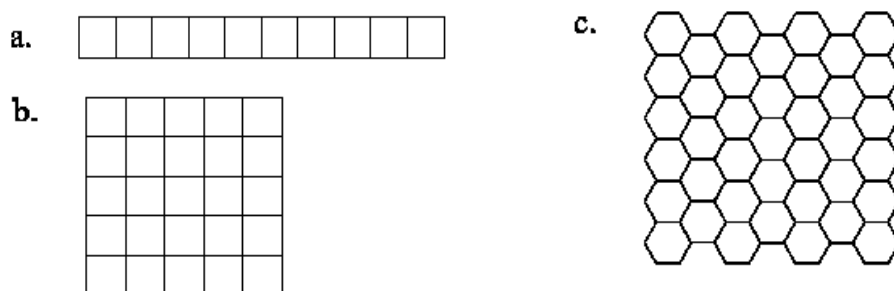
state dikatakan sebagai jumlah dari individu pada setiap lokasi atau jenis dari kawasan yang bergerak tumbuh.

- (2) *Neighbourhood* (tetangga): Tetangga adalah sekumpulan sel yang berinteraksi secara langsung dengan sel dalam sebuah grid yang secara fisik akan melingkupi sebuah sel. Sebagai contoh tetangga:



Gambar 3. (a), (b), (c) contoh suatu sel yang saling bertetangga, sel A merupakan pusat sel dan abu abu adalah tetangga dari sel A

- (3) Program: program adalah sekumpulan aturan yang didefinisikan untuk mengubah *state* sebagai respon dari *state* saat ini dan para tetangganya. Ilustrasi susunan sel-sel *Cellular Automata*:



Gambar 4. Susunan sel-sel *Cellular Automata* (a) segi empat 1 dimensi, (b) segi empat 2 dimensi, (c) segi enam 2 dimensi

Adapun unsur unsur yang membentuk *Cellular Automata* adalah:

1) Geometri

Geometri adalah bentuk sel serta bentuk sistem yang disusun oleh sel-sel tersebut. Geometri *Cellular Automata* terdiri atas dimensi *Cellular Automata* tersebut (1-dimensi, 2-dimensi, dst), dan bentuk geometri dari masing-masing sel penyusunnya.

2) *State Set*

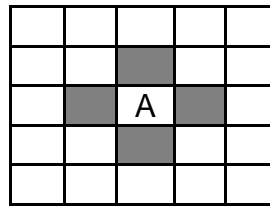
State set adalah himpunan keadaan atau status yang dapat dimiliki oleh masing masing sel *Cellular Automata* tersebut. Status ini dapat berupa angka maupun sifat tertentu.

3) *Neighbourhood*

Neighbourhood atau tetangga adalah sel-sel yang dapat mempengaruhi status suatu sel pada *Cellular Automata*. Umumnya *neighbourhood* suatu sel hanya meliputi sel-sel yang berada di sekitarnya. Berdasarkan strukturnya, ada banyak macam *neighbourhood* yang telah dikenal. Secara umum, antara lain untuk geometri dua dimensi (Schatten, 2008 dan Budianita, 2010).

a) *Von Neumann neighbourhood*

Empat sel yaitu sel di atas dan bawah, kanan dan kiri dari setiap sel pusat disebut *Von Neumann neighbourhood*, yang memiliki jari jari sebesar 1 dari sel pusat. $N = \{U \text{ (Utara), } T \text{ (Timur), } S \text{ (Selatan), } B \text{ (Barat)}\}$, $r = 1$, dimana N adalah himpunan sel tetangga dan r adalah jari-jari dari sel pusat.



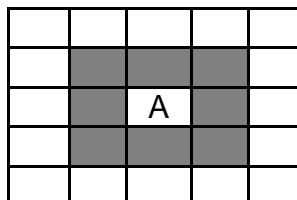
Gambar 5. *Von Neumann neighbourhood*

Sel yang terletak ditengah adalah sel A (pusat sel). Sel berwarna abu-abu adalah *neighbours* dari sel A.

b) *Moore neighbourhood*

Moore Neighbourhood adalah pembesaran dari *Von Neumann neighbourhood* yang dimana juga mengandung sel sel diagonal.

$N = \{U \text{ (Utara)}, TL \text{ (Timur Laut)}, T \text{ (Timur)}, TG \text{ (Tenggara)}, S \text{ (Selatan)}, BD \text{ (Barat Daya)}, B \text{ (Barat)}, BL \text{ (Barat Laut)}\}$, $r = 1$, dimana N adalah himpunan sel tetangga dan r adalah jari-jari dari sel pusat.



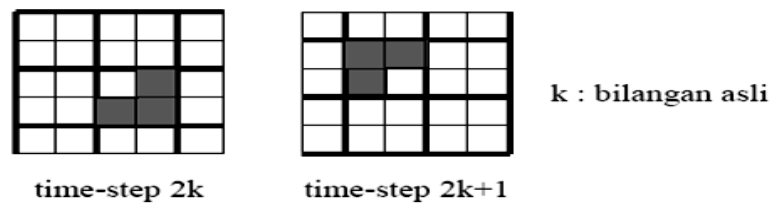
Gambar 6. *Moore neighbourhood*

Sel yang terletak ditengah adalah sel A (pusat sel). Sel berwarna abu-abu adalah *neighbours* dari sel A.

c) *Margolus Neighbourhood*

Empat buah sel bergabung membentuk satu blok. *Neighbourhood* suatu sel adalah sel-sel lain yang berada pada blok yang sama dengan sel tersebut.

Pada setiap *timestep*, masing-masing blok berpindah secara diagonal sehingga blok suatu sel berubah-ubah sesuai dengan genap atau ganjilnya *timestep*.



Gambar 7. Margolus Neighbourhood

Sel yang terletak ditengah adalah sel A (pusat sel). Sel berwarna abu-abu adalah neighbours dari sel A.

4) Fungsi Transisi

Fungsi transisi adalah aturan yang menentukan bagaimana status suatu sel berubah berdasarkan status sekarang dan status tetangganya.

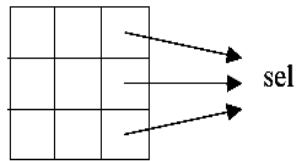
5) Status Awal Sel

Status awal sel adalah status yang dimiliki oleh masing-masing sel pada saat sistem mulai berjalan, (Nurhasanah Rasyid, 2011).

2. Definisi Formal *Cellular Automata*

Secara formal, *Cellular Automata* dapat didefinisikan sebagai 5-*tuple* $\langle L, Q, N, \delta, C_0 \rangle$, dengan:

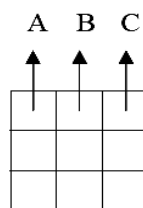
- i. L : Geometri (bentuk sel serta bentuk sistem yang disusun oleh sel-sel tersebut) dengan d adalah dimensi dari bentuk geometri tersebut.



Gambar 8. Bentuk sistem yang disusun oleh sel sel.

Cellular Automata diatas adalah *Cellular Automata* dua dimensi ($d=2$) dengan bentuk geometri grid dan bentuk geometri sel-sel penyusunnya adalah bujur sangkar.

- ii. Q : Himpunan berhingga *state* dengan k adalah banyak *state* didalam gabungan sel-sel ($Q = \cup_{\forall sel} \{state\}$, dengan $n(Q) = k$).



Gambar 9. *Cellular Automata* dengan himpunan *state* yang dimiliki setiap selnya

Jika A, B, C, \dots , adalah himpunan *state* yang dimiliki oleh tiap-tiap sel maka $Q = A \cup B \cup C \cup \dots$. Karena $A = B = C$ (misal = $\{0, 1\}$), maka dapat dikatakan $Q = A$ ($\{0, 1\}$) dan $n(Q) = k = 2$.

- iii. Digunakan notasi n untuk menyatakan banyaknya sel tetangga (*neighbours*) di dalam N dan notasi r untuk menyatakan jari-jari dari N , dengan mengasumsikan $r=1$.

N : Himpunan sel yang mempengaruhi *state* sel tersebut pada langkah berikutnya.



Gambar 10. Ilustrasi *Neighbourhood*

Pada gambar 10, *neighbourhood* dari sel yang ditengah adalah adalah sel-sel yang berwarna abu-abu sehingga $N = \{\text{sel atas, sel bawah, sel kiri, sel kanan}\}$, $n = 4, r = 1$.

iv. $\delta : Q^{t+1} \rightarrow Q$. (Q^{t+1} adalah *tuple* hasil iterasi ke-t algoritma MD8 yang terdiri atas *state* dirinya sendiri dan *state* sel-sel *neighbours*-nya). Fungsi transisi δ dioperasikan pada sistem untuk sejumlah *timestep*, pada tiap *timestep* fungsi dilakukan serentak pada semua sel. Input fungsi ini adalah *state* dirinya sendiri dan *state neighbours*-nya pada *timestep* sebelumnya. Misalnya *game of life* (GOL) mempunyai fungsi transisi sebagai berikut:

1. Jika suatu sel berada pada state mati dan dikelilingi oleh tepat tiga *neighbours* yang berada pada state hidup, maka pada langkah berikut sel tersebut menjadi hidup,
2. Jika suatu sel berada pada state hidup dan dikelilingi oleh kurang dari dua atau lebih dari tiga *neighbours* yang juga berada pada *state* hidup, maka pada langkah berikut sel tersebut akan menjadi mati,
3. Selain dua hal diatas, sel tidak mengalami perubahan *state*.

- v. C_0 : Konfigurasi awal sistem. Konfigurasi awal adalah himpunan yang berisi *state* tiap-tiap sel dari *Cellular Automata* pada *timestep* 0 atau pada waktu sistem mulai berjalan.

3. Karakteristik *Cellular Automata*

Cellular Automata memiliki daerah dan waktu yang diskrit, $t = 1, 2, 3, \dots$. Yang mana di dalamnya terdapat sel-sel yang teratur dan memiliki urutan yang tetap, dimana setiap sel hanya memiliki nilai tertentu yang nilainya diperbaharui dari pertambahan waktu yang diskrit, serta nilai setiap sel diperbarui secara serempak berdasarkan pada konfigurasi nilai-nilai sebelumnya.

Pada dasarnya karakteristik *Cellular Automata* antara lain: sistem diskrit yang dinamis, *locality*, *parallelism* dan *emergent*. Dengan karakteristik ini, *Cellular Automata* sesuai digunakan untuk memodelkan sistem yang kompleks secara sederhana.

1) Sistem Diskrit Dinamis

Sistem diskrit yang dinamis adalah sistem yang memiliki spesifikasi berikut:

- a) memiliki entiti-entiti yang berubah seiring dengan berjalannya waktu. Perubahan ini disebabkan oleh sistem itu sendiri (karena faktor internal),
- b) entiti-entiti yang menyusun sistem tersebut terhitung (countable),
- c) perubahan entiti itu terjadi dalam waktu yang diskrit (per *timestep*).

2) *Locality*

Locality berarti ketika sebuah sel berubah, status barunya hanya dipengaruhi oleh status lama dan status *neighbours*-nya. Karena umumnya *neighbourhood* suatu sel hanya meliputi sel-sel sekitarnya saja (jari-jari *neighbourhood* tidak besar) dapat dikatakan bahwa perubahan status dari tiap sel hanya bergantung pada dirinya dan sel-sel disekitarnya saja.

3) Parallelisme

Parallelisme berarti perubahan masing-masing sel dapat dilakukan dengan tidak bergantung pada sel lain sehingga semua sel dapat diperbarui secara serentak.

4) *Emergent*

Tiap sel penyusun *Cellular Automata* hanya melakukan fungsi-fungsi sederhana yang sepertinya tidak terlalu bermanfaat. Namun, ketika sel-sel tersebut dilihat sebagai satu kesatuan, maka akan menjadi satu sistem yang dapat menghasilkan sesuatu yang besar. Jadi seakan-akan sistem tersebut muncul dengan tiba-tiba (*emergent*), yaitu gabungan bagian-bagiannya lebih besar daripada penjumlahan bagian-bagiannya. Hal inilah yang disebut dengan *emergent behavior* dari *Cellular Automata*.

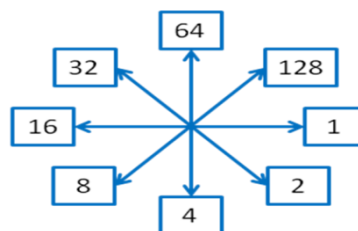
D. Algoritma *Flow Direction*

Algoritma *Flow Direction* merupakan algoritma yang digunakan untuk menentukan arah aliran pada masing-masing piksel dalam DEM.

Setiap piksel dalam DEM mempunyai nilai ketinggian yang unik, sehingga untuk menentukan arah aliran dengan mengetahui nilai piksel sekelilingnya.

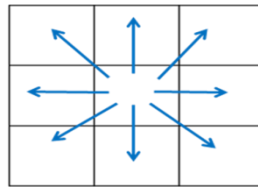
Menurut Geoscience Australia (2005), ada 8 arah utama yakni timur, tenggara, selatan, barat daya, barat, barat laut, utara, timur laut yang menandakan arah aliran permukaan dari satu piksel terhadap piksel sekelilingnya. Arah tersebut dikodekan berdasarkan standar konvensi Arc/Info dengan 1=*East*, 2=*South East*, 4=*South*, 8=*South West*, 16=*West*, 32=*North West*, 64=*North* dan 128=*North East*. Pengkodean arah aliran algoritma ini disajikan pada gambar 11.

Pada algoritma D8, hanya ada satu aliran yang digunakan berdasarkan nilai piksel yang terendah di sekelilingnya. Sedangkan pada algoritma MD8, memungkinkan arah aliran lebih dari satu berdasarkan nilai piksel yang lebih rendah disekelilingnya.



Gambar 11. Arah Aliran Algoritma D8

Secara skematis aplikasi algoritma *flow direction* dalam penentuan arah aliran disajikan pada gambar 12 berikut:



Gambar 12. Skema Aplikasi Algoritma *Flow Direction*

Terdapat dua kaedah utama algoritma *flow direction*, yakni algoritma *Single Flow Direction* (SFD) atau biasa disebut D8 dan algoritma *Multiple Flow Direction* (MFD) atau biasa disebut MD8.

1. Algoritma D8

Algoritma D8 (delapan arah aliran air) telah banyak digunakan dalam analisis sistem informasi geografi. Dalam algoritma ini, hanya ada satu arah aliran yang diambil yang ditentukan dengan cara membandingkan beda tinggi antarpiksel di sekelilingnya. Algoritma yang umum digunakan dalam proses penentuan arah aliran adalah *D8 method* (Tarboton, 1989; Tarboton and Bras, 1991).

Arah aliran mengacu pada nilai piksel yang paling kecil dari nilai piksel tinjauan.

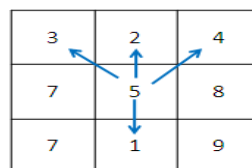
13	11	13
9	10	11
7	6	8

Gambar 13. Algoritma *Flow Direction* dengankaidah D8

Sebagai contoh, dengan nilai piksel seperti pada gambar 13, maka dapat diketahui kemiringan dari titik tengah nilai 10 terhadap nilai piksel sekelilingnya. Dengan nilai ukuran piksel sesuai data, maka dapat diketahui, berdasarkan algoritma D8, arah aliran akan menuju nilai piksel 6 sebagai nilai piksel terendah dari nilai piksel sekeliling nilai 10.

2. Algoritma MD8

Berbeda dengan algoritma D8, pada MD8, aliran air didistribusikan ke seluruh piksel disekelilingnya yang memiliki nilai piksel yang lebih rendah dari piksel tinjauan.

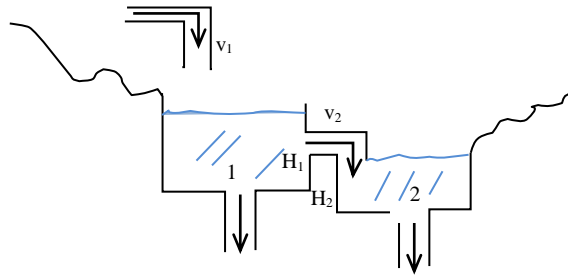


Gambar 14. Algoritma *Flow Direction* dengan kaidah MD8

E. Persamaan dan Konsep Bernoulli

Persamaan dasar dalam hidrodinamika telah dirintis dan dirumuskan oleh Daniel Bernoulli dengan mengembangkan aplikasi konsep matematika dibidang mekanika fluida yang dikenal dengan persamaan *Bernoulli*. Persamaan *Bernoulli* ini dapat dimanfaatkan untuk menjelaskan gejala fisis yang berkaitan dengan aliran air.

Agar persamaan *Bernoulli* yang diturunkan berlaku secara umum maka diasumsikan fluida yang mengalir pada bejana memiliki ketinggian yang berbeda.



Gambar 15. Bejana dengan ketinggian yang berbeda
(Ratna Nur Tiara Shanty, 2011)

Hukum Bernoulli menyatakan bahwa jumlah tekanan, energi kinetik per satuan volume dan energi potensial persatuan volume memiliki nilai yang sama di setiap titik sepanjang aliran fluida ideal. Secara matematis ditulis sebagai:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gH = \text{konstan} \text{ atau} \quad \dots (2.1)$$

$$P_1 + \rho gH_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gH_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \text{serapan} \quad \dots (2.2)$$

Dimana:

- a. P_1 (N/m^2) adalah tekanan udara atmosfer di bejana 1 dan P_2 adalah tekanan di bejana nomor 2
- b. v_1 dan v_2 adalah kecepatan di bejana nomor 1 dan 2 (m/s) dalam mengalirkan air ke tempat yang lebih rendah
- c. H_1 dan H_2 adalah ketinggian di bejana 1 dan 2 (m) dimana bejana 1 lebih tinggi daripada bejana 2
- d. ρ (kg/m^3) adalah massa jenis air.
- e. g (m/s^2) adalah percepatan gravitasi

Karena berada pada permukaan terbuka maka tekanannya sama dengan tekanan atmosfer ($P_1 = P_2$). Dan massa jenis zat cair sama

sehingga variabel-variabel tersebut bisa dihilangkan. Dengan demikian persamaan *Bernoulli* untuk kasus ini:

$$gH_1 + \frac{1}{2}v_1^2 = gH_2 + \frac{1}{2}v_2^2 \quad \dots (2.3)$$

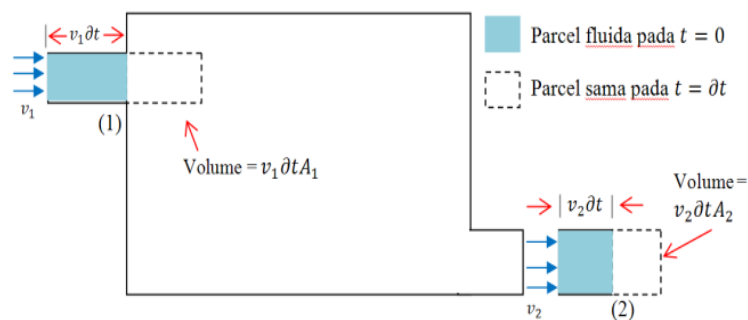
atau

$$v_2^2 = 2g(H_1 - H_2) + v_1^2 \quad \dots (2.4)$$

Karena tidak diketahuinya kecepatan awal, maka nilai kecepatan awal v_1 pada $t = 0$ diasumsikan sama dengan 0. Sehingga, nilai kecepatan aliran v_2 pada $t = t + 1$ dapat dituliskan sebagai berikut:

$$v_2 = \sqrt{2g(H_1 - H_2) + v_1^2} \quad \dots (2.5)$$

Dari Pers.(2.5), dapat diketahui bahwa nilai v_2 akan lebih besar daripada nilai v_1 karena nilai H_1 lebih besar daripada nilai H_2 . Nilai v_2 yang diperoleh akan dijadikan nilai v_1 pada proses selanjutnya (Ratna Nur Tiara Shanty, 2011).



Gambar 16. Penampang aliran fluida

Laju aliran massa dari sebuah sisi keluar, \dot{m} (kg/s), diberikan oleh $\dot{m} = \rho Q$, dimana Q (m^3/s) adalah laju aliran volume. Jika luas sisi keluar A dan fluida melintasi luas ini dengan kecepatan rata-rata v , maka volume

fluida yang melintasi A dalam selang waktu dt adalah $vAdt$, atau $\frac{dV}{dt} = vA$.

Jadi laju aliran volume (volume per satuan waktu) adalah $Q = vA$.

Pada gambar 16, jika sisi masuk adalah yang diberi tanda (1) dan sisi keluar adalah yang diberi tanda (2), maka $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$. Jadi kekekalan massa membutuhkan:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad \dots (2.6)$$

Jika kerapatan tetap konstan, maka $\rho_1 = \rho_2$ maka persamaan kontinuitas adalah $A_1 v_1 = A_2 v_2$ atau $Q_1 = Q_2$ (Bruce R. Munson dkk, 2002).

F. Penerapan Persamaan *Bernoulli* pada *Cellular Automata*

Dengan metode *Cellular Automata* yang prinsipnya ketetanggaan, maka titik pusat diasumsikan sebagai tempat yang pertama kali terdapat genangan air. Kemudian 8 tetangganya adalah tempat yang siap menampung air yang mengalir dari titik pusat. Hasil penyederhanaan persamaan *Bernoulli*, selanjutnya akan digunakan sebagai perbandingan nilai *Bernoulli* pada titik pusat dengan 8 tetangganya.

Dalam penerapan persamaan *Bernoulli* pada *Cellular Automata*, asumsi yang digunakan yaitu sebagai berikut:

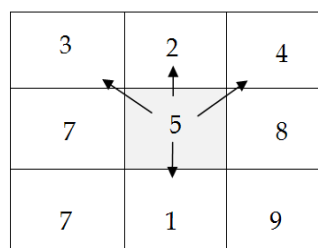
1. Air yang ada pada sel awal/ sel tinjauan akan dialirkan ke sel tetangga yang memiliki ketinggian yang lebih rendah dari sel tinjauan dengan proporsi tertentu.
2. Pendistribusian air ke tetangga berdasarkan kecepatan. Masing-masing ketinggian pada sel memiliki kecepatan yang berbeda.

Semakin besar selisih ketinggian sel pusat terhadap tetangganya, maka kecepatan yang keluar ke sel tetangga akan semakin besar. Hal ini akan mempengaruhi banyak atau sedikitnya volume air yang masuk ke sel tetangga.

3. Sebagian air yang berada pada sel akan terserap ke dalam tanah dengan asumsi keadaan tanah homogen.
4. Pendistribusian air terus berlanjut hingga volume air tersebut lebih kecil dari kemampuan serapan tanah atau jika semua daerah disekelilingnya memiliki ketinggian yang lebih besar dibandingkan ketinggian tempat tersebut.
5. Fungsi transisi dari satu sel ke sel lainnya didefinisikan menggunakan konsep *Cellular Automata*.

Berikut adalah proses-prosesnya dari penerapan persamaan *Bernoulli* pada *Cellular Automata*:

- a) Menentukan sel yang lebih rendah diantara 8 sel tetangganya



- b) Menentukan nilai kecepatan aliran air dari sel pusat menuju sel tetangga yang lebih rendah.

Besar kecepatan aliran air diperoleh dari nilai-nilai Bernoulli yaitu dengan menggunakan Pers.(2.4).

$v_{(x-1)(y-1)}$	$v_{(x)(y-1)}$	$v_{(x+1)(y-1)}$
$v_{(x-1)(y)}$	$v_{(x)(y)}$	$v_{(x+1)(y)}$
$v_{(x-1)(y+1)}$	$v_{(x)(y+1)}$	$v_{(x+1)(y+1)}$

Nilai kecepatan tiap sel, disimpan dalam variabel $v_{(x)(y)}$.

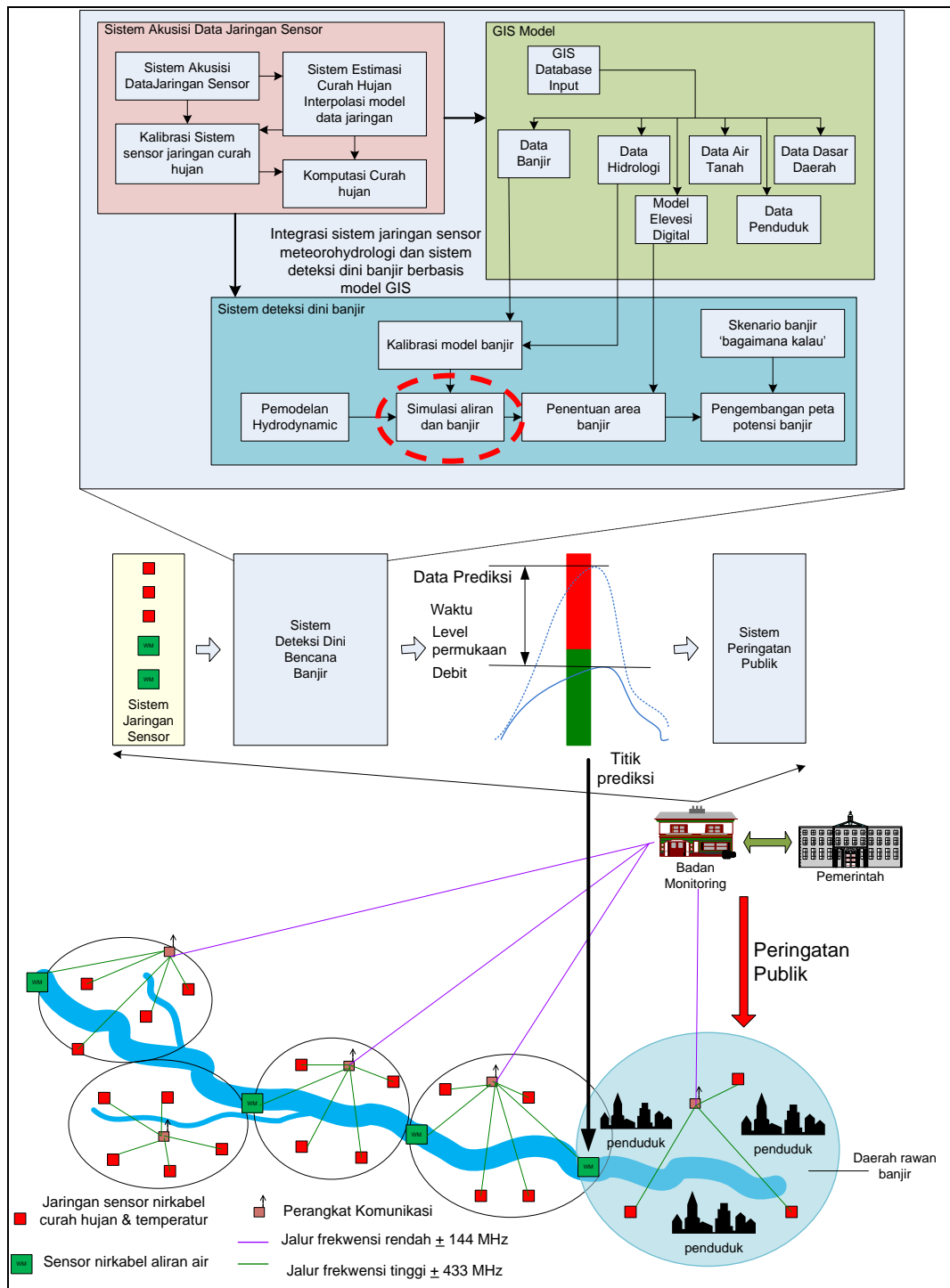
- c) Menghitung volume air yang akan didistribusikan dari sel pusat ke sel tetangga yang lebih rendah.

Banyaknya volume air yang didistribusikan ke masing-masing sel tetangga yang lebih rendah bergantung pada besarnya kecepatan aliran air dari sel pusat menuju masing-masing sel tetangga yang lebih rendah.

G. Roadmap Penelitian

1. Penelitian yang Pernah Dilakukan Sebelumnya

Penelitian mengenai pola aliran air serta aturan *Cellular Automata* yang pernah dilakukan sebelumnya dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 17. Konsep Pengembangan Sistem Deteksi Dini Bencana Banjir

(Zahir Zainuddin, 2009)

Dengan mengimplementasikan sistem deteksi dini maka datangnya bencana dapat diketahui lebih awal dan diharapkan warga masyarakat masih memiliki waktu untuk menghindar dan menyelamatkan jiwa maupun materi, (Zahir Zainuddin, 2009). Gambar 17 di atas merupakan Konsep Pengembangan Sistem Deteksi Dini Bencana Banjir dari penelitian Zahir Zainuddin pada tahun 2009 dengan judul “Pengembangan Prototipe Sistem Jaringan Sensor Hidrometeorologi Nirkabel dan Model Hidrodinamic Berbasis GIS untuk Peringatan Dini Bencana Banjir: Studi Kasus Kabupaten Sinjai”.

Pada tahun 2010, Irmawati melakukan penelitian dengan judul “Simulasi Aliran Air pada Permukaan Tiga Dimensi Menggunakan Algoritma *Flow Direction* (Studi Kasus Kabupaten Sinjai)”. Penelitian ini hanya membahas pola aliran air permukaan menggunakan algoritma D8 dengan tidak memperhitungkan serapan tanah dan volume air.

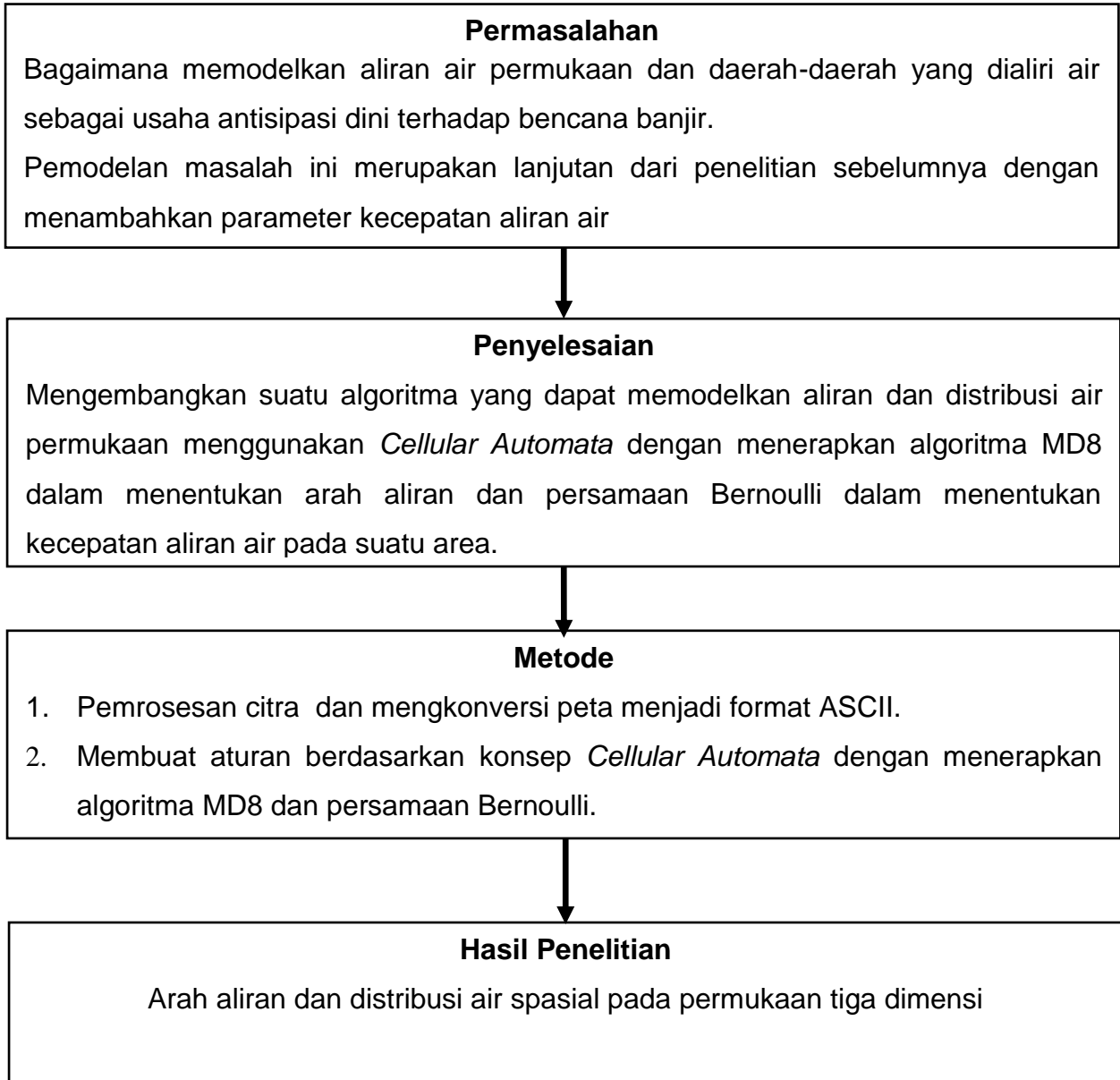
Nurhasanah Rasyid, pada tahun 2011 melakukan penelitian dengan judul Simulasi Aliran Dan Distribusi Air Permukaan Menggunakan Model Elevasi Digital Dan *Cellular Automata* Dengan Memperhitungkan Volume Dan Serapan. Penelitian ini membahas aliran dan distribusi air permukaan menggunakan model elevasi digital dan menerapkan konsep *Cellular Automata* dengan memperhitungkan volume dan mengasumsikan serapan tanah terhadap air adalah homogen.

2. Rencana Pengembangan Penelitian

Rencana pengembangan penelitian yang akan dilakukan adalah menerapkan persamaan Bernoulli dalam memodelkan aliran air permukaan, yaitu arah aliran air ke semua sel yang nilainya lebih rendah dengan memperhitungkan volume, kecepatan air dan serapan tanah. Dimana aturan pengembangan penelitian ini diterapkan dengan konsep *Cellular Automata*.

Berlimpahnya air pada suatu daerah akibat curah hujan yang tinggi dapat menjadikan banjir dan genangan air yang berpotensi menimbulkan materi bahkan korban jiwa sekalipun. Suatu sistem deteksi dini diperlukan untuk mengetahui datangnya bencana secepat mungkin sebagai upaya untuk menghindari jatuhnya korban. Model ini memperlihatkan adanya daerah yang dapat menjadi sumber bencana dan ada daerah yang menjadi ancaman bencana.

H. Kerangka Pemikiran



Gambar 18. Kerangka Pemikiran