

DISERTASI

**PENGGUNAAN MODEL RRI (*RAINFALL RUNOFF
INUNDATION*) UNTUK PRAKIRAAN GENANGAN DI DAS
TALLO**

*The Utilization of the RRI model (Rainfall Runoff Inundation) for
Predicting Inundation in The Tallo Watershed*

**ZULVYAH FAISAL
D013182001**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN DISERTASI

**PENGUNAAN MODEL RRI (*RAINFALL RUNOFF INUDATION*)
UNTUK PRAKIRAAN GENANGAN DI DAS TALLO**

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

Ttd

**ZULVYAH FAISAL
D013182001**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

DISERTASI

**PENGGUNAAN MODEL RRI (*RAINFALL RUNOFF INUDATION*)
UNTUK PRAKIRAAN GENANGAN DI DAS TALLO**

ZULVYAH FAISAL

D013182001

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 25 Maret 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



Prof. Dr. Ir. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng
NIP. 195409101983031003

Co-Promotor



Prof. Dr.Eng. Ir. Farouk Maricar, MT., PU-SDA
NIP. 196410201991031002

Co-Promotor



Dr.Eng. Ir. Mukshan Putra Hatta, ST., MT
NIP. 197305121999031002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT.
IPM, ASEAN.Eng
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



Prof. Dr.Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP. 197206192000122001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Zulvyah Faisal
Nomor mahasiswa : D013182001
Program studi : Doktor Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Penggunaan Model RRI (*Rainfall Runoff Inundation*) untuk Prakiraan Genangan di DAS Tallo” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng., sebagai Promotor, Prof. Dr.Eng. Ir. Farouk Maricar, M.T., dan Dr.Eng. Ir. Mukhsan Putra Hatta, S.T., M.T., sebagai co-promotor-1 dan co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (Seminar Nasional 2023, Halaman 54-58, dan ISSN 2406-9051) sebagai artikel dengan judul “Penggunaan Data Hujan Satelit untuk Prakiraan Banjir di DAS Tallo” dan di Jurnal (*Design Engineering*, Volume 2024: Issue 01, Halaman 47-61, dan ISSN: 0011-9342) sebagai artikel dengan judul “*The Utilization of RRI (Rainfall Runoff Inundation) Model for Inundation Forecasting in Tallo Watershed*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 26 April 2024

Yang menyatakan



Zulvyah Faisal

ABSTRAK

Zulvyah Faisal. Penggunaan Model RRI (*Rainfall Runoff Inundation*) Untuk Prakiraan Genangan di DAS Tallo (dibimbing oleh **Muh.Saleh Pallu, Farouk Maricar dan Mukhsan Putra Hatta**)

Metode yang digunakan untuk mengidentifikasi daerah rawan banjir adalah dengan memanfaatkan model RRI (*Rainfall Runoff Inundation*). Pada tahap awal pengurangan risiko banjir, pemodelan genangan dapat dilakukan dengan menggunakan data curah hujan dari radar, satelit GSDMap, satelit GPM, dan pengukuran langsung alat pengukur hujan. Pendekatan pemodelan melibatkan data real-time, yang mengintegrasikan jumlah curah hujan dengan daerah aliran sungai yang ada. Banjir yang melanda Kota Makassar dan beberapa wilayah di DAS Tallo disebabkan oleh curah hujan yang terus menerus pada tanggal 22 Desember 2022 hingga 31 Januari 2023 sehingga mengakibatkan beberapa wilayah terendam selama beberapa hari. Penelitian ini berfokus pada peramalan banjir berdasarkan sebaran curah hujan pada periode tertentu. Pemodelan ini menggunakan model RRI dengan masukan data dari berbagai sumber curah hujan, sehingga menghasilkan prediksi banjir yang lebih baik terkait tinggi dan luas genangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model RRI dengan menggunakan data radar memberikan hasil validasi terbaik dengan nilai korelasi (R) sebesar 0,85, Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,18, Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) sebesar 0,39, dan Pbias sebesar - 0,46. Data radar secara efektif dapat menggambarkan pola genangan atau sebaran banjir di DAS Tallo, dengan tinggi genangan berkisar antara 0,5 m hingga 2,5 m dan luas genangan yang luas. Pemodelan banjir spasial di DAS Tallo pada kejadian banjir tahun 2022 secara akurat mewakili kejadian nyata yang berdampak pada wilayah Kecamatan Manggala, Tallo, Tamalanrea, dan Biringkanaya dan sekitarnya.

Kata Kunci : GSDMap, GPM, Radar, Genangan, RRI

ABSTRACT

Zulvyah Faisal. The Utilization of the RRI model (Rainfall Runoff Inundation) for Predicting Inundation in The Tallo Watershed (dibimbing oleh **Muh.Saleh Pallu, Farouk Maricar dan Mukhsan Putra Hatta**)

The method used to identify flood-prone areas is the utilization of the RRI (Rainfall Runoff Inundation) model. In the initial stage of flood risk reduction, inundation modeling can be carried out using rainfall data from radar, GSMap satellite, GPM satellite, and direct rain gauge measurements. The modeling approach involves real-time data, integrating rainfall amounts with existing watersheds. Floods that affected the city of Makassar and several areas in the Tallo Watershed were due to continuous rainfall from December 22, 2022, to January 31, 2023, resulting in several areas being submerged for several days. This study focuses on flood forecasting based on rainfall distribution over a specific period. The modeling utilizes the RRI model with input data from various rainfall sources, resulting in improved flood predictions regarding inundation height and extent. The research findings indicate that the RRI model using radar data provides the best validation results with a correlation (R) value of 0.85, Root Mean Square Error (RMSE) of 0.18, Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.39, and Pbias of -0.46. Radar data can effectively depict the inundation or flood distribution patterns in the Tallo Watershed, with inundation heights ranging from 0.5 m to 2.5 m and an extensive inundation area. Spatial flood modeling in the Tallo Watershed during the 2022 flood event accurately represents the real occurrences that affected the Manggala, Tallo, Tamalanrea, and Biringkanaya districts and surrounding areas.

Kata Kunci : GSMap, GPM, Radar, Inundation, RRI

DAFTAR ISI

UJIAN TUTUP DISERTASI	1
LEMBAR PENGESAHAN	ii
UJIAN TUTUP	, ii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH, DAN LAMBANG	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	8
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Manfaat Penelitian	9
1.5 Batasan Masalah	9
1.6 Kebaruan/Novelti	10
1.7 Penelitian Terdahulu	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	31
2.1 Kajian Pustaka	31
2.1.1 Limpasan	31
2.1.2 Karakteristik DAS (Daerah Aliran Sungai)	34
2.1.3 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Aliran Sungai	43
2.1.4 Komponen Suatu Model	49
2.2 Landasan Teori	52
2.2.1 Banjir	52
2.2.2 Prakiraan Banjir	53
2.2.3 Metode Penanganan Banjir	55
2.2.4 Run Off Model	59
2.2.5 Rainfall-Runoff Model	60
2.3 Model RRI (Rainfall Runoff Inundation)	62
2.3.1 Rainfall-runoff Inundation Model Equation	63
2.3.2 Data topografi Rainfall-runoff Inundation	70
2.3.3 Data curah hujan Rainfall-runoff Inundation	70
2.3.4 Curah hujan dengan Radar Cuaca	71
2.4 Kerangka Pikir	75

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	77
3.1 Tempat Dan Waktu Penelitian.....	77
3.2 Jenis Penelitian Dan Sumber Data	78
3.3 Alat Penelitian.....	81
3.4 Cara Pengumpulan Data	82
3.5 Cara Pengolahan Data	82
3.6 Analisis Data	83
3.7 Validasi Data.....	84
3.7.1 Korelasi	84
3.7.2 Root mean square error (RMSE)	84
3.7.3 Percent Bias (PBias)	85
3.8 Bagan Alir Proses Penelitian dan Analisa Data	85
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	87
4.1 Analisis Curah Hujan	87
4.1.1 Analisis Curah Hujan dari AWS dan ARG.....	87
4.1.2 Analisis Curah Hujan dari satelit GSMaP dan GPM	90
4.1.3 Analisis Curah Hujan dari Radar Cuaca	98
4.2 Analisis Akurasi Curah Hujan AWS/ARG, Satelit dan Radar	102
4.2.1 Korelasi Data Curah Hujan	102
4.2.2 Verifikasi dan Validasi Data Curah Hujan	107
4.3 Aplikasi input data terhadap model RRI.....	109
4.3.1 Input Data Topografi.....	109
4.3.2 Input Tutupan Lahan (<i>Land Cover</i>).....	110
4.3.3 Input Curah Hujan	116
4.3.4 Input Data Geometrik Sungai.....	118
4.4 Pemodelan RRI (Rainfall Runoff Inundation)	119
4.4.1 Hasil Pemodelan Tinggi Genangan dan Sebaran Genangan ..	119
4.4.2 Kalibrasi, Validasi Model.....	126
4.4.3 Komparasi Model.....	130
4.5 Temuan Empiris Penelitian	133
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	136
5.1. Kesimpulan	136
5.2. Saran.....	136
DAFTAR PUSTAKA	138

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kejadian Banjir Kota Makassar Tahun 2009 - 2022	3
Tabel 2. Matriks Penelitian Terdahulu	11
Tabel 3. Interpretasi nilai korelasi	84
Tabel 4. Jumlah nilai akumulasi CH harian AWS dan ARG (mm)	88
Tabel 5. Jumlah nilai akumulasi CH harian GSMap (mm)	93
Tabel 6. Jumlah nilai akumulasi CH harian GPM (mm)	97
Tabel 7. Jumlah nilai akumulasi CH harian Radar (mm)	99
Tabel 8. Korelasi Data Hujan Terukur terhadap Data Satelit GPM	103
Tabel 9. Korelasi Data Hujan Terukur terhadap Data Satelit GSMap	105
Tabel 10. Korelasi Data Hujan Terukur terhadap Data Radar	106
Tabel 11. Validasi Data Hujan Terukur AWS/ARG terhadap Data Satelit GSMap, GPM dan data Radar	107
Tabel 12 Modifikasi sistem legenda yang digunakan pada RRI Model	111
Tabel 12. Nilai C terhadap Perubahan Tata Guna Lahan pada Tahun 1990	112
Tabel 13. Nilai C terhadap Perubahan Tata Guna Lahan pada Tahun 2000	113
Tabel 14. Nilai C terhadap Perubahan Tata Guna Lahan pada Tahun 2010	113
Tabel 15. Nilai C terhadap Perubahan Tata Guna Lahan pada Tahun 2022	114
Tabel 16. Nilai Parameter pada kondisi (A), (B) dan (C)	115
Tabel 17. Parameter Green-Ampt Infiltration untuk berbagai jenis tanah	115
Tabel 18. Tinggi banjir berdasarkan Survey Lapangan	119
Tabel 19. Skala Faktor Untuk Data Curah Hujan	133

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Tren Kejadian Bencana Banjir di Indonesia.....	1
Gambar 2 Pengaruh DAS terhadap Volume Aliran	34
Gambar 3 Luasan Kontribusi	35
Gambar 4 Pengaruh Ukuran DAS terhadap aliran permukaan.....	35
Gambar 5 Pengaruh Bentuk DAS terhadap Aliran.....	36
Gambar 6 Pengaruh bentuk DAS terhadap aliran puncak.....	37
Gambar 7 Pengaruh meander sungai terhadap aliran	38
Gambar 8 Pengaruh kemiringan DAS terhadap aliran	39
Gambar 9 Perbedaan kekasaran permukaan (roughness) pada saluran.....	40
Gambar 10 Pengaruh kekasaran permukaan terhadap debit puncak	40
Gambar 11 Daerah tangkapan untuk wilayah perkotaan.....	42
Gambar 12 Pelurusan saluran alam mempercepat aliran air	43
Gambar 13 Bentuk DAS Memanjang (Bulu Burung) dan Hidrograf yang dihasilkan	45
Gambar 14 Bentuk DAS Radial (kipas) dan Hidrograf Banjir yang dihasilkan	45
Gambar 15 Bentuk DAS Paralel dan Hidrograf yang dihasilkan	46
Gambar 16 Komponen dari Suatu Model Daerah Aliran Sungai (DAS)	50
Gambar 17 Contoh konfigurasi dari model daerah tangkapan yang terintegrasi dengan sistem prakiraan banjir	54
Gambar 18 Proses pengembangan model prakiraan banjir (WMO (World Meteorological Organization), 2011)	55
Gambar 19 Bendungan dan waduk.....	57
Gambar 20 Contoh struktur runoff model yang menunjukkan pergerakan fisis	59
Gambar 21 Beberapa contoh sederhana rainfall-runoff model berbasis fisik, konseptual, dan berbasis data, tanpa komponen evapotranspirasi. (a) Rencana daerah tangkapan, (b) Physically-based model dengan tiga lapisan tanah dan bawah permukaan, (c) Model jaringan saraf tiruan dan, (d) Conseptual model dengan intersepsi, tanah, limpasan permukaan, dan penyimpanan air tanah	62
Gambar 22 Diagram skematik dari model Rainfall-Runoff-Inundation	62

Gambar 23	Contoh pola poligon Thiessen (Thiessen, 1911)	71
Gambar 24	Contoh pengaturan awal produk CMAX (Leonardo, 2018).....	73
Gambar 25	Contoh pengaturan awal produk PAC (Leonardo, 2018).....	74
Gambar 26	Contoh pengaturan awal produk PRT (Leonardo, 2018).....	75
Gambar 27	Kerangka Pikir Penelitian.....	76
Gambar 28	Peta DAS Tallo.....	77
Gambar 29	Lokasi Wilayah Penelitian	78
Gambar 30	Diagram alir penelitian.....	86
Gambar 31	Pola Hujan AWS dan ARG Bulan Desember 2022	89
Gambar 32	Pola rain thiessen hujan 20 - 31 Desember 2022	90
Gambar 33	Pola spasial hujan GSMAP tanggal 21 - 31 Desember 2022.....	92
Gambar 34	Pola Hujan GSMap Bulan Desember 2022.....	94
Gambar 35	Pola spasial hujan GPM tanggal 21 - 31 Desember 2022.....	96
Gambar 36	Pola Hujan GPM Bulan Desember 2022.....	98
Gambar 37	Pola Hujan Radar Bulan Desember 2022.....	100
Gambar 38	Pola spasial hujan produk PAC Radar Cuaca tanggal 21 - 31 Des 2022	102
Gambar 39	Korelasi Data Hujan Terukur terhadap Data Satelit GPM.....	103
Gambar 40	Korelasi Data Hujan Terukur terhadap Data Satelit GSMap	104
Gambar 41	Korelasi Data Hujan Terukur terhadap Data Radar	106
Gambar 42	Data Hujan Terukur AWS/ARG terhadap Data Satelit GSMap, GPM dan data Radar	107
Gambar 43.	Data Digital Elevation Model (DEM)	109
Gambar 44.	Data Flow Direction (DIR).....	110
Gambar 45.	Data Flow Accumulation (ACC).....	110
Gambar 46.	Klasifikasi Landcover data bersumber GLCNMO v2.....	111
Gambar 47.	Perubahan Tata Guna lahan di DAS Tallo (1990 - 2022)	112
Gambar 48.	Kondisi kondisi aliran Surface/sub-surface	114
Gambar 49.	Pola interpolasi AWS dan ARG secara IDWS	116
Gambar 50.	Pola distribusi CH GPM setelah interpolasi	117
Gambar 51.	Pola distribusi CH GSMap setelah interpolasi	117

Gambar 52. Pola distribusi CH Radar setelah interpolasi	117
Gambar 53. Contoh Potongan Melintang Sungai Tallo	118
Gambar 54. Running RRI Model untuk Curah Hujan Observasi (AWS/ARG)	120
Gambar 55. Running RRI Model untuk Curah Hujan Satelit GPM.....	121
Gambar 56. Running RRI Model untuk Curah Hujan Satelit GSMap	122
Gambar 57. Running RRI Model untuk Curah Hujan Radar	123
Gambar 58. Persentase Akurasi Input Output Model RRI terhadap Hasil Survey di DAS Tallo	125
Gambar 59. Overlay Peil Banjir hasil Survey dan Model RRI CH Satelit Radar	125
Gambar 60. Lokasi AWLR Waduk Nipa-Nipa	127
Gambar 61. Validasi Tinggi Muka Air Kolam Regulasi Nipa-Nipa dengan Simulasi Model RRI	129
Gambar 62. Data puncak genangan (hs_peak) DAS Tallo.....	131
Gambar 63. (a1,a2) Sebaran Inundasi di seluruh DAS Tallo; (b) Blok 10 Komp Perumahan Antang; (c) Kampus 2 PNUP ;	132
Gambar 64. Layout Peil Banjir pada Lokasi Penelitian Blok 10 Komp Perumahan Antang; Kampus 2 PNUP ;	135

DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH, DAN LAMBANG

Istilah	Arti dan Keterangan
RRI	<i>Rainfall-Runoff-Inundation</i>
<i>run off</i>	aliran di permukaan bumi
DAS	Daerah Aliran Sungai
<i>stream density</i>	Kerapatan jaringan sungai
meander	Belokan ruas sungai

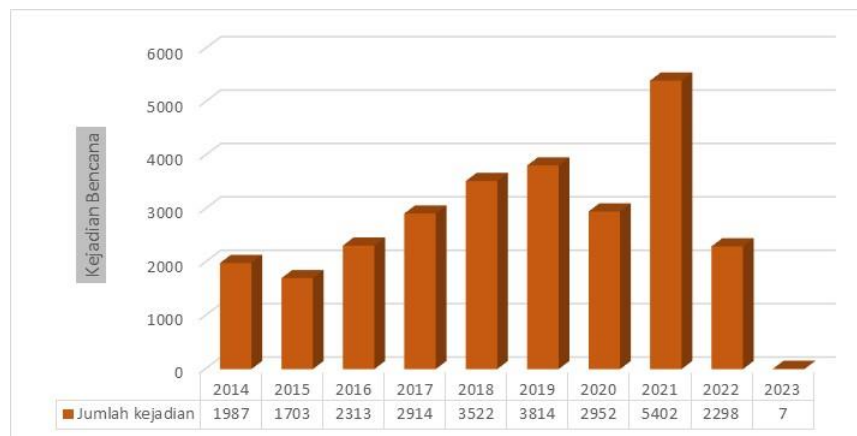
Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Q	Debit Aliran
v	Kecepatan Aliran
A	Luas penampang
H	tinggi muka air

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Banjir merupakan salah satu bahaya yang berpengaruh besar dalam kehidupan, sektor perekonomian, dan infrastruktur pada banyak bagian di dunia. Banjir juga mempengaruhi manusia dalam jumlah terbesar dibanding bencana lainnya, dengan jumlah mencapai lebih dari 2 miliar orang, diikuti oleh kekeringan yang mempengaruhi 1,5 miliar orang pada periode 1998-2017 (UNISDR, 2017). *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) telah melaporkan bahwa kejadian bencana seperti banjir dan kekeringan akan menjadi lebih sering mengancam manusia (IPCC, 2021).

Merujuk data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB, 2023), sejak awal tahun 2022 tercatat 706 bencana terjadi di Indonesia yang didominasi oleh bencana banjir sebanyak 266 kejadian. Menilik ke belakang, periode 2010-2021 disebut sebagai 'dekade penuh bencana bagi Indonesia', yang puncaknya terjadi pada 2021, dengan jumlah hampir mencapai 5.402 kejadian bencana dimana bencana banjir masih mendominasi sebesar 1.794 kejadian. Kejadian bencana dalam rentang 10 tahun terakhir disajikan pada Gambar 1 dibawah ini :



Gambar 1 Tren Kejadian Bencana Banjir di Indonesia

(Sumber : dibi BNPB,2023)

Kota Makassar merupakan Ibukota dari Provinsi Sulawesi Selatan. Secara spasial Makassar memiliki wilayah berupa daratan, bukit, pantai dan laut dengan luas wilayah yang mencapai 175,77 Km². Kota Makassar juga mempunyai fungsi strategis lainnya yaitu pusat pengembangan utama di Kawasan Timur Indonesia (KTI) antara lain seperti : Pusat Pemerintahan, Pusat Perdagangan, Pusat

Pendidikan dan berbagai kegiatan yang melingkup kawasan yang lebih luas, maka dari itu dalam pengembangannya Kota Makassar memerlukan sebuah konsep yang dapat mengantisipasi berbagai masalah, baik dari sudut perkotaan maupun bidang lainnya yang berpotensi.

Setiap musim penghujan tiba, Kota Makassar dihadapkan dengan masalah adanya banjir. Kondisi fisik wilayah perkotaan yang cenderung datar serta kondisi drainase yang ada saat ini sepenuhnya belum berfungsi optimal sehingga setiap kali hujan mengguyur Kota Makassar lebih dari lima jam, sejumlah ruas jalan dan kompleks perumahan tergenang dan kebanjiran. Keadaan yang seperti ini sangat mengganggu perkembangan Kota Makassar, selain mengakibatkan kerugian secara materiil, banjir menimbulkan kesan ketidaknyamanan dan mengganggu aktivitas sehingga akan mengganggu pertumbuhan kota.

Sebagai catatan banjir-banjir yang telah meresahkan sebahagian besar warga Kota Makassar terjadi pada tahun 1976, 1978, 1989, 1992, 1993, 1998/1999 sedangkan yang tercatat cukup besar terjadi pada tahun 1976, 1986, 1998/1999 dengan curah hujan harian maksimum rata-rata sebesar 332 mm dan banjir tahun 2000 dengan curah hujan harian maksimum sebesar 302 mm pada tanggal 04 Februari 2000. Data historis kejadian bencana 10 tahun terakhir yang diperoleh dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana melalui website Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI) telah terjadi banjir di Kota Makassar pada tahun 2013, 2018, 2019, 2020, 2021, dan 2022.

Pada tahun 2019 telah selesai pembangunan Kolam Regulasi Nipa-Nipa memiliki luas 84 Ha dengan kapasitas tampung sebesar 2,74 juta m³ diharapkan mampu mereduksi banjir sebesar 153 m³/detik atau lebih rendah 45% dari debit banjir semula yang mencapai 482 m³/detik, sehingga diharapkan dapat mengurangi risiko banjir pada 6 kecamatan, yakni Patalassang, Moncongloe, Manggala, Panakukang, Tallo, dan Tamanlanrea. Namun kejadian banjir tetap terjadi meski telah dibangun kolam Regulasi Nipa-Nipa.

Data kejadian bencana banjir serta dampak yang ditimbulkan di Kota Makassar tahun 2009 sampai dengan tahun 2022 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kejadian Banjir Kota Makassar Tahun 2009 - 2022

No.	Lokasi			Waktu Terjadinya (Tgl/bln/thn)	Dampak Bencana/Kerugian			Genangan				Penyebab
	Kecamatan	Jumlah Desa/ Kelurahan	Kabupaten/ Kota		Penduduk (KK)	Lahan 1. Rumah 2. Irigasi 3. Perkebunan 4. Perikanan	Infrastruktur 1. Jalan 2. Jembatan 3. Kantor/Sarkes 4. Sekolah 5. Tanggul	Tinggi (m)	Luas (Ha)	Lamanya (Jam)	Frekuensi (/thn)	
1	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	02/01/1999 sd 03/01/1999	2500	1. Rumah (3275 Unit) 2. Irigasi (1250 Ha) 3. Perkebunan (250 Ha)	1. Jalan (55 km) 2. Jembatan (4Unit) 3. Sekolah (10 Unit) 4. Kantor/Sarkes (5 Unit) 5. Tanggul (1500 m)	0,3 - 1,5 m	782,82	1 x 24 jm	1x	Hujan deras Meluapnya Sungai
2	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	03/02/2000	2500	1. Rumah (3275 Unit) 2. Irigasi (1250 Ha) 3. Perkebunan (250 Ha)	1. Jalan (55 km) 2. Jembatan (4Unit) 3. Sekolah (10 Unit) 4. Kantor/Sarkes (5 Unit) 5. Tanggul (1500 m)	0,3 - 1,5 m	782,82	1 x 24 jm	1x	Hujan deras Meluapnya Sungai
3	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	05/01/2013 sd 06/01/2013	2414	1. Rumah (2461 Unit) 2. Irigasi (700 Ha) 3. Perkebunan (250 Ha)	1. Jalan (45 km) 2. Jembatan (2 Unit) 3. Sekolah (4 Unit) 4. Kantor/Sarkes (6 Unit) 5. Tanggul (200 m)	0,5 - 2 m	573,78	2 x 24 jm	2x	Hujan deras Meluapnya Sungai
4	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	21/12/2017	1500	1. Rumah (1650 Unit) 2. Irigasi (476 Ha) 3. Perkebunan (65 Ha)	1. Jalan (30 km) 2. Jembatan (2 Unit) 3. Sekolah (5 Unit) 4. Kantor/Sarkes (14Unit) 5. Tanggul (1300 m)	0,5 - 1,5 m	573,78	1 x 24 jm	2x	Hujan deras Meluapnya Sungai

Lanjutan Tabel 2. Kejadian Banjir Kota Makassar Tahun 2009 - 2022

5	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	13/03/2018 sd 14/03/2018	2500	1. Rumah (2750 Unit) 2. Irigasi (1575 Ha) 3. Perkebunan (715 Ha)	1. Jalan (30 km) 2. Jembatan (4 Unit) 3. Sekolah (8 Unit) 4. Kantor/Sarkes (5 Unit) 5. Tanggul (1300 m)	0,5 - 1,0 m	419,26	2 x 24 jm	2x	Hujan deras Meluapnya Sungai
6	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	21/01/2019 sd 23/01/2019	3500	1. Rumah (3275 Unit) 2. Irigasi (1750 Ha) 3. Perkebunan (550 Ha)	1. Jalan (75 km) 2. Jembatan (8 Unit) 3. Sekolah (15 Unit) 4. Kantor/Sarkes (10 Unit) 5. Tanggul (2500 m)	1,0 - 2,0 m	875,26	3 x 24 jm	1x	Hujan deras Meluapnya Sungai
7	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	18/12/2020	1780	1. Rumah (445 Unit) 2. Irigasi (250 Ha) 3. Perkebunan (250 Ha)	1. Jalan (25 km) 2. Jembatan (2 Unit) 3. Sekolah (5 Unit) 4. Kantor/Sarkes (5 Unit) 5. Tanggul (500 m)	0,5 - 1,0 m	212,4	1 x 24 jm	1x	Hujan deras Meluapnya Sungai
8	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	5/12/2021 sd 07/12/2021	3600	1. Rumah (2603 Unit) 2. Irigasi (1550 Ha) 3. Perkebunan (1450 Ha)	1. Jalan (85 km) 2. Jembatan (10 Unit) 3. Sekolah (20 Unit) 4. Kantor/Sarkes (105 Unit) 5. Tanggul (2750 m)	1,0 - 2,0 m	1085	3 x 24 jm	1x	Hujan deras Meluapnya Sungai
9	Manggala Tallo Tamalanrea Biringkanaya	2 1 4 2	Makassar	24-30/12/2022	7859	1. Rumah (3046 Unit) 2. Irigasi (1750 Ha) 3. Perkebunan (1550 Ha)	1. Jalan (75 km) 2. Jembatan (8 Unit) 3. Sekolah (15 Unit) 4. Kantor/Sarkes (10 Unit) 5. Tanggul (2500 m)	1,0 - 2,5 m	2260	7 x 24 jm	1x	Hujan deras Meluapnya Sungai

Sumber : BNPB , 2023

Bencana banjir pada musim hujan diprediksi masih terus berlangsung dengan dampak yang sulit dikendalikan meskipun telah dilakukan pembangunan pengendali banjir berupa waduk dan kolam retensi. Akurasi hasil prediksi puncak banjir mempunyai peran yang sangat penting dalam manajemen pengendalian banjir. Dalam proses alih dari ragam hujan menjadi aliran sungai (banjir), pada setiap fase perubahannya dipengaruhi berbagai faktor yang saling terkait. Beberapa faktor utama yang dimaksud meliputi: intensitas dan durasi hujan, bentuk DAS, kerapatan sistem drainase, topografi, tekstur dan kepadatan tanah, permukaan air tanah, dan kondisi penggunaan lahan (Asdak, 2002).

Menurut (Kustamar and Yulianti, 2009; Bitew *et al.*, 2019; Mazzoleni, Brandimarte and Amaranto, 2019) faktor-faktor yang berpengaruh antara lain dalam bentuk: intersepsi, evapotranspirasi, *infiltrasi*, limpasan permukaan, dan aliran air tanah. Oleh karena rumitnya proses alih dari ragam hujan menjadi aliran di sungai tersebut, maka untuk menganalisisnya diperlukan model. Model tersebut hendaknya berjenis konseptual-terdistribusi, untuk mengatasi kendala varian spasial: sebaran hujan, topografi, penggunaan lahan, bentuk dan ukuran DAS, serta kerapatan sistem drainase.

Model merupakan penyederhanaan sistem, yang hanya menggambarkan beberapa aspek dari suatu sistem dan tidak harus mencerminkan seluruh proses yang terjadi. Sistem hidrologi yang representatif selalu melibatkan dua sistem yang berbeda, yaitu sistem prototipe dan sistem model. Sistem prototipe merupakan sistem alam yang sesungguhnya, yang di dalam hidrologi dikenal sebagai DAS. Salah satu upaya dalam pendekatan sistem seringkali digunakan hidrologi praktis yang umumnya menggunakan pendekatan empiris, yaitu dengan melihat adanya hubungan korelasi antar parameter tanpa mencari penjelasan atas hukum fisika ataupun hubungan timbal balik antar parameter tersebut, yang dikenal sebagai *black box* (Chow, 1988).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memodelkan kejadian banjir dalam rangka pengendalian banjir, peringatan dini dan mitigasi bencana. Model prakiraan pada awalnya sering dikembangkan dari desain berbasis *offline*, seperti model hidrograf yang pertama kali dikembangkan oleh Sherman pada 1932 (Sene, 2015). Aliran hidrograf sungai lalu diperhitungkan dengan penjumlahan hal yang

berkorespondensi dengan distribusi sungai ditambah dengan input dari curah hujan. Pendekatan ini masih banyak digunakan dalam studi mengenai prakiraan banjir, sedangkan untuk penggunaan secara *real-time*, model berbasis *rainfall-runoff* sekarang umumnya lebih direkomendasikan. Sebagai contoh, salah satu pendekatan umum digunakan model hidrologi adalah mengintegrasikan besaran curah hujan dengan daerah aliran air yang ada (M Marasabessy, M S Pallu, 2020). Model tambahan biasanya dimasukkan untuk memberi detail lebih pada daerah sekitar aliran air.

Dalam studi mengenai prakiraan banjir, penting halnya untuk memprediksi dinamika inundasi berbasis *real-time* untuk menentukan proses evakuasi. Penelitian untuk prakiraan banjir banyak menggunakan berbagai model. Sayama dkk, (2015) melakukan pemodelan terhadap banjir pada Sungai Chao Phraya ketika terjadi banjir pada tahun 2011 dengan menerapkan model *Rainfall-Runoff Inundation* (RRI). Hasilnya, ketika dibandingkan dengan peta banjir berbasis satelit, simulasi tanggap darurat yang dilakukan mampu menangkap puncak ketika terjadi banjir pada saat pertengahan Oktober. Hasil simulasi dikonfirmasi positif dengan status banjir yang sebenarnya ketika terjadi hingga akhir November. Menggunakan metode dan model yang sama, sebelumnya (Sayama *et al.*, 2012b) telah mensimulasikan terjadinya banjir di Kabul, Pakistan pada bulan Juli dan Agustus tahun 2010. Simulasi dan penginderaan jauh menunjukkan hasil yang cukup baik terhadap wilayah maksimum terdampak banjir di sepanjang Sungai Kabul dan Swat. Meskipun menunjukkan hasil yang kurang baik terhadap area kecil sekitar anak sungai, simulasi ini dapat menjadi informasi tambahan untuk respon tanggap darurat.

Struktur model berbasis *rainfall-runoff* ditentukan oleh kompleksitas persamaan yang digunakan untuk menghitung limpasan. Proses spasial dalam model ditentukan oleh bagaimana daerah tangkapan air diinterpretasikan (EPA, U.S., ORD, 2017). Penerapan model RRI di Indonesia juga pernah dilakukan oleh (Nastiti *et al.*, 2015) pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum serta beberapa lokasi lainnya oleh (Pramudhian Firdaus, 2019; Ardiansyah *et al.*, 2021; Perdana, Rendi; Nurrochman, 2022; Fikri, 2023; Ikhwalı *et al.*, 2023; Sihombing *et al.*, 2023). Nastiti menggunakan data masukan dari satelit GSMaP dan data 6 titik

observasi penakar hujan yang secara spasial diinterpolasikan menggunakan Metode *Inverse Distance Square* (IDWS). Penelitian Nastiti dkk., menghasilkan model yang menunjukkan daerah genangan simulasi yang baik dengan perbandingan peta inundasi yang disediakan sebelumnya oleh Tim *Upper Citarum Basin Flood Management* (UCBFM).

Sejauh ini penelitian menggunakan RRI yang dikembangkan oleh Sayama dan beberapa penelitian yang menggunakan Model RRI masih terbatas pada pemanfaatan data satelit dan observasi yang ada. Disisi lain seperti dijelaskan oleh (MOE *et al.*, 2016) penggunaan data curah hujan dari radar cuaca dapat menghasilkan pemodelan inundasi. Disamping itu, secara temporal kualitas data observasi curah hujan berbasis *ground gauged* di Indonesia masih terbatas, maka penggunaan radar cuaca dapat menjadi salah satu alternatif untuk pemodelan banjir dalam rangka peringatan dini banjir.

Pemanfaatan penginderaan jauh radar cuaca dalam prakiraan banjir diharapkan menjadi salah satu terobosan baru dalam *early warning system* yang saat ini sedang giat dilakukan oleh berbagai kalangan salah satunya dalam bidang meteorologi. Data curah hujan yang menjadi salah satu faktor utama terjadinya banjir dapat terekam baik lalu dapat digunakan sebagai proyeksi pada waktu yang akan datang. Oleh karena itu diperlukan penelitian mengenai pemodelan prakiraan tinggi inundasi secara *real-time* berbasis data curah hujan yang ada, sehingga menghasilkan prakiraan yang baik terhadap daerah yang sering dilanda banjir seperti halnya di kota Makassar.

Pada penelitian ini akan disimulasikan kejadian genangan di kawasan yang rentan terjadi banjir khususnya pada DAS Tallo dan sekitarnya menggunakan model RRI dengan input data dari CH radar cuaca dan menggabungkan beberapa CH dari satelit maupun *rain-gauge*. Hal ini merupakan suatu terobosan yang baru dimana pada konsep dasar Model RRI yang telah dikembangkan sebelumnya masih menggunakan salah satu input data CH dari satelit GSMaP atau data *rain-gauge* di lapangan. Percobaan menggunakan data curah hujan yang berasal dari data radar dimanfaatkan sebagai bentuk respon cepat untuk mensimulasikan prakiraan genangan atau inundasi yang akan datang mengingat kondisi atmosfer maupun permukaan yang sangat dinamis dari waktu ke waktu.

Berdasarkan maksud tersebut maka dipikirkan suatu ide tentang model hidrologi untuk menggambarkan prakiraan genangan dengan **menggabungkan input CH (*rainfall*) dari radar, satelit dan *rain-gauge* pengukuran langsung, pendekatan model menggunakan data *real time*, mengintegrasikan besaran curah hujan dengan daerah aliran air yang ada**. Konsep pikir dari penelitian simulasi model ini mampu menghasilkan prakiraan banjir lebih baik dengan tinggi genangan dan sebaran banjirnya (inundasi).

Penelitian ini diharapkan dapat menggambarkan prakiraan genangan di Kota Makassar untuk dijadikan suatu rujukan baik bagi pemerintah maupun masyarakat luas dalam memberikan peringatan dini terjadinya bencana banjir. Dengan demikian, korban akibat bencana banjir di masa yang akan datang baik nyawa, moril, maupun materil dapat terminimalisir.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, dalam tulisan ini akan mensimulasikan limpasan curah hujan dan genangan banjir secara bersamaan dengan menerapkan Model Numerik RRI (*Rainfall-Runoff Inundation*), dengan rumusan masalah yang akan dikaji adalah :

1. Bagaimana akurasi input curah hujan yang berbeda (AWS/ARG, GSMaP, GPM IMERG, Radar) dalam model RRI.
2. Bagaimana menggambarkan tinggi inundasi (genangan) dengan menggunakan Model RRI.
3. Bagaimana sebaran spasial dan genangan akibat luapan sungai di Daerah Aliran Sungai (DAS Tallo) dengan Model RRI.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan penelitian dalam tulisan ini adalah:

1. Menghasilkan akurasi input curah hujan yang berbeda (AWS/ARG, GSMaP, GPM IMERG, Radar) dalam model RRI.
2. Mendapatkan tinggi inundasi dengan menggunakan Model RRI.

3. Mendapatkan sebaran spasial dan genangan akibat luapan sungai di Daerah Aliran Sungai (DAS Tallo) dengan Model RRI.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian dalam tulisan ini adalah :

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan model hidrologi dengan menggunakan beberapa input data hujan yang berbeda yang sejauh ini belum pernah dikembangkan di Indonesia.
2. Hasil penelitian menjadi tambahan alternatif dalam pemodelan genangan dengan menggunakan pengamatan secara *real-time* yang tersedia memberi kesempatan untuk memperbarui keluaran model sehingga prakiraan menjadi lebih dekat dengan nilai yang teramati.
3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pedoman dan pendekatan teknis perencanaan bilamana model ini menjadi pilihan aplikatif di suatu lokasi yang mengalami masalah genangan (inundasi).
4. Hasil penelitian dapat menjadi acuan dalam memberikan prakiraan terjadinya genangan dengan berbasis Model RRI sehingga dampak dari genangan yang terjadi dapat menurunkan angka kerugian maupun korban pada pemerintah dan masyarakat.

1.5 Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian dalam tulisan ini adalah sebagai berikut :

1. Model mengasumsikan bahwa kemiringan dan sungai berada pada *grid cell* yang sama.
2. Aliran pada kemiringan *grid cell* dikalkulasikan dengan model gelombang difusi 2D.
3. Aliran dari saluran sungai dihitung dengan model gelombang difusi 1D.
4. Model RRI juga mensimulasikan aliran bawah permukaan, aliran *infiltrasi* vertikal, dan aliran permukaan.

1.6 Kebaruan/Novelti

Kebaruan penelitian ini diidentifikasi berdasarkan metode dan luaran penelitian. Potensi kebaruan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Luaran pertama dalam penelitian ini adalah didapatkannya skala faktor dan rumus regresi berganda hubungan antara data hujan terukur (Obs) AWS/ARG terhadap data hujan satelit GSMap, GPM dan data Radar.
2. Luaran kedua dalam penelitian ini adalah model spasial tinggi genangan (peil banjir) pada kawasan yang rawan banjir sehingga dapat dijadikan rujukan untuk pengembangan kawasan bebas banjir di DAS Tallo.
3. Luaran ketiga dalam penelitian ini adalah model spasial sebaran genangan di DAS Tallo dengan menggunakan RRI.

1.7 Penelitian Terdahulu

Pada bab ini diberikan gambaran beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan dalam model hidrologi untuk analisis genangan dan banjir. Beberapa penelitian terdahulu disajikan dalam bentuk matriks terlihat pada Tabel 2.

Tabel 3. Matriks Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
1	M. azzolenia,b,*, L. Brandimartec, A. Amaranatod	Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling	Journal of Hydrology 578 (2019) 124076	<ul style="list-style-type: none"> • Ketersediaan satelit-diambil produk presipitasi sebagai alternatif sumber input pemodelan data hidrologi 	<ul style="list-style-type: none"> • Model hidrologi terdistribusi dikalibrasi untuk 18 set data curah hujan untuk masing-masing dari 8 DAS, 144 set optimal parameter model perturbasi dihitung • Model hidrologi dikalibrasi dan divalidasi oleh Global Runoff Data Center (GRDC) • Hasil Validasi Model sebagai <i>outlet</i> tampungan PERSIANN adalah dataset yang memberikan variabilitas tertinggi tetapi overestimate curah hujan yang diamati 	<ul style="list-style-type: none"> • Kajian Hidrologi berdasarkan data hujan • Melakukan Validasi data dengan Numerik 	<ul style="list-style-type: none"> • Rencana Kajian menggunakan DAS sungai berdasarkan kejadian banjir terbesar yang pernah terjadi • Pemodelan numeric yang direncanakan menggunakan software IRIC

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
2	R.Rodríguez-Alarcóna,S.Lozano	A complex network analysis of Spanish river basins	Journal of Hydrology 578 (2019) 124065	<ul style="list-style-type: none"> - Interbasin Transfer (IBT) - Metrik CNA membagi Spanish River Basin System menjadi dua tipe. 	<ul style="list-style-type: none"> • Jaringan DAS Spanyol memiliki 15 node dan 14 arc • Karakterisasi CNA mengukur efisiensi jaringan. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kajian berdasarkan wilayah DAS • Karakteristik Hidrologi menjadi kajian utama 	<ul style="list-style-type: none"> • Tinjauan penelitian tidak melakukan kajian terhadap hubungan tiap DAS • DAS yang digunakan yang telah memiliki TMA
3	Sheng Wang, Heng Wang	Extending the Rational Method for assessing and developing sustainable urban drainage systems	<i>Water Research (Elsevier) Vol.144 (2018) 112-125</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode Rational • Maximum runoff 	<ul style="list-style-type: none"> • RMP memiliki tiga keunggulan: (1) memberikan respon terpadu dari seluruh DAS dengan kontrol limpasan; (2) menginterpretasikan efek pengendalian limpasan dengan memplot laju aliran limpasan-durasi curah hujan kurva; (3) menghubungkan desain kontrol limpasan dan badai yang didasarkan pada 	<ul style="list-style-type: none"> • Kejadian Banjir terbesar 	<ul style="list-style-type: none"> • Metode Hidrograf Banjir

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					desain yang berbeda prinsip dan statistik curah hujan		
4	Ettema R, Bektur-Idil	A surface runoff mapping method for optimizing risk assessment	Safety Science (Elsevier) Water Research Vol.144 (2018) 112-125	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil studi kasus menunjukkan bahwa kontrol limpasan mengurangi laju aliran puncak sebesar 5,83-91,6%, sesuai dengan faktor pengurangan untuk periode ulang laju aliran maksimum dari 0,04-0,76. 	<ul style="list-style-type: none"> • Metode IRIP Indicator of Intense Pluvial Runoff memetakan kerentanan limpasan permukaan. • Peta limpasan permukaan membuka peluang baru untuk mendorong proses saat ini. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengamatan limpasan permukaan 	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak menggunakan pemetaan (GIS)
5	Shumaila J. Bhatti; Charles N. Kroll, Ph.D., P.E.; and Richard M. Vogel, Ph.D., M.ASCE	Revisiting the Probability Distribution of Low Streamflow Series in the United States	Journal Hydrology (ASCE) 2019 24(10): 04019043	<ul style="list-style-type: none"> • Karakterisasi kekeringan hidrologi meningkatkan prediksi statistik aliran sungai yang penting untuk berbagai aplikasi sumber daya air. L- 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukur aliran dengan dan tanpa aliran nol diidentifikasi, dan penggunaan transformasi terbalik aliran rendah bukan nol dan penyensoran kedua 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan analisa statistic dengan beberapa metode misalkan metode log person, log normal 	<ul style="list-style-type: none"> • Pada riset yang akan dilakukan tidak menganalisis debit andalan

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				<p>momen digunakan untuk menguji kesesuaian distribusi probabilitas 3-parameter yang dipilih untuk seri aliran aliran rendah di 704 sungai terukur yang tidak diatur di Amerika Serikat yang berdekatan.</p>	<p>ujung distribusi dieksplorasi. Secara keseluruhan, log-Pearson tipe III (LP3), lognormal 3-parameter (LN3), dan Pearson tipe III (PE3) semuanya tampaknya merupakan distribusi yang dapat diterima untuk menggambarkan seri aliran aliran rendah di Amerika Serikat pada lokasi tanpa aliran rendah nol. Untuk aliran terbalik, distribusi Generalized Extreme Value (GEV) juga bekerja dengan baik, sementara penyensoran tidak meningkatkan kemampuan</p>		

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					untuk membedakan antara distribusi		
6	Menberu Meles Bitew, Ph.D., P.E., M.ASCE; David C. Goodrich, Ph.D., P.E., M.ASCE; Eleonora Demaria, Ph.D.; Philip Heilman, Ph.D.; Mary Nichols, Ph.D., P.E.; Lainie Levick; Carl L. Unkrich; and Mark Kautz	Multiparameter Regression Modeling for Improving Quality of Measured Rainfall and Runoff Data in Densely Instrumented Watersheds	J. Hydrol. Eng., 2019, 24(10): 04019036 (ASCE)	<ul style="list-style-type: none"> DAS Eksperimental Walnut Gulch adalah DAS eksperimental semi-kering dan situs penelitian agro-ekosistem (LTAR) jangka panjang yang dikelola oleh Pusat Penelitian DAS Barat Daya USDA-Agricultural Research Services (ARS) dengan resolusi tinggi, data hidroklimatik jangka panjang tersedia di seluruh area drainase seluas 149 km². Kontrol kualitas dan jaminan 	<ul style="list-style-type: none"> Sebuah model regresi berganda dikembangkan untuk menghubungkan curah hujan, sifat DAS, dan kondisi anteseden terhadap karakteristik limpasan di 12 subDAS dengan luasan mulai dari 0,002–94 km². Sebuah model regresi dikembangkan berdasarkan 18 variabel prediktor, yang menghasilkan limpasan diprediksi dengan koefisien korelasi berkisar antara 0,4-0,94 dan koefisien efisiensi Nash hingga 0,76. Model memprediksi 92% peristiwa limpasan dan 86% peristiwa 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan variasi DAS Dengan luasan DAS yang berbeda-beda 	<ul style="list-style-type: none"> Tidak menggunakan pemodelan numerik

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				<p>kualitas dari kumpulan data yang sangat besar merupakan tantangan utama. Kami menyajikan analisis kumpulan data selama 50 tahun untuk mengembangkan strategi untuk mengidentifikasi kesalahan dan ketidakkonsistenan dalam database curah hujan dan limpasan historis.</p>	<p>tanpa limpasan. Pendekatan pemodelan adalah pelengkap untuk prosedur jaminan kualitas dan kontrol kualitas (QAQC) yang ada dan menyediakan metode khusus untuk memastikan bahwa data curah hujan dan limpasan dalam database DAS Eksperimental Walnut Gulch USDA-ARS konsisten dan mengandung kesalahan minimal. Model ini memiliki potensi untuk membuat prediksi limpasan di lingkungan hidroklimatik yang serupa dengan observasi beresolusi tinggi yang tersedia..</p>		

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
7	David A. Chin, F	Effect of Return Period on Normalized Rainfall Distributions in the United States	J. Hydrol. Eng., 2018, 23(11): 04018046 ASCE	<ul style="list-style-type: none"> • Asumsi bahwa distribusi curah hujan 24 jam yang dinormalisasi tidak bergantung pada periode ulang diselidiki. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa asumsi ini dibenarkan di wilayah pedalaman Amerika Serikat bagian timur, tetapi di bagian negara lain, terutama negara bagian pantai timur dan Amerika Serikat bagian barat, asumsi tersebut dapat menyebabkan kesalahan hingga 20% dalam jumlah curah hujan dalam berbagai interval 	<ul style="list-style-type: none"> • Kesalahan terbesar terjadi untuk interval waktu yang pendek dan untuk periode ulang yang sangat berbeda dari periode ulang yang digunakan untuk menurunkan distribusi curah hujan ternormalisasi. Kehati-hatian harus dilakukan saat menerapkan distribusi curah hujan 24 jam Layanan Konservasi Sumber Daya Alam (NRCS) regional, yang didasarkan pada periode ulang 25 tahun, ke daerah tangkapan pada periode ulang yang lebih rendah, seperti 1–10 tahun, dengan waktu 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan data hujan dengan waktu pengamatan minimal 10 tahun 	<ul style="list-style-type: none"> • Hanya terbatas pada periode ulang intensitas hujan tidak mengamati banjir

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				waktu dalam acara 24 jam..	konsentrasi kurang dari 3 jam.		
8	O. Cortier, Ph.D.; M. Boutouil, Ph.D.; and O. Maquaire, Ph.D.	Physical Model of Hydrological Behavior of Permeable Pavements Using FlexPDE	J. Hydrol. Eng., 2019, 24(10): 04019035 ASCE	<ul style="list-style-type: none"> Peningkatan urbanisasi yang dikombinasikan dengan peningkatan permukaan kedap air telah menyebabkan peningkatan frekuensi kejadian banjir di daerah tangkapan air perkotaan. Konteks ini menyoroti ketidakcukupan sistem drainase perkotaan tradisional dan perlunya solusi alternatif. Trotoar permeabel telah terbukti menjadi teknik pembangunan berdampak rendah (LID) yang berharga. Mereka 	<ul style="list-style-type: none"> Kekhasan model persamaan diferensial parsial (PDE) ini adalah mendasarkan estimasi parameter pada pengukuran dasar. Model dikalibrasi dan divalidasi menggunakan pengukuran dari rig perkerasan permeabel laboratorium. Hasil menunjukkan keandalan model yang tinggi dengan nilai efisiensi model Nash-Sutcliffe (NSE) masing-masing sebesar 0,969 dan 0,891, untuk kalibrasi dan validasi. Terakhir, analisis sensitivitas dilakukan dan 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan kalibrasi dengan pemodelan numerik 	<ul style="list-style-type: none"> Pada jurnal ini menggunakan model fisik, sedangkan untuk rencana riset menggunakan model das berdasarkan kondisi real di lapangan

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				<p>mampu mempertahankan volume limpasan permukaan dengan meningkatkan proses <i>infiltrasi</i> dan penguapan. Meskipun manfaatnya sudah diketahui dengan baik, kurangnya alat pemodelan yang memadai membatasi pengadopsiannya. Makalah ini menyajikan pengembangan model berbasis fisik untuk menggambarkan perilaku hidrologi mereka.</p>	<p>menyoroti pengaruh konduktivitas hidrolik lapisan dasar terhadap kinerja struktur.</p>		

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
9	Nicholas R. Grieco ¹ ; Jeffrey D. Niemann, Ph.D., M.ASCE; Timothy R. Green, Ph.D.; Andrew S. Jones, Ph.D.; and Peter J. Grazaitis	Hydrologic Downscaling of Soil Moisture Using Global Data Sets without Site-Specific Calibration	J. Hydrol. Eng., 2018, 23(11): 04018048 ASCE	<ul style="list-style-type: none"> Banyak aplikasi memerlukan pola kelembaban tanah beresolusi halus (10–30m), tetapi sebagian besar penginderaan jauh satelit dan model permukaan tanah memberikan estimasi kelembaban tanah beresolusi kasar (9–60 km). Model Equilibrium Moisture from Topography, Vegetation, and Soil (EMT_pVS) menurunkan skala kelembaban tanah menggunakan data topografi, vegetasi, dan tanah beresolusi halus, 	<ul style="list-style-type: none"> Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja model EMT_pVS ketika parameter diestimasi dari kumpulan data global alih-alih kalibrasi spesifik lokasi. Metode dikembangkan untuk memperkirakan parameter kunci dari kumpulan data, dan model global (tanpa kalibrasi spesifik lokasi) diterapkan pada enam situs studi. Hasil model global dibandingkan dengan hasil model yang dikalibrasi secara lokal dan pengamatan kelembaban tanah in situ. Penggunaan kumpulan data global menurunkan kinerja 	<ul style="list-style-type: none"> Estimasi data hidrologi 	<ul style="list-style-type: none"> Tidak menggunakan data mekanika tanah.

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				<p>tetapi memerlukan spesifikasi 16 parameter. Pada aplikasi sebelumnya, parameter telah dikalibrasi menggunakan data kelembaban tanah in situ yang terperinci, tetapi sangat sedikit daerah yang memiliki data seperti itu.</p>	<p>penskalaan EMT βVS dan mengurangi variabilitas spasial dalam pola kelembaban tanah beresolusi halus. Namun, secara keseluruhan, model global memberikan perkiraan kelembaban tanah yang lebih andal daripada hanya menggunakan kelembaban beresolusi kasar</p>		
10	K.C Abbaspour; S. Vaghevi, H. Yang	A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model	Journal of Hydrology , Elsevier, 2015 Page 733 - 752	<p>Dalam penelitian ini kami membangun dan mengkalibrasi model hidrologi terpadu Eropa menggunakan program Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Berbagai komponen sumber daya air</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan model sumber daya air beresolusi tinggi berskala besar memungkinkan pemeriksaan yang konsisten dan komprehensif terhadap perilaku sistem terintegrasi melalui simulasi berbasis data berbasis fisik. Pada 	<ul style="list-style-type: none"> • Melakukan kajian Hidrologi 	<p>Tidak menggunakan pemodelan numerik</p>

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				<p>disimulasikan dan hasil panen serta kualitas air dipertimbangkan pada tingkat Hydrological Response Unit (HRU). Sumber daya air dihitung pada tingkat subbasin dengan interval waktu bulanan. Pencucian nitrat ke dalam air tanah juga disimulasikan pada tingkat spasial yang lebih halus (HRU).</p>	<p>artikel ini kita membahas masalah ketersediaan data, kalibrasi model terdistribusi skala besar, dan garis besar prosedur untuk kalibrasi model dan analisis ketidakpastian. Model dan hasil yang dikalibrasi memberikan dukungan informasi kepada Pedoman Kerangka Kerja Air Eropa dan meletakkan dasar untuk penilaian lebih lanjut tentang dampak perubahan iklim terhadap ketersediaan dan kualitas air. Pendekatan dan metode yang dikembangkan bersifat umum dan dapat diterapkan</p>		

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					di wilayah besar mana pun di seluruh dunia.		
11	Sayama T, Fukami K, Tanaka S, Takeuchi K	Rainfall-runoff-inundation analysis for flood risk assessment at the regional scale. Proceedings of the Fifth Conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources (APHW)	Proceedings of the Fifth Conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources (APHW), 2010	Rainfall-runoff-inundation analysis	<ul style="list-style-type: none"> Flood risk assessment 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan software RRI 	Belum menggunakan data hidrologi secara komprehensif, mulai data hujan pencatatan langsung, data satelit dan data pengukuran langsung.
12	Sayama, Takahiro Ozawa, Go Kawakami, Takahiro Nabesaka, Seishi Fukami, Kazuhiko	Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of the 2010 Pakistan Flood in the Kabul River Basin	Hydrological Sciences Journal, 2012	Studi ini menganalisis curah hujan-limpasan dan genangan di DAS Kabul dengan model baru yang dikembangkan yang mensimulasikan proses	<ul style="list-style-type: none"> Hasil simulasi menunjukkan kesesuaian yang baik dengan peta genangan yang dihasilkan berdasarkan MODIS untuk banjir sungai skala besar. Selain itu, 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan software RRI 	Belum menggunakan data hidrologi secara komprehensif, mulai data hujan pencatatan langsung, data satelit

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				curah hujan-limpasan dan genangan secara bersamaan berdasarkan persamaan gelombang difusi dua dimensi.	simulasi mengidentifikasi daerah yang terkena dampak banjir bandang yang dipastikan rusak parah berdasarkan peta sebaran kerusakan rumah. Karena model ini dirancang untuk digunakan bahkan segera setelah bencana, model ini dapat menjadi alat yang berguna untuk menganalisis banjir berskala besar dan memberikan informasi tambahan kepada badan-badan untuk operasi bantuan.		dan data pengukuran langsung.
13	Sayama, T. Tatebe, Y. Iwami, Y. Tanaka, S.	Hydrologic sensitivity of flood runoff and inundation: 2011	Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015	Untuk mendiagnosa karakteristik bahaya banjir studi ini menganalisis sensitivitas hidrologi	<ul style="list-style-type: none"> Studi ini menyoroti pentingnya kuantifikasi sensitivitas untuk pemahaman yang lebih baik 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan software RRI 	Belum menggunakan data hidrologi secara komprehensif, mulai data hujan pencatatan

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
		Thailand floods in the Chao Phraya River basin		limpasan banjir dan genangan terhadap curah hujan. Motivasinya adalah untuk membahas mengapa curah hujan muson yang tampaknya tidak signifikan, atau curah hujan 1,2 kali lebih banyak daripada banjir besar di masa lalu, termasuk yang terjadi pada tahun 1995 dan 2006, mengakibatkan banjir yang begitu dahsyat.	tentang karakteristik bahaya banjir; simulasi curah hujan-limpasan-genangan di seluruh DAS yang disajikan merupakan pendekatan yang efektif untuk menganalisis sensitivitas limpasan banjir dan genangan pada skala DAS.		langsung, data satelit dan data pengukuran langsung.
14	Pramudhian Firdaus	Pemanfaatan Penginderaan Jauh untuk Prakiraan Banjir berbasis Rainfall Runoff Inundation Model di DAS	Perpustakaan Sekolah Tinggi meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2019	Model RRI di DAS Tallo	• Model RRI di DAS Tallo	• Menggunakan software RRI	Belum menggunakan data hidrologi secara komprehensif, mulai data hujan pencatatan langsung, data satelit dan data pengukuran langsung.

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
		Tallo dan Sekitarnya					
15	Westi Susi Aysa, Ir. Rachmad Jayadi, M.Eng., Ph.D. dan Prof. Dr. Ir. Fatchan Nurrochmad, M.Agr.	Kajian Peta Rawan Banjir menggunakan Rainfall-Runoff Inundation Pada Daerah Aliran Sungai Wanggu, Provinsi Sulawesi	etd.repository.ugm.ac.id , 2020	Penelitian ini fokus pada bagian dari upaya secara non-struktural yakni pemetaan area rawan banjir. Peta rawan banjir yang memuat informasi area dan kedalaman genangan merupakan salah satu bagian penting yang diperlukan untuk mitigasi bencana banjir.	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil analisis terdiri dari debit banjir, sebaran area genangan dan kedalaman genangan. Beberapa data yang digunakan yakni data hujan, topografi (DEM), jenis tanah dan land use dengan resolusi spasial 30 x 30 meter. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan software RRI 	Belum menggunakan data hidrologi secara komprehensif, mulai data hujan pencatatan langsung, data satelit dan data pengukuran langsung.
16	Hamid, Abdul Habib, Al Firdaus, Pramudhian	Analisis Kondisi Fisis Atmosfer Ketika Banjir Bandang dan Prediksi Banjir Menggunakan Model Rainfall	rosiding Seminar Nasional Pendidikan Geografi Uhamka Tahun 2020	Prakiraan dini mengenai banjir dapat dilakukan menggunakan perhitungan secara numerik hubungan antara curah hujan karena faktor meteorologi dengan runoff di permukaan. Oleh	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil analisis kondisi atmosfer menunjukkan adanya siklon tropis Lorna (pusat tekanan rendah), konvergensi massa udara dan nilai kelembapan udara yang tinggi yang memicu 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan software RRI 	Belum menggunakan data hidrologi secara komprehensif, mulai data hujan pencatatan langsung, data satelit dan data pengukuran langsung.

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
		Runoff Inundation di Wilayah Jabodetabek		karena itu, penelitian ini menggunakan model RRI untuk menyimulasikan prediksi banjir di wilayah Jabodetabek.	pertumbuhan awan konvektif di wilayah penelitian. Simulasi model RRI menunjukkan mulai adanya peningkatan inundasi dari hulu (Bogor) ke hilir pada tanggal 25 April 2019 pukul 18.00 WIB dengan ketinggian 0 – 0.5 meter. Kemudian pada tanggal 26 April 2019 pukul 06.00 WIB menunjukkan peningkatan inundasi dengan ketinggian 1-3 meter di daerah Depok, Makassar timur dan Makassar Selatan		
17	Arlis, Angga Putra	Pengembangan Peta Bahaya Banjir Dengan Menggunakan	Perpustakaan Digital ITB, 2021	Kabupaten Lima Puluh Kota dilanda banjir hampir setiap tahun. Banjir dipicu oleh intensitas hujan yang	<ul style="list-style-type: none"> Pada kajian ini. pemodelan genangan banjir akan disimulasikan dengan Rainfall- Runoff-Inundation 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan software RRI 	Belum menggunakan data hidrologi secara komprehensif, mulai data hujan pencatatan

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
		Rainfall-Runoff-Inundation (Rri) Model Di Kabupaten Lima Puluh Kota Provinsi Sumatera Barat		tinggi. Hal ini menyebabkan terjadinya genangan di area pemukiman, area pertanian, area perkebunan dan fasilitas umum di beberapa wilayah Kabupaten Lima Puluh Kota. Melihat cakupan banjir yang cukup luas, diperlukan pemetaan bahaya banjir untuk mengklasifikasikan zona bahaya banjir sesuai tingkatannya agar penanganan banjir selanjutnya dapat diimplementasikan secara efektif.	(RRI) Model. Model ini dapat mensimulasikan aliran ID dan 2D dengan metode fully-distributed secara bersamaan, aliran ID pada grid sungai dan aliran 2D pada grid slope. Kejadian banjir yang akan disimulasikan adalah banjir pada tanggal 20 Desember 2019 di Sub-DAS Balang Sinamar. Input data untuk melakukan simulasi di RRI Model pada kajian ini adalah data topografi dari DEMNAS yang resolusi gridnya telah diperbesar menjadi 58m x 58m.		langsung, data satelit dan data pengukuran langsung.

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
18	Feri Fadlin dkk	Pemodelan Spasial Untuk Pengurangan Resiko Banjir Pada DAS Wanggu Kota Kendari	Design Engineering , 2022	Kalkulasi risiko bencana banjir dapat dilakukan dengan pemodelan spasial dengan pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG). Langkah langkah yang dilakukan dalam penilaian risiko adalah dengan mengkaji tingkat bahaya (hazard), tingkat kerentanan (vulnerability) dan kapasitas adaptasi (capacity) dalam mengurangi risiko bencana. Untuk memperoleh model spasial yang akurat, maka dibutuhkan teknik akuisisi data yang baik sehingga dapat diperoleh data	<ul style="list-style-type: none"> Model spasial hidrologi berdasarkan karakteristik DAS menunjukkan nilai koefisien resesi yang sesuai dengan karakteristik DAS Wanggu adalah 0,95 dengan kemampuan prediksi inflow berdasarkan parameter statistik menunjukkan performa yang baik dengan nilai NSE 0,72 dan berdasarkan parameter nilai PBIAS termasuk kategori sangat baik dengan nilai 0,17%. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa terjadi luapan pada pertemuan Sungai Wanggu 	<ul style="list-style-type: none"> Model spasial hidrologi yang dihasilkan merupakan model Rainfall Runoff Model yang juga dapat digunakan untuk memprediksi besarnya debit berdasarkan data prakiraan cuaca dalam bentuk data hujan satelit yang dikeluarkan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan Data Satelit 	Model Simulasi menggunakan RRI dimana telah menggabungkan antara model spasial hidrologi dan hidrolika.

Lanjutan Tabel 2. Matriks Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
				dengan tingkat akurasi dan presisi yang tinggi. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan teknologi UAV yang sedang berkembang saat ini untuk memperoleh data situasi, topografi dan juga tata guna lahan pada daerah daerah yang rawan bencana.	dan Sungai lepo-lepo pada saat debit sungai mencapai 166,03 m ³ /detik. Data ini menunjukkan bahwa kapasitas sungai pada lokasi pertemuan Sungai yang merupakan titik banjir dengan frekuensi tinggi (setiap tahun) memiliki kapasitas tampung debit sebesar 166,03 m ³ /detik.		
19	Zulvyah Faisal, MS. Pallu, F Maricar, Mukhsan Hatta, 2022				<ul style="list-style-type: none"> Mendapatkan sebaran spasial dan sebaran banjir akibat hujan di Daerah Aliran Sungai (DAS Tallo) dengan Model RRI 	<ul style="list-style-type: none"> Lokasi penelitian dilakukan pada DAS Tallo yang mengalami dampak banjir. Inputan data real time berdasarkan data CH (AWS/ARG, GSMaP, TRMM, Persiann-CDR, Radar) Penentuan peil banjir kawasan rawan banjir Model spasial sebaran banjir DAS Tallo 	

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

2.1.1 Limpasan

Pengertian Limpasan Permukaan di dalam bahasa Inggris dikenal sebagai *run off* yang berarti bagian air hujan yang mengalir ke sungai atau saluran, danau atau laut berupa aliran di atas permukaan atau aliran di bawah permukaan. Akan tetapi di dalam hidrologi istilah *run off* dipergunakan untuk aliran di permukaan bumi bukan aliran di bawah permukaan. Dalam pengertian ini *run off* dapat berarti aliran di atas permukaan tanah sebelum air itu sampai ke dalam saluran atau sungai, dan aliran air di dalam sungai, sehingga limpasan permukaan didefinisikan air yang jatuh langsung (hujan) di permukaan bumi. Bagian dari air tersebut yang sampai ke permukaan akan mengalir di permukaan atau masuk dalam tanah. Air yang mengalir di permukaan tanah disebut aliran permukaan. (Arsyad, 1989)

Menurut (Rahim, 2000), limpasan permukaan sebagian dari air hujan yang mengalir di atas permukaan tanah. Limpasan permukaan adalah air yang mencapai sungai tanpa mencapai permukaan air tanah, yakni curah hujan yang dikurangi sebagian dari besarnya *infiltrasi*. Besarnya air yang tertahan dan besarnya genangan (Sosrodarsono Suyono, 1993). Menurut Asdak (2002), limpasan permukaan (*run off*) adalah bagian dari curah hujan yang mengalir di atas permukaan tanah menuju ke sungai, danau atau lautan.

Limpasan permukaan berlangsung ketika jumlah curah hujan melampaui *infiltrasi* air ke dalam tanah. Jumlah air yang menjadi limpasan ini sangat bergantung kepada jumlah air hujan persatuan waktu (intensitas), keadaan penutup tanah, topografi (terutama kemiringan lereng), jenis tanah dan ada atau tidaknya hujan yang terjadi sebelumnya (kadar air tanah sebelum terjadinya hujan).

Pada waktu terjadinya hujan, butir-butir air hujan dengan gaya kinetiknya menimpa tanah (terutama tanah-tanah gundul) dan memecahkan bongkah-bongkah tanah atau agregat-agregat tanah menjadi partikel-partikel yang lebih kecil. Partikel-partikel tersebut mengikuti *infiltrasi* lalu menyumbat pori tanah. Akibatnya apabila hujan semakin lebat atau berlangsung lebih lama maka akan terbentuklah limpasan permukaan dengan jumlah dan kecepatan tertentu.

Sifat-sifat aliran permukaan :

- a. Jumlah aliran permukaan, yaitu jumlah air yang mengalir dipermukaan tanah untuk suatu masa hujan atau masa tertentu dinyatakan dalam tinggi air (mm atau cm) atau volume air (meter kubik).
- b. Laju aliran permukaan, yaitu jumlah atau volume air yang mengalir melalui suatu titik per detik atau per jam, dinyatakan dalam m^3 per detik atau m^3 per jam. Laju aliran permukaan dikenal juga dengan istilah debit. Besarnya debit ditentukan oleh luas penampang air dan kecepatan alirannya, yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$Q = A V \quad (1)$$

Dimana :

Q = debit air (m^3 /detik)

A = luas penampang air (m^2)

V = kecepatan air melalui penampang tersebut (m/detik)

- c. Kecepatan aliran, kecepatan aliran permukaan dipengaruhi oleh dalamnya aliran atau radius hidrolis, kekerasan permukaan dan kecuraman lereng.
- d. Komposisi aliran permukaan, air aliran permukaan mengandung bahan-bahan padat yang tersuspensi dan bahan kasar (Arsyad, 1989).

Faktor-faktor yang mempengaruhi limpasan permukaan dapat dikelompokkan ke dalam faktor-faktor yang berhubungan dengan curah hujan dan yang berhubungan dengan karakteristik daerah aliran sungai. Lama waktu hujan, intensitas dan penyebaran hujan mempengaruhi laju dan volume limpasan permukaan. Aliran permukaan total untuk suatu hujan secara langsung berhubungan dengan lama waktu hujan untuk intensitas tertentu. *Infiltrasi* akan berkurang pada tingkat awal suatu kejadian hujan. Oleh karenanya, hujan dengan waktu yang singkat tidak banyak menghasilkan aliran permukaan. Pada hujan dengan intensitas yang sama dan waktu yang lebih lama, akan menghasilkan aliran permukaan yang lebih besar.

Intensitas hujan akan mempengaruhi laju dan volume aliran permukaan. Pada hujan dengan intensitas tinggi, kapasitas *infiltrasi* akan terlampaui dengan beda yang cukup besar dibandingkan dengan hujan yang kurang intensif. Dengan demikian, total volume aliran permukaan akan lebih besar pada hujan intensif

dibandingkan dengan hujan yang kurang intensif meskipun curah hujan total untuk kedua hujan tersebut sama besarnya. Namun demikian, hujan dengan intensitas tinggi dapat menurunkan *infiltrasi* akibat kerusakan struktur permukaan tanah yang ditimbulkan oleh tenaga kinetis hujan dan aliran permukaan yang dihasilkannya.

Laju dan volume aliran permukaan dipengaruhi oleh penyebaran dan intensitas curah hujan di suatu DAS yang bersangkutan. Umumnya, laju aliran permukaan dan volume terbesar terjadi jika hujan turun merata di suatu DAS.

Pengaruh vegetasi dan cara bercocok bertanam terhadap aliran permukaan dapat diterangkan bahwa vegetasi memperlambat jalannya aliran permukaan dan memperbesar jumlah air yang tertahan di atas permukaan tanah (*surface detention*) dan dengan demikian, menurunkan laju aliran permukaan.

Menurut (Sosrodarsono Suyono, 1993), Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat-sifat aliran permukaan adalah sebagai berikut:

- curah hujan, jumlah, laju dan distribusi.
- temperatur.
- tanah, tipe, substratum dan topografi.
- luas daerah aliran.
- tanaman/tumbuhan penutup tanah.
- sistem pengelolaan tanah.

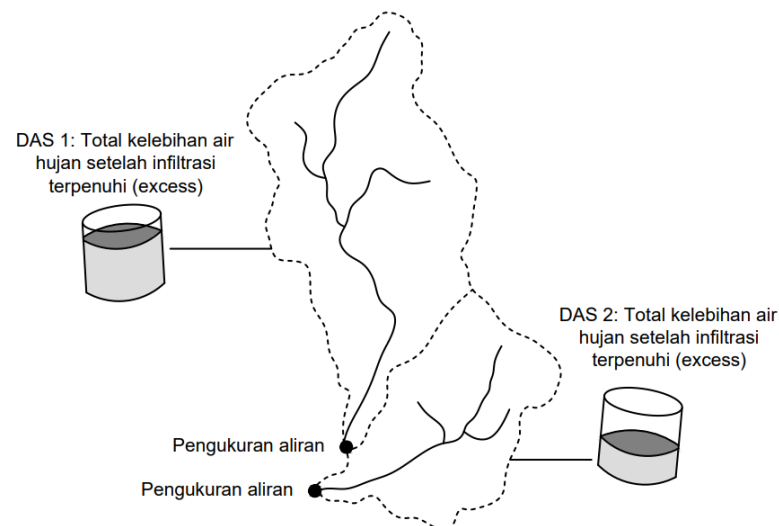
Menurut (Rahim, 2000), jumlah air yang menjadi limpasan ini sangat bergantung kepada jumlah air hujan per satuan waktu (intensitas), keadaan penutup tanah, topografi (terutama kemiringan lereng), jenis tanah dan ada atau tidaknya hujan yang terjadi sebelumnya (kadar air tanah sebelum terjadinya hujan) serta luas areal tangkapan.

2.1.2 Karakteristik DAS (Daerah Aliran Sungai)

A. Daerah Tangkapan Hujan dan Volume *Run-Off*

Ukuran dan besar kecilnya daerah tangkapan hujan yang memberi kontribusi terhadap aliran sungai (*contributing area*) di dalam DAS berpengaruh langsung terhadap total volume aliran yang keluar dari DAS.

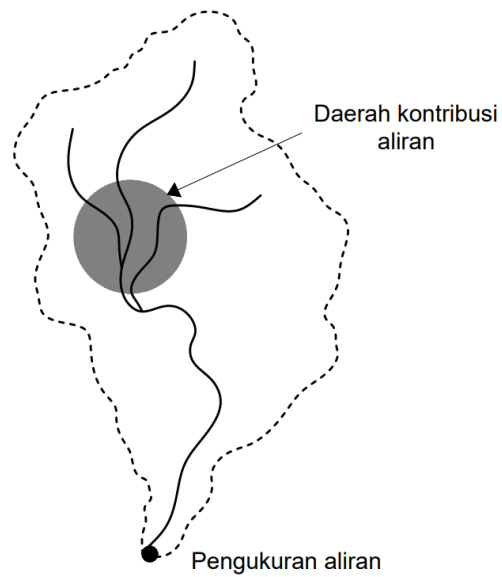
Umumnya jika hujan jatuh merata di dalam dua DAS, yang satu berukuran besar dan daerah tangkapan hujannya relatif luas (DAS besar) dan yang lain memiliki daerah tangkapan hujan yang lebih sempit atau (DAS kecil), maka total volume aliran yang dihasilkan oleh DAS besar akan relatif lebih banyak DAS yang berukuran kecil dan volume air tersebut proporsional terhadap luas daerah tangkapannya (Gambar 2)



Gambar 2 Pengaruh DAS terhadap Volume Aliran

(Sumber : The Comet Program)

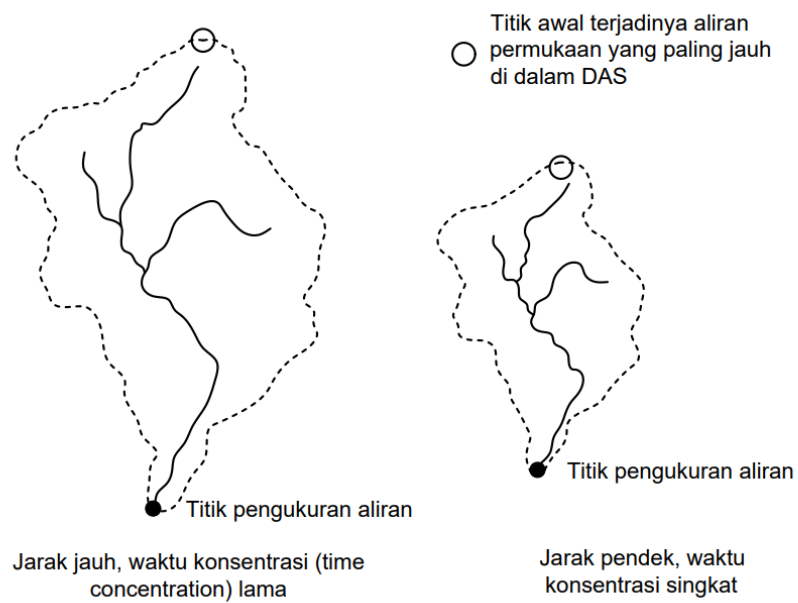
Kebanyakan kejadian hujan hanya meliputi luasan tertentu di dalam DAS (Gambar 3). Oleh karena itu, untuk berbagai situasi, volume aliran hanya akan ditentukan oleh luasan kontribusi (*contributing area*). Luasan ini menyatakan luas bagian DAS yang terkena hujan, bukan luas total DAS.



Gambar 3 Luasan Kontribusi (Sumber : The Comet Program)

B. Ukuran DAS dan Waktu Terjadinya Aliran Permukaan

Perhatikan dua DAS yang bentuknya serupa (Gambar 4) , dimana satu lebih besar dari yang lain.

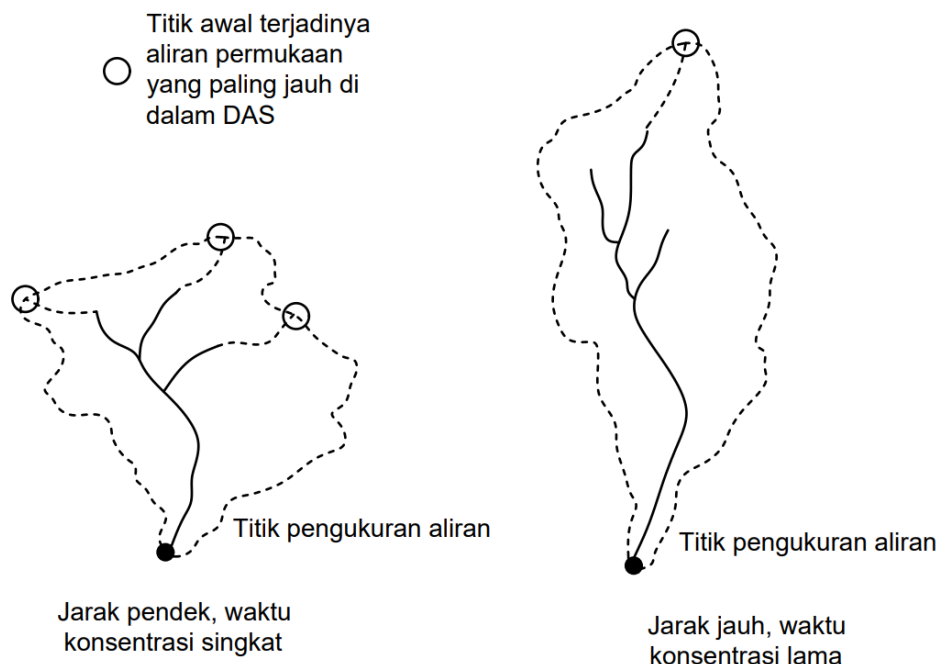


Gambar 4 Pengaruh Ukuran DAS terhadap aliran permukaan
(Sumber : The Comet Program)

Di dalam DAS yang berukuran besar, Aliran permukaan yang berjalan dari suatu titik di bagian hulu DAS akan menempuh waktu yang lebih lama sebelum sampai ke *outlet*, bila dibandingkan dengan titik pada posisi yang sama untuk mencapai *outlet* pada DAS kecil. Lebih lanjut, suatu kejadian hujan mungkin hanya akan menutup sebagian saja wilayah pada DAS besar, tetapi dapat menutup seluruh wilayah pada DAS yang kecil. Jadi ukuran DAS akan berpengaruh terhadap terjadinya aliran permukaan yang teramati pada *outlet* DAS.

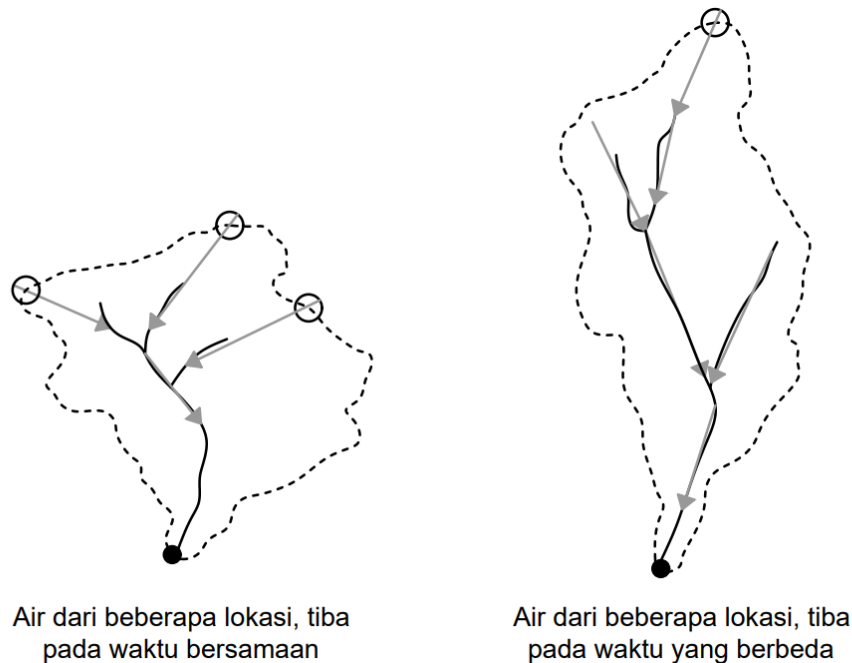
C. Bentuk DAS

Bentuk DAS berpengaruh terhadap besar dan waktu terjadinya aliran puncak pada *outlet* DAS. Sebagai contoh Gambar (5). Ada dua DAS dengan luas yang sama tetapi bentuknya berbeda, salah satu memanjang dan sempit, yang lain relatif melebar dan agak memendek.



Gambar 5 Pengaruh Bentuk DAS terhadap Aliran (Sumber : The Comet Program)

Andaikan kita bandingkan dua titik air air yang mengalir dari ujung masing-masing DAS ke muaranya, maka titik air pada DAS yang relatif melebar akan sampai ke *outlet* lebih cepat (Gambar 6).



Gambar 6 Pengaruh bentuk DAS terhadap aliran puncak

(Sumber : The Comet Program)

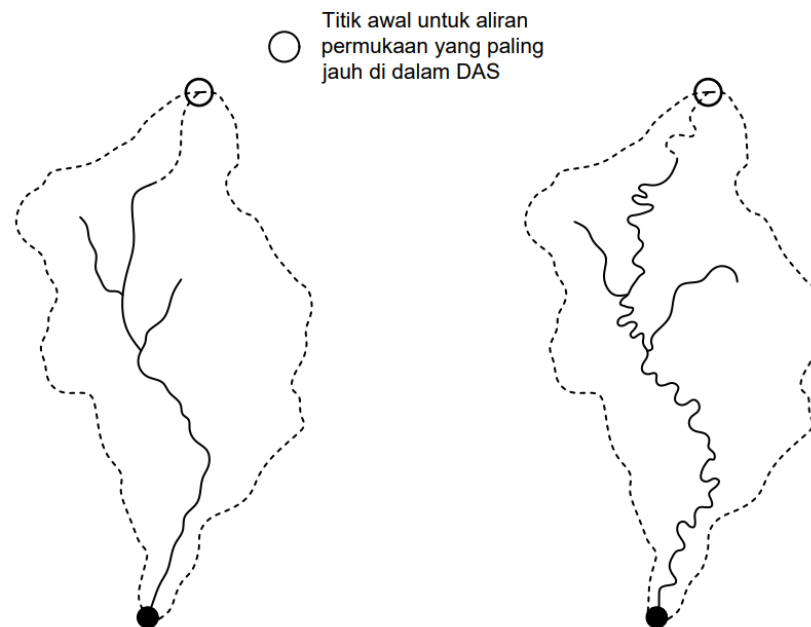
Selanjutnya, pada kasus bentuk DAS yang melebar, maka titik air dari berbagai lokasi di bagian hulu akan sampai di *outlet* pada saat yang relatif sama dan menghasilkan debit puncak yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada bentuk DAS yang memanjang, maka titik-titik air dari berbagai lokasi di wilayah hulu DAS sangat kecil kemungkinannya untuk sampai di *outlet* pada saat yang sama (Gambar 6).

D. *Meander* Sungai

Meander atau bentuk belokan ruas aliran di sepanjang sungai menambah jarak tempuh lebih panjang bagi air untuk mengalir sampai ke *outlet* (Gambar 7).

Perhatikan Gambar (7) , kedua DAS memiliki bentuk dan luasan yang relatif sama. Tetapi salah satu sungai mempunyai *meander* yang lebih banyak. Jika panjang kedua ruas sungai tersebut dibandingkan , maka sungai ber-*meander* akan lebih panjang. Air yang mengalir dari hulu DAS menuju *outlet* sungai ber-*meander*

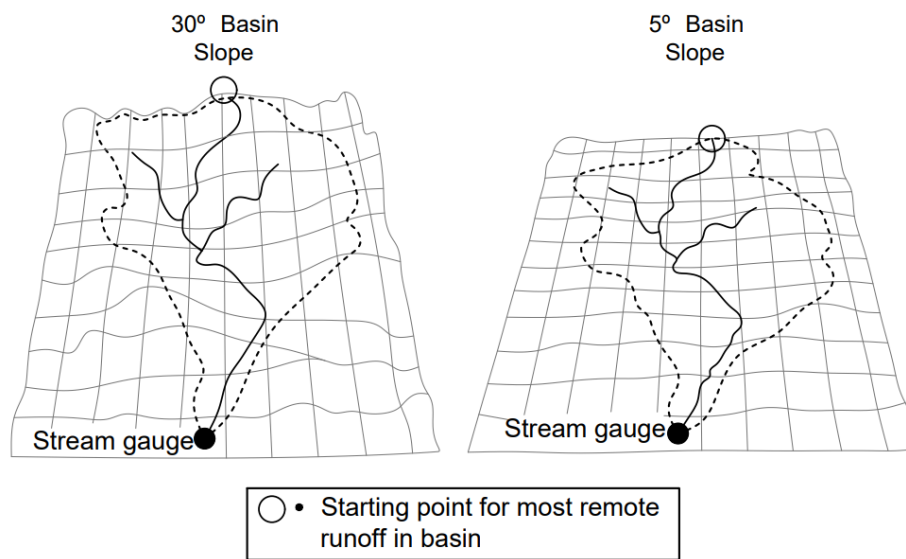
yang akan menjadi lebih lambat. Meander meningkatkan waktu tempuh bagi aliran permukaan di seluruh bagian DAS untuk mencapai *outlet* dan mungkin dapat mengurangi volume total aliran.



Gambar 7 Pengaruh meander sungai terhadap aliran

E. Kemiringan DAS

Kemiringan (*slope*) DAS (Gambar 8) mempengaruhi jumlah dan waktu aliran untuk mencapai *outlet*. Kenaikan *slope* akan menyebabkan faktor lain berperan. Pertama, kontak antara air hujan dan permukaan tanah tidak lagi tegak lurus. Karena tanah miring, gaya gravitasi tidak lagi menarik air langsung ke dalam tanah, sehingga lebih banyak air hujan yang berpotensi menjadi aliran permukaan. Faktor lain adalah gerakan air di atas permukaan tanah. Karena permukaan miring, air bergerak lebih cepat dan sedikit waktu untuk kontak dengan permukaan tanah, hal ini akan mengurangi potensi *infiltrasi*.



Gambar 8 Pengaruh kemiringan DAS terhadap aliran

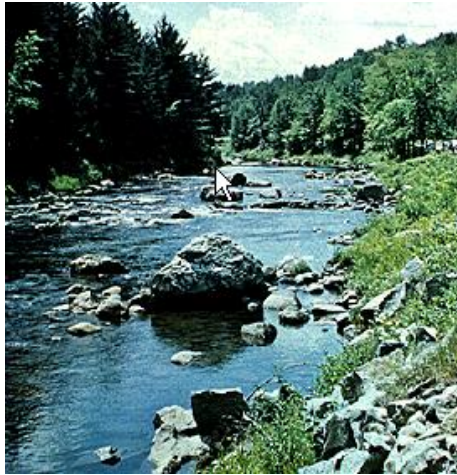
(Sumber : The COMET Program)

Faktor lain yang juga perlu dipertimbangkan adalah jumlah sedimen yang dibawa oleh aliran. Erosi terjadi ketika air menggerus sedimen di permukaan tanah. Meskipun hal ini tergantung pada jenis tanah dan vegetasi penutupnya, erosi akan meningkat sejalan dengan kemiringan. Kandungan sedimen di dalam aliran air akan menutupi pori-pori permukaan tanah yang seharusnya berperan bagi proses *infiltrasi*.

Pada umumnya, semakin miring permukaan tanah di atasnya, semakin miring pula saluran drainase alami di dalam DAS dan semakin cepat aliran ke bawah dan semakin tinggi debit teramati di *outlet*.

F. Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan (*roughness*) dari saluran atau sungai meningkat karena adanya bebatuan, vegetasi dan sampah. Perubahan penampakan kanal dengan mengurangi vegetasi atau pembuatan kanal yang di lining pada kiri dan kanan tanggul saluran akan mengurangi kekasaran permukaan (Gambar 9)



(a) kekasaran Permukaan Tinggi

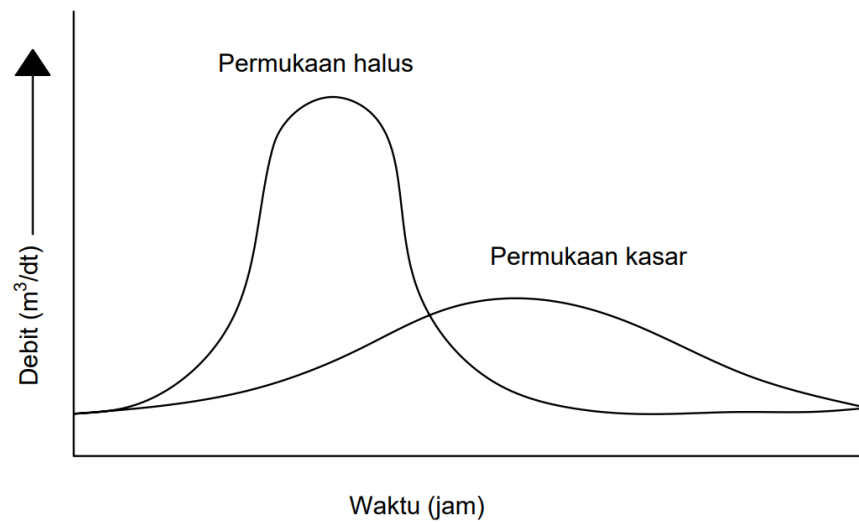


(b) kekasaran permukaan rendah

Gambar 9 Perbedaan kekasaran permukaan (*roughness*) pada saluran

(Sumber : The COMET Program)

Faktor kekasaran permukaan berpengaruh langsung terhadap kecepatan air mengalir di dalam saluran dan terhadap kenaikan debit puncak (Gambar 10). Persamaan Manning's umum dipakai untuk menyatakan tingkat kekasaran permukaan.

**Gambar 10** Pengaruh kekasaran permukaan terhadap debit puncak (Sumber : The COMET Program)

Permukaan yang kasar menyebabkan turbulensi aliran meningkat. Aliran yang semakin turbulen menghasilkan aliran yang lambat. Hal ini akan meningkatkan *infiltrasi* dan menghasilkan hidrograf banjir yang lebih lebar dengan debit puncak lebih rendah. Sebaliknya, mengurangi tingkat kekasaran permukaan saluran akan menghasilkan aliran yang cepat dan debit puncak yang lebih besar.

G. Kerapatan Jaringan Sungai

Kerapatan jaringan sungai (*stream density*) adalah jumlah panjang semua sungai dan anak sungai didalam DAS dibagi dengan luas DAS. Suatu DAS dengan satu sungai dan sejumlah besar percabangan anak sungai mempunyai kerapatan jaringan yang lebih tinggi dibanding DAS dengan satu sungai dan hanya beberapa anak sungai. Kerapatan yang tinggi memungkinkan aliran permukaan dari wilayah diatas anak-anak sungai untuk terdrainase lebih efisien. Air akan mengalir ke anak-anak sungai lebih cepat. Hal ini akan membagi dan mengurangi debit puncak. Suatu DAS dengan kerapatan jaringan yang rendah biasanya mengandung tanah yang dalam dan berkembang baik. Pada kasus ini air akan ter-*infiltrasi* ke dalam tanah.

Indeks kerapatan sungai diperoleh dengan persamaan rumus sebagai berikut :

$$Dd = L / A \quad (2)$$

Dimana :

Dd = kerapatan sungai (km/km^2)

L = Jumlah panjang sungai termasuk anak sungainya (km)

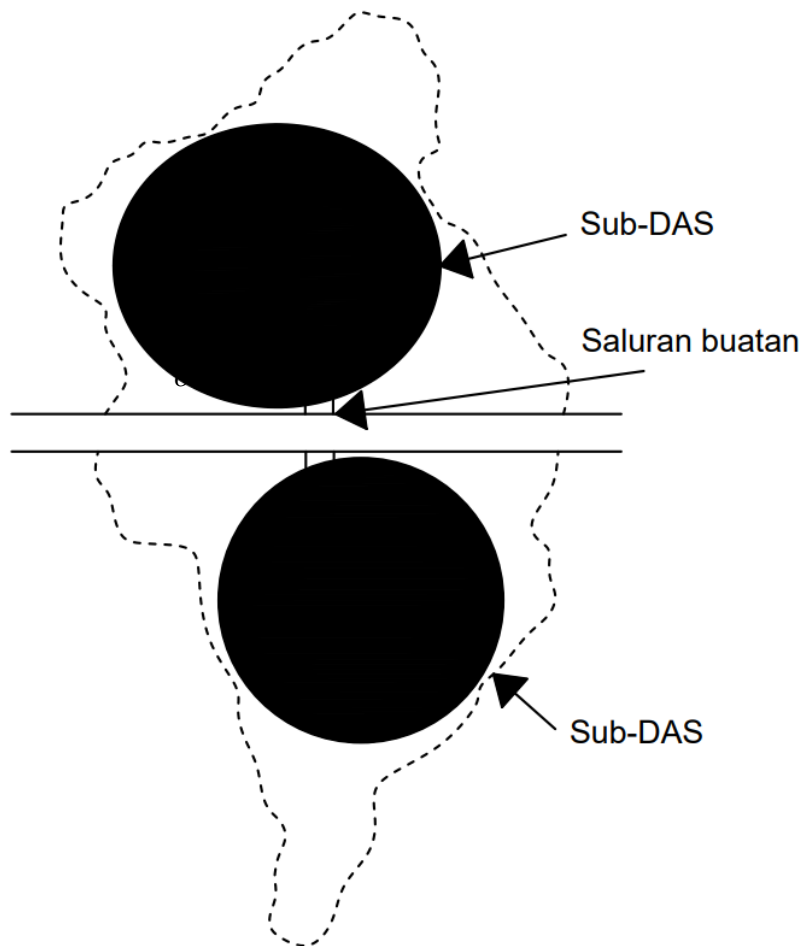
A = panjang sungai (km)

H. Urbanisasi

Urbanisasi biasanya menghasilkan perubahan pada permukaan tanah dan saluran/sungai alami. Permeabilitas permukaan, ukuran DAS, kerapatan jaringan, kekasaran permukaan, panjang sungai dan kemiringan lahan dapat berubah. Pada umumnya, pola pengembangan wilayah urban menghasilkan aliran permukaan yang lebih besar dan lebih cepat.

Di lingkungan perkotaan semakin besar penutupan tanah oleh *paving*, aspal, gedung dan pemanpatan tanah, akan mencegah air hujan atau lelehan salju untuk

cepat ter-*infiltrasi* ke dalam tanah. Akibatnya aliran permukaan menjadi lebih besar. Fitur perkotaan seperti punggung jalan dan saluran drainase dapat berfungsi sebagai pemecah daerah tangkapan (*basin*) menjadi unit yang lebih sempit lagi (*subbasin*) (Gambar 11).



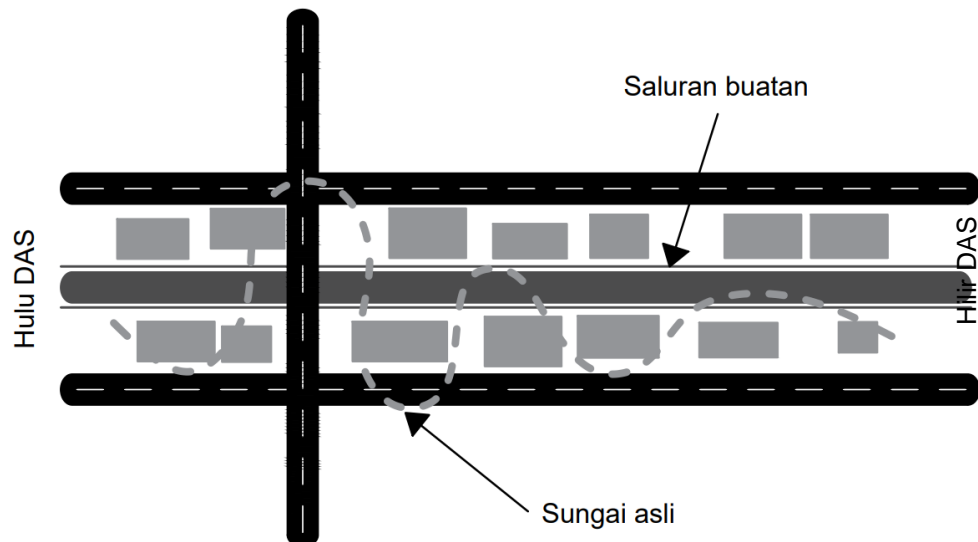
Gambar 11 Daerah tangkapan untuk wilayah perkotaan (Sumber : The COMET Program)

Daerah tangkapan (*catchment area*) yang kecil bereaksi lebih cepat terhadap hujan jika dibandingkan daerah tangkapan yang leboh besar. Fitur-fitur tersebut sebenarnya berfungsi sebagai bagian dari jaringan sungai yang akan meningkatkan kerapatan jaringan. Kerapatan jaringan yang tinggi menghasilkan aliran yang lebih cepat menuju saluran (Gambar 11).

Lebih lanjut di wilayah perkotaan, permukaan jalan, saluran drainase dan saluran pembuangan, mempunyai permukaan yang lebih halus karena plengsengan

dan dibersihkan dari tanaman-tanaman perdu, bila dibandingkan dengan saluran alam. Hal ini menurunkan kekasaran permukaan, meningkatkan kecepatan air dan memungkinkan aliran bergerak lebih cepat ke arah sungai utama.

Kadang-kadang *meander* alam yang ada di wilayah perkotaan juga diluruskan dan diplengseng (Gambar 12).



Gambar 12 Pelurusan saluran alam mempercepat aliran air
(sumber The COMET Program)

Hal ini menunjukkan jarak tempuh aliran dari hulu ke hilir sistem drainase tersebut, meningkatkan kemiringan dan meningkatkan kecepatan aliran. Semua ini memungkinkan aliran permukaan atau banjir lebih cepat terjadi. Secara garis besar dapat disimpulkan bahwa pembangunan lingkungan perkotaan menghasilkan aliran permukaan lebih banyak dan lebih cepat bila dibandingkan lingkungan yang masih alami.

2.1.3 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Aliran Sungai

Di dalam sebuah DAS terdapat beberapa faktor yang mempunyai karakteristik yang khas, yang berarti bahwa tiap-tiap DAS akan memberikan tanggapan yang berbeda terhadap masukan hujan yang sama. Beberapa faktor yang

mempengaruhi aliran sungai adalah hujan dan sifat fisik DAS, yang terinci dicirikan sebagai berikut (Sosrodarsono Suyono, 1993):

A. Intensitas Hujan

Pengaruh intensitas hujan terhadap limpasan atas permukaan tergantung dari kapasitas *infiltrasi*. Jika intensitas hujan melampaui kapasitas *infiltrasi*, maka besarnya limpasan atas permukaan akan meningkat sesuai peningkatan intensitas hujan. Tetapi besarnya peningkatan limpasan itu tidak sebanding dengan peningkatan hujan efektif yang disebabkan oleh efek penggenangan atau tampungan di permukaan tanah.

B. Durasi Hujan

Di setiap DAS terdapat suatu durasi (lama) hujan kritis. Jika durasi hujan kurang dari durasi kritis tersebut, maka limpasan atas permukaan akan sama dan tidak tergantung dari intensitas hujan. Jika durasi hujan yang lebih panjang, maka limpasan akan menjadi lebih panjang. Durasi hujan juga mengakibatkan penurunan kapasitas *infiltrasi*. Untuk durasi hujan yang panjang, limpasan atas permukaan akan menjadi lebih besar meskipun intensitasnya relatif sedang.

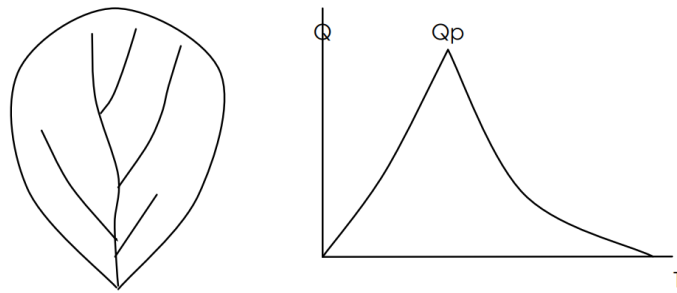
C. Distribusi Penyebaran Hujan

Banjir di DAS dengan luasan besar kadang-kadang disebabkan oleh hujan lebat yang distribusinya merata dan seringkali pula disebabkan oleh hujan biasa yang mencakup daerah yang luasan yang kecil, debit puncak maksimum dapat disebabkan oleh hujan dengan daerah hujan yang sempit.

Bentuk DAS mempunyai arti penting dalam hubungannya dengan aliran sungai yaitu berpengaruh terhadap kecepatan terpusatnya aliran. Ada 4 (empat) bentuk DAS yang diketahui, sebagai berikut (Soemarto, 1995) :

1. Memanjang

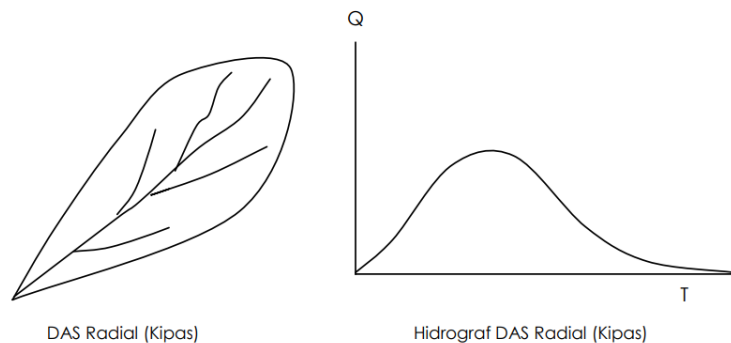
Biasanya induk sungai memanjang dengan anak-anak sungai langsung masuk kedalam induk sungai. Bentuk ini (Gambar 13) menyebabkan debit banjirnya relatif kecil karena perjalanan banjir dari anak sungai berbeda-beda waktunya tetapi banjirnya berlangsung agak lama.



Gambar 13 Bentuk DAS Memanjang (Bulu Burung) dan Hidrograf yang dihasilkan (Soemarto, 1995)

2. Radial

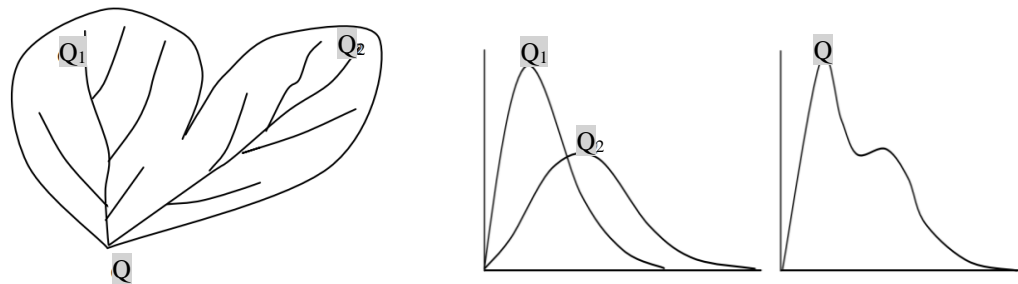
Bentuk ini (Gambar 14) terjadi karena arah alur sungai seolah-olah memusat pada suatu titik sehingga menggambarkan adanya bentuk radial. Kadang-kadang gambaran tersebut berbentuk kipas atau lingkaran. Akibatnya waktu yang diperlukan aliran yang datang dari segala penjuru arah alur sungai memerlukan waktu yang hampir bersamaan. Apabila terjadi hujan yang sifatnya merata di seluruh DAS maka akan terjadi banjir besar.



Gambar 14 Bentuk DAS Radial (kipas) dan Hidrograf Banjir Yang Dihasilkan (Soemarto, 1995)

3. Paralel

DAS ini (Gambar 15) dibentuk oleh 2 jalur Sub DAS yang bersatu di bagian hilirnya. Banjir biasanya terjadi di daerah hilir setelah titik pertemuan antara kedua alur sungai sub DAS tersebut.



Gambar 15 Bentuk DAS Paralel dan Hidrograf yang dihasilkan (Soemarto, 1995)

4. Kompleks

Bentuk DAS ini terjadi akibat gabungan dua atau lebih DAS. Dalam keadaan hujan yang sama daerah aliran sungai radial, hidrografnya lebih tajam serta periode kejadian banjirnya lebih pendek dibandingkan dengan bentuk DAS bulu burung.

D. Arah pergerakan hujan

Umumnya pusat hujan itu bergerak, suatu hujan lebat yang bergerak sepanjang sistem aliran sungai akan sangat mempengaruhi debit puncak dan lama limpasan atas permukaan. Arah gerak hujan ke hulu mengakibatkan limpasan cepat mencapai puncak dan lama limpasan relatif panjang (Harto, 1993). Hal ini disebabkan karena hujan yang jatuh di dekat stasiun hidrometri menyebabkan waktu naik cepat. Sedangkan arah gerak hujan ke hilir menyebabkan debit puncak lebih lambat tercapai tetapi kemudian naik dengan cepat sehingga lama limpasan relatif pendek. Namun arah gerak hujan umumnya sulit diketahui, karena pada dasarnya dapat dikenali bila tersedia stasiun hujan otomatis (ARR) yang cukup rapat.

E. Indeks Hujan Terdahulu

Hujan terdahulu menyebabkan kadar kelembaban tanah menjadi tinggi. Dengan demikian akan mudah terjadi banjir karena akan menurunkan kapasitas *infiltrasi*. Demikian pula jika kelembaban tanah itu meningkat dan mencapai kapasitas lapang, maka *infiltrasi* akan menjadi perkolasi dan mencapai permukaan air tanah sehingga akan memperbesar limpasan bawah permukaan tanah (sebagai aliran dasar). Selama periode pengurangan kelembaban tanah oleh penguapan, suatu hujan yang lebat tidak akan mengakibatkan kenaikan limpasan atas permukaan. Hal ini disebabkan karena hujan yang ter-*infiltrasi* tersebut tertahan sebagai kelembaban tanah. Sebaliknya jika kelembaban tanah itu sudah meningkat karena hujan terdahulu yang cukup besar, maka kadangkala hujan dengan intensitas kecil dapat mengakibatkan banjir.

F. Daerah Aliran Sungai

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan daerah di mana semua hujan efektif yang melimpas di atas permukaan tanah akan mengalir ke sungai yang bersangkutan. Daerah ini dibatasi oleh batas topografi (garis kontur), yang berarti ditetapkan berdasarkan limpasan atas permukaan. Nama DAS ditandai dengan nama sungai yang bersangkutan dan dibatasi oleh titik kontrol *outlet* yang umumnya merupakan stasiun hidrometri atau lokasi bangunan air (Harto, 1993).

G. Luas DAS

Jika semua faktor hujan adalah tetap, maka dalamnya limpasan rerata selalu sama dan tidak tergantung pada luas. Berdasarkan anggapan ini, mengingat aliran per-satuan luas adalah tetap, maka hidrograf yang ditimbulkan adalah sebanding dengan luas tersebut. Makin besar DAS berarti makin lama pula limpasan tersebut mencapai titik pengukuran. Dengan demikian lebar dasar hidrograf (lama limpasan) menjadi lebih panjang dan debit puncaknya akan berkurang. Semakin luas suatu DAS akan menyebabkan distribusi hujan semakin tidak merata (Harto, 1993). Jika dihitung per-satuan luas, banjir yang terjadi di daerah dengan luas yang kecil akan lebih besar dibandingkan banjir yang terjadi di sungai dengan DAS yang lebih luas (Subarkah, 1980). Hal ini disebabkan karena di DAS yang kecil, air hujan mudah mencapai sungai

sedangkan pada DAS yang luas kemungkinan terdapat danau, rawa, kolam, tanah yang *porous* (misalnya pasir) dan lain-lain, yang dapat menahan air hujan. Luas DAS dipandang berpengaruh besar terhadap debit puncak (Harto, 1993). DAS yang lebih kecil memiliki tangkapan yang berbeda dengan DAS yang besar, terutama dengan hubungannya dengan limpasan.

H. Panjang Sungai

Panjang sungai (L) merupakan jarak dari *outlet* ke batas aliran, yang diukur sepanjang saluran aliran utama. Semakin panjang sungai, maka jarak antara tempat jatuhnya hujan dengan *outlet* semakin besar, sehingga waktu yang diperlukan air hujan untuk mencapai *outlet* lebih lama dan akan menurunkan debit banjir (Asdak, 2002). Hal ini disebabkan karena makin panjang sungai makin banyak memberikan kesempatan bagi air hujan untuk mengalir sebagai limpasan. Dengan demikian jumlah kehilangan air akan semakin besar.

I. Penggunaan Lahan

Tata guna lahan (*landuse*) sangat mempengaruhi limpasan. Daerah hutan lebat dengan pepohonan adalah sulit menghasilkan limpasan karena kapasitas *infiltrasi*-nya besar. Jika daerah hutan tersebut digundulkan sehingga banjir yang belum pernah dialami sebelumnya. Tata guna lahan sangat dipengaruhi oleh kebijakan pemerintah, misalnya daerah pertambangan cenderung akan mengubah kelestarian hutan.

Seperti diketahui, hutan pada umumnya ditumbuhi tanaman-tanaman (pohon-pohon) yang besar sehingga menggambarkan kekasaran DAS yang cukup besar, dalam arti akan menghambat jalannya air hujan yang melimpas. Sedangkan untuk sawah dan tegalan hanya ditumbuhi yang relatif kecil dan dianggap tidak cukup kuat dalam menghambat air hujan yang melimpas. Demikian juga daerah pemukiman, dianggap tidak cukup kasar untuk menghambat jalannya air hujan yang melimpas.

J. Topografi

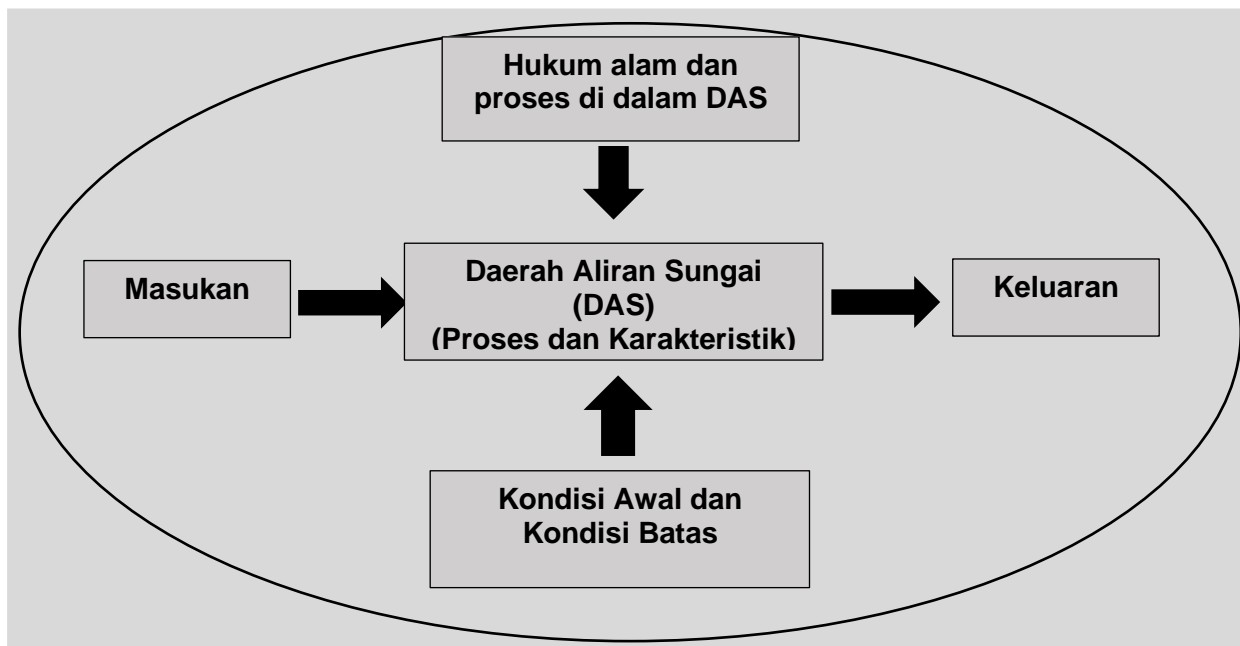
Corak, elevasi, gradien, arah dan kepadatan sungai mempunyai pengaruh terhadap limpasan. Corak DAS adalah faktor bentuk, yakni perbandingan antara luas DAS dengan kuadrat panjang sungai utama. Jika faktor bentuk kecil berarti tidak mudah terjadi banjir. Elevasi mempunyai hubungan dengan temperature dan hujan. Gradien (*slope*) mempunyai hubungan dengan *infiltrasi*, limpasan, kelembaban serta pengisian air tanah. Gradien adalah faktor penting yang mempengaruhi waktu konsentrasi dan mempunyai hubungan langsung dengan aliran. Arah DAS mempunyai pengaruh terhadap arah angin dan penguapan. Semakin tinggi kepadatan sungai sebagai drainase maka limpasan akan cepat terkuras dari dalam DAS. Kepadatan sungai adalah jumlah pertemuan sungai per-satuan luas.

K. Jenis Tanah

Jenis tanah mempengaruhi kapasitas *infiltrasi*. Dengan demikian limpasan sangat dipengaruhi jenis tanah di DAS tersebut.

2.1.4 Komponen Suatu Model

Analogi dari konsep sistem tersebut, suatu model untuk Daerah Aliran Sungai (DAS) atau *watershed* atau *catchment area* dapat dianggap sebagai suatu system yang dibatasi oleh geometri dari DAS tersebut. Sistem ini terdiri masukan (berupa hujan yang jatuh ke dalam DAS), hukum-hukum alam yang mengontrol proses hidrologi, kondisi awal, kondisi batas dan keluaran. Biasanya digunakan untuk mengukur keluaran dari DAS adalah debit di muara sungai. (Singh, 1995) mengilustrasikan komponen suatu model hidrologi (Gambar 16).



Gambar 16 Komponen dari Suatu Model Daerah Aliran Sungai (DAS)
(Sigh, 1995)

a. Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Merupakan syarat batas yang menyebabkan sistem hidrologi berubah, misalnya hujan dan komponen iklim lainnya.

b. Kondisi Awal (*Initial Condition*)

Kondisi awal, suatu nilai yang menyatakan status dari suatu sistem pada saat perhitungan di dalam model akan dilakukan. Penyelesaian suatu persamaan diferensial pada prinsipnya menggambarkan seberapa jauh output akan berubah, yang disebabkan berubahnya input, nilai parameter dan beberapa variable lainnya di dalam model. Misalnya, penyelesaian persamaan untuk penelusuran aliran (*flood routing*) akan memberikan informasi tentang laju perubahan debit terhadap waktu yang dilambangkan dengan $(\Delta Q/\Delta t)$, tetapi untuk keperluan perencanaan desain, operasi dan regulasi, nilai debit pada setiap saat dibutuhkan, tidak hanya laju perubahan debit terhadap waktu $(\Delta Q/\Delta t)$.

Sehingga untuk menghitung debit tersebut digunakan persamaan berikut :

$$Q_t = Q^{(t-\Delta t)} + (\Delta Q/\Delta t) \quad (3)$$

Dalam hal ini, menyatakan kondisi awal, suatu nilai yang diketahui sebelum perhitungan dimulai. Kondisi awal sangat spesifik tergantung pada model yang digunakan dan permasalahan apa yang sedang ditangani. Pada model yang menghitung perubahan volume air masuk dan keluar dari DAS, maka kondisi awal yang dibutuhkan adalah kadar lengas tanah (*soil moisture*) yang ada di dalam DAS. Pada model aliran permukaan, kondisi awal menyatakan aliran permukaan pada permulaan terjadinya banjir. Pada model penelusuran banjir (*routing model*), kondisi awal menyatakan debit di saluran pada saat banjir.

c. Variabel (*State Variable*)

Variabel adalah suatu istilah dalam persamaan yang membentuk model, mewakili suatu kondisi atau status sistem hidrologi pada waktu dan tempat tertentu. Jadi, variabel adalah persamaan di dalam model yang menyatakan keadaan (*state*) sistem hidrologi pada ruang dan waktu tertentu. Misalnya, *deficit* dan *contact rate loss model* merupakan suatu persamaan yang menghitung nilai rerata volume air di dalam suatu tampungan alami (waduk). Volume air dilambangkan dengan *state variabel* di dalam persamaan tersebut.

d. Parameter

Parameter menyatakan ukuran numeris dari karakteristik system yang dimodelkan. Parameter akan mengendalikan hubungan input dan output dari sistem. Parameter dapat dianggap seperti tombol dari suatu model.

Nilai parameter perlu di set up supaya model dapat secara akurat memprediksi atau mereproduksi perilaku dari suatu system fisik yang sedang dimodelkan. Misalnya, unit hidrograf Snyder mempunyai dua parameter, yaitu waktu tempuh (*basin lag*), t_p , dan *peaking coefficient* (C_p). Nilai kedua parameter ini perlu ditentukan pada saat model digunakan untuk suatu DAS. Proses mencocokkan atau men-*set up* nilai parameter ini disebut kalibrasi (*calibration*). Parameter mungkin berkaitan dengan karakteristik atau memiliki signifikansi fisik tertentu. Parameter juga dapat tidak ada hubungan dengan karakteristik fisik DAS tetapi semata-mata empiris. Sebagai contoh, model kanal muskingum cunge membutuhkan nilai masukan berupa kemiringan kanal, yang berarti berasosiasi dengan fisik system yang digambarkan dan terukur. Sebaliknya, unit hidrograf Snyder mempunyai parameter C_p (*peaking coefficient*). Parameter ini tidak punya hubungan dengan karakteristik fisik. Nilai

Cp hanya diestimasi selama proses kalibrasi. Selain itu, parameter lainnya yang berperan adalah luas DAS (A), kemiringan sungai (S) dan panjang sungai (L). Sehingga bisa kita tuliskan : $Q_p = f(A, S, L, tp, Cp)$.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Banjir

Banjir merupakan bencana alam dengan frekuensi tertinggi dan distribusi terluas secara geografis di seluruh dunia (UNISDR, 2017). Kerusakan lingkungan, perubahan fisik permukaan tanah menyebabkan penurunan daya tampung dan daya simpan air hujan, sehingga sebagian besar curah hujan dialirkan sebagai air limpasan (*runoff*) yang sangat berpotensi menjadi bencana banjir terutama pada daerah hilir. Faktor meteorologis yang menyebabkan bencana banjir yaitu unsur iklim curah hujan yang terdiri dari jumlah, durasi, intensitas, dan distribusi hujan. Hujan torensial merupakan jenis hujan utama penyebab fenomena banjir (Ramage, 1971).

Fluvial flooding atau lebih sering diketahui sebagai banjir yang disebabkan oleh meluapnya air sungai terjadi di berbagai daerah sungai dan sistem daerah tangkapan air (WMO (*World Meteorological Organization*), 2011). Banjir di hilir sungai sebagian terjadi di dataran yang terdampak atau membasahi sebagian tanah di sekitarnya sebagai hasil akibat lebihnya kapasitas sistem aliran atau bocornya tanggul alami maupun buatan. Banjir bandang seringkali lebih merusak, terjadi pada waktu yang cepat, dan terbatas pada suatu lembah atau daerah tertentu. Pembentukan banjir bandang terjadi karena rapatnya formasi curah hujan dan kecepatan aliran yang tinggi. Kecepatan dari kedua hal tersebut membuat banjir bandang menjadi sangat berbahaya bagi kehidupan manusia.

Besarnya banjir tergantung pada intensitas curah hujan, volume, waktu dan fase, dari kondisi awal sungai dan drainase basin. Parameter klimatologis yang kemungkinan dipengaruhi oleh perubahan iklim adalah curah hujan, badai angin, gelombang badai, dan kenaikan air laut. Pada kasus bahaya banjir akibat banjir sungai, *run-out* dimodelkan menggunakan model hidrologi untuk menghitung dengan baik rute pengendapan yang berasal dari curah hujan yang lalu membentuk limpasan dan model hidrolis untuk mengevaluasi detail terperinci secara spasial

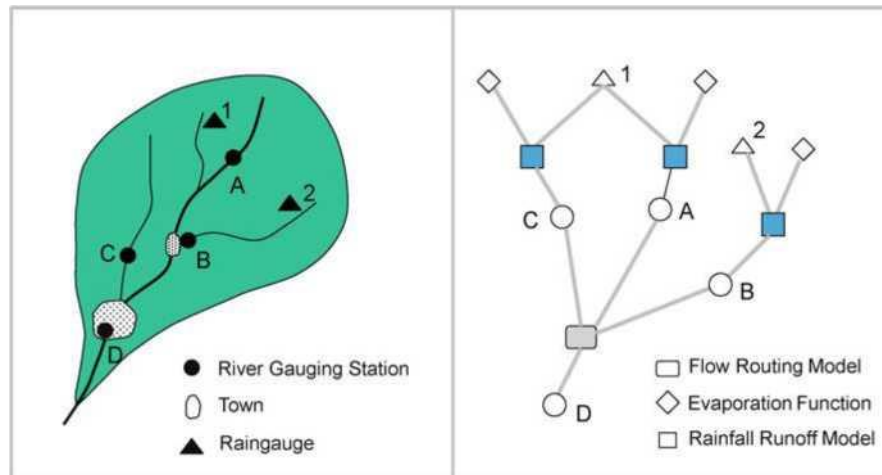
dan daerah banjir yang terdampak (UNISDR, 2017).

(Muis *et al.*, 2015) melakukan penelitian mengenai bahaya banjir secara global dengan menggabungkan probabilitas perubahan iklim dan urbanisasi disertai strategi adaptasi di dalamnya. Hal tersebut dinilai memungkinkan untuk membuat suatu prakiraan risiko banjir di masa depan dalam skala nasional di negara berkembang dengan data yang terbatas seperti halnya Indonesia. (Muis *et al.*, 2015)¹ menyatakan bahwa pada tahun 2030, urbanisasi adalah faktor utama meningkatnya risiko banjir dengan perubahan berkisar dari 125% hingga 215% untuk banjir sungai, dan 348% hingga 554% untuk banjir daerah pesisir, khususnya daerah Sulawesi Selatan dan daerah sepanjang pantai.

2.2.2 Prakiraan Banjir

Prakiraan aliran sungai digunakan dalam berbagai bidang salah satunya ialah untuk prakiraan banjir. Output dari sistem ini dapat berguna untuk sistem peringatan banjir dan kekeringan serta dalam berbagai situasi kompleks di mana ketinggian atau aliran sungai dipengaruhi oleh berbagai hal. Prakiraan curah hujan berpotensi untuk menjelaskan prakiraan banjir lebih baik (Sene, 2015).

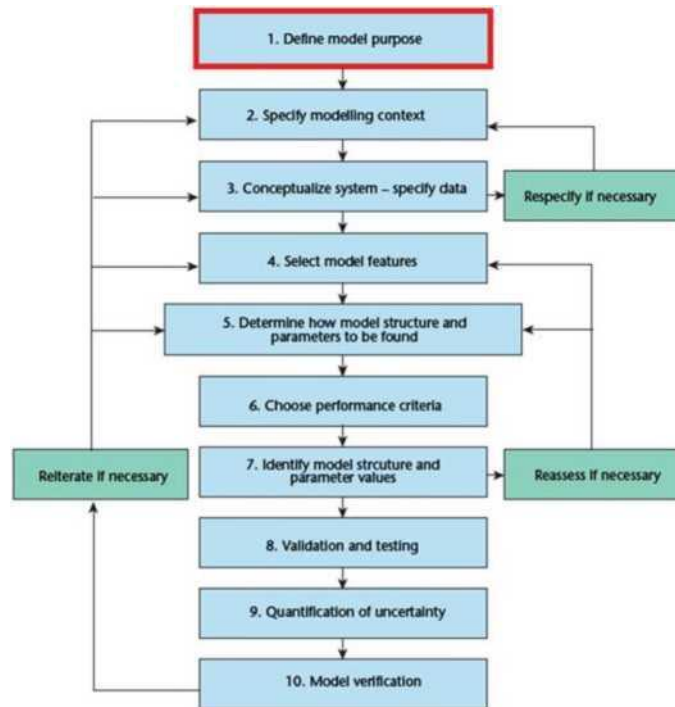
Model prakiraan pada awalnya sering dikembangkan dari desain berbasis *offline* dan untuk rencana pembelajaran, seperti model hidrograf yang pertama kali dikembangkan oleh Sherman pada 1932 (Sene, 2015). Aliran hidrograf sungai lalu diperhitungkan dengan penjumlahan hal yang berkorespondensi dengan distribusi sungai ditambah dengan input dari curah hujan. Pendekatan ini masih banyak digunakan dalam studi mengenai prakiraan banjir, sedangkan untuk penggunaan secara *real-time*, model berbasis *rainfall-runoff* sekarang umumnya lebih direkomendasikan. Sebagai contoh, salah satu pendekatan umum digunakan model hidrologi adalah mengintegrasikan besaran curah hujan dengan daerah aliran air yang ada. Model tambahan biasanya dimasukkan untuk memberi detail lebih pada daerah sekitar aliran air. Konsep konfigurasi sederhana dari prakiraan banjir berdasar data dari curah hujan dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17 Contoh konfigurasi dari model daerah tangkapan yang terintegrasi dengan sistem prakiraan banjir (Sene, 2008)

Kinerja dari model biasanya dioptimalkan untuk lokasi tempat di mana operasional dari prakiraan diperlukan. Adanya pengamatan secara *real-time* yang tersedia memberi kesempatan untuk memperbarui keluaran model sehingga prakiraan menjadi lebih dekat dengan nilai yang teramati. Proses ini disebut asimilasi data, diterapkan juga pada model yang terdistribusi, dalam hal ini biasanya diperlukan penyesuaian secara distribusi melalui domain model (Sene, 2015).

Dalam model berbasis *rainfall-runoff*, penerjemahan *rainfall* (CH) menjadi *runoff* merupakan hal yang kompleks. Dalam praktik dan kegunaannya, pendekatan pemodelan menggunakan *time-series* dalam teknik analisisnya sering diterapkan. Tahapan dalam pengembangan model prakiraan aliran secara *real-time* biasanya termasuk konfigurasi, kalibrasi, kuantifikasi dari ketidakpastian, percobaan, dan validasi. Proses detail pada prakiraan model banjir dijelaskan pada Gambar 18. Proses ini memiliki pertimbangan yang serupa dengan prakiraan yang lainnya. Prakiraan secara jangka panjang untuk verifikasi prakiraan dibutuhkan dalam peningkatan kualitas model (Sene, 2015).



Gambar 18 Proses pengembangan model prakiraan banjir (WMO (World Meteorological Organization), 2011)

Dalam banyak penerapan aplikasi hidrologi, statistik sangat berguna untuk memperoleh indikator jangka panjang aliran sungai. Dalam aplikasi prakiraan beberapa pengguna mendefinisikan nilai *threshold* dalam aplikasi peringatan dini dan untuk studi *forecast verification* (Sene, 2015).

2.2.3 Metode Penanganan Banjir

Metode penanganan banjir yang umum dilakukan (Mustamin dkk, 2023) adalah sebagai berikut:

A. Kanal Banjir

Kanal atau saluran dibangun khusus untuk mengalirkan air hujan agar tidak terjadi banjir. Dimensi kanal disesuaikan dengan debit rencana yang telah dihitung berdasar kala ulang tertentu yang menjadi dasar perencanaan.

B. Perbaikan dan Pemeliharaan Saluran/ sungai

Perbaikan saluran/sungai meliputi normalisasi dan rehabilitasi saluran. Normalisasi saluran dilakukan apabila dimensi saluran tidak seragam dan terjadi penyempitan di beberapa ruas tengah yang mengakibatkan pengurangan

kapasitas dan menghambat laju aliran. Rehabilitasi diperlukan untuk mengembalikan fungsi saluran sebagaimana mestinya yaitu dengan memperbaiki tebing/talud saluran yang rusak misalnya.

Pemeliharaan saluran memegang peranan penting dalam penanganan banjir. Dangkalnya saluran akibat sedimentasi menyebabkan berkurangnya kapasitas saluran yang pada akhirnya berakibat banjir. Untuk itu perlu pengerukan rutin untuk menjaga kemampuan saluran dalam menghantarkan aliran air sampai ke muara.

C. Tanggul dan Pintu pengatur

Tanggul sering kali di bangun di sepanjang sungai/saluran untuk meningkatkan kapasitas saluran dan diharapkan dapat menampung lebih banyak debit banjir sehingga tidak terjadi *over-topping* aliran.

D. Polder dan Pompa

Pintu-pintu pengatur seringkali dipakai sebagai upaya pengendalian aliran sehingga tidak terjadi banjir.

Di kota-kota pantai seringkali dibangun tanggul-tanggul laut yang dilengkapi dengan pintu- pintu pengatur untuk mencegah masuknya air laut ketika terjadi pasang naik.

E. Kolam Retensi dan Kolam Detensi

Kolam retensi dibangun untuk mengatur kelebihan aliran permukaan sehingga dapat terhindar dari bahaya banjir. Kolam retensi dibuat bukan hanya sebagai upaya pengendalian banjir tetapi juga sebagai upaya konservasi atau pelestarian air.

Sebagaimana kolam retensi, kolam detensi juga dibangun untuk mencegah terjadinya banjir. Pada kolam detensi air ditampung sementara waktu kemudian dialirkan kembali ke hilir badan air ketika puncak banjir telah lewat. Apabila *retention basin* selalu terisi air sehingga menyerupai danau maka *detention basin* lebih menyerupai danau kering karena hanya akan terisi air ketika air berlebih.

Fungsi *retarding basin* selain untuk memangkas puncak banjir, juga sebagai penyimpan air untuk dilepaskan pada saat musim kemarau dan meningkatkan konservasi air tanah karena selama air tertahan peresapan air terjadi. Dengan

adanya cadangan di *retarding basin*, pada musim kemarau air dapat dipakai untuk penggelontoran saluran drainase dan sungai-sungai di daerah hilir. Pembuatan *retarding basin* ramah lingkungan dapat diawali dengan inventarisasi lokasi sepanjang alur sungai dengan prioritas dari bagian tengah hingga hulu. Inventarisasi ini dimaksudkan untuk menemukan lokasi-lokasi kanan-kiri sungai yang bisa dijadikan lokasi *retarding basin*. Setelah lokasi-lokasi yang cocok ditemukan, dapat dilakukan pembebasan tanah dan dimulai pembuatan *retarding basin* secara bertahap.

F. Bendungan dan Waduk

Bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan/atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (PP No 37 Tahun 2010). Sedangkan waduk adalah wadah buatan yang terbentuk sebagai akibat dibangunnya bendungan (PP No 37 Tahun 2010). Berikut gambar bendungan dan waduk dapat diamati pada Gambar 19.



Gambar 19 Bendungan dan waduk (Ir. Soedibyo, 1993)

Waduk yang mempunyai faktor tampungan atau dapat menampung air, mempunyai efek terhadap aliran air di hilir waduk. Dengan kata lain waduk dapat merubah pola *inflow-outflow* hidrograf. Perubahan *outflow* hidrograf di hilir waduk biasanya menguntungkan terhadap pengendalian banjir, dengan adanya debit banjir yang lebih kecil dan perlambatan waktu banjir. Pengendalian banjir dengan waduk hanya dapat dilakukan pada bagian hulu

dan biasanya dikaitkan dengan pengembangan sumber daya air. Yang perlu diperhatikan dalam pengendalian banjir dengan waduk adalah perlambatan waktu tiba banjir, penurunan debit banjir yang dilepas ke hilir dan rasio alokasi volume waduk untuk pengendalian banjir terhadap volume untuk pengembangan dan pengelolaan sumber daya air (Kodoatie, 2013).

Air yang tertampung ini kemudian dapat dimanfaatkan sebagai suplai air bersih, irigasi, perikanan dan lain sebagainya. Tampungan di bangun di hulu aliran daerah yang terkena banjir untuk mencegah kelebihan air memasuki area tersebut. Tampungan yang khusus dibangun untuk mengantisipasi banjir disebut 'Situ' dan dibangun dengan timbunan/ urugan tanah di sekelilingnya sebagai tanggul.

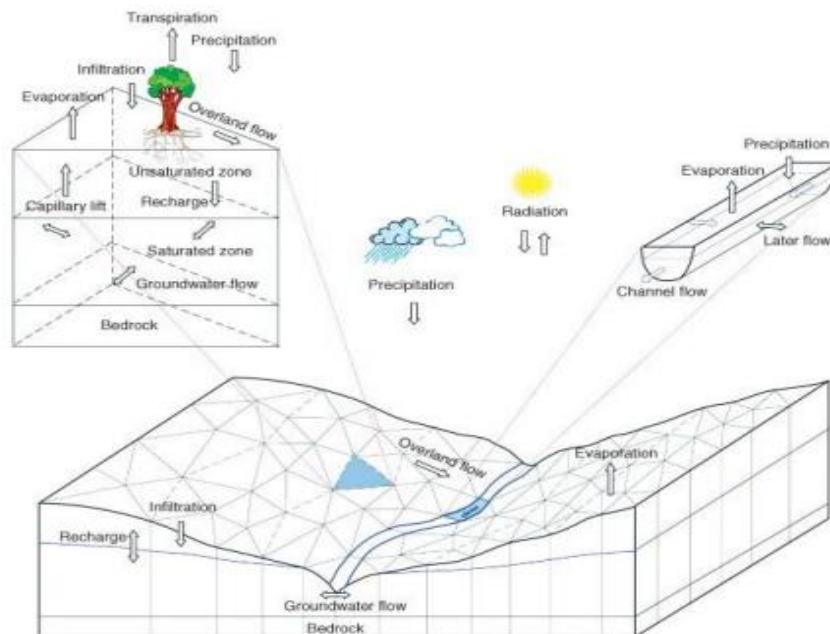
G. Embung (*Retention Basin*)

Embung atau cekungan penampung (*retention basin*) adalah kolam penampung kelebihan air hujan pada musim hujan dan digunakan pada saat musim kemarau (Deptan, 2013). Pembuatan embung dilakukan sebagai upaya konservasi air melalui pemanenan air hujan dan aliran permukaan (*rain fall and run off harvesting*) pada musim hujan untuk dimanfaatkan pada saat terjadi krisis air terutama pada musim kemarau. Sumber Air pada embung berasal dari air hujan, air limpasan, mata air tanah pada lubang galian embung, dengan teknis penggunaan air dapat dilakukan secara tradisional.

Embung dapat dibangun pada daerah cekungan (*gully*) yang di atasnya ada daerah tangkapan air untuk menampung air hujan dan aliran permukaan pada saat hujan, ataupun terdapat sumber/mata air yang selalu tersedia sepanjang tahun maupun sungai kecil yang airnya dapat ditampung masuk ke dalam embung.

2.2.4 Run Off Model

Runoff model memvisualisasikan apa yang terjadi pada sistem air akibat perubahan pada permukaan pendahulunya, vegetasi, dan peristiwa meteorologi (U.S. EPA, 2017). (Fadlin *et al.*, 2023) mendefinisikan *runoff model* sebagai seperangkat persamaan yang membantu dalam estimasi jumlah curah hujan yang berubah menjadi limpasan sebagai fungsi dari berbagai parameter yang digunakan untuk menggambarkan DAS. Struktur dari model menjelaskan bagaimana limpasan dikalkulasikan. Beberapa memiliki cara yang mudah dengan hanya memakai beberapa variabel, sedangkan yang lain membutuhkan berbagai macam variabel yang saling terkoneksi (Gambar 20). Struktur model tergantung dari persamaan yang dipakai oleh tiap model itu sendiri.



Gambar 20 Contoh struktur *runoff model* yang menunjukkan pergerakan fisis air melalui aliran di atas permukaan, evapotranspirasi, *infiltrasi*, pengulangan, dan air tanah (Qu, 2005)

Model empiris, disebut juga *data-driven model*, menggunakan hubungan statistik *non linear* antara *input* dan *output*. Untuk contoh model *rainfall-runoff* sederhana, *input* adalah curah hujan dan limpasan historis, dengan *output* adalah limpasan di lokasi yang ditentukan. Konsep dari *runoff model* tersebut

menginterpretasikan proses limpasan dengan menghubungkan komponen-komponen pada seluruh proses hidrologi. Variasi baik secara spasial maupun temporal digunakan dalam daerah *catchment* (tangkapan) yang digunakan ke dalam model secara fisis (Sene, 2015).

Curah hujan dan daerah reservoir pada daerah permukaan menjadi proses utama dalam sistem *runoff*. Ciri dan karakteristik dari *runoff* dapat dipengaruhi oleh perubahan vegetasi, kelembaban tanah, komponen meteorologi, dan kondisi pada daerah permukaan (Chahine, 1992). Simulasi *runoff* di daerah permukaan dapat membantu kita untuk mengetahui bagaimana perubahan dalam lingkungan memengaruhi limpasan dan siklus hidrologi yang ada.

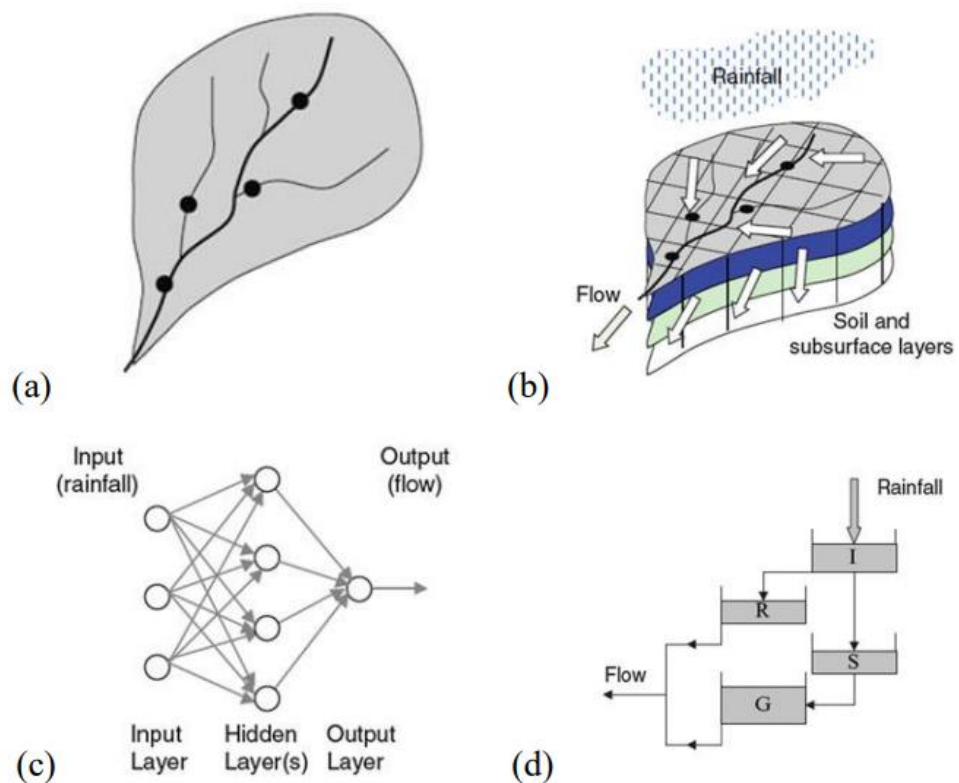
2.2.5 Rainfall-Runoff Model

(Sene, 2015) menjelaskan bahwa *Rainfall-runoff model* merupakan salah satu model hidrologi yang membentuk suatu komponen kunci dalam banyak sistem prakiraan. Tujuan utamanya adalah untuk menerjemahkan observasi atau prakiraan dari curah hujan ke dalam prakiraan aliran sungai. Faktor utama dari pemodelan ini menurut Sene adalah;

1. *Physically-based models* - biasanya menggunakan persamaan diferensial parsial untuk menggambarkan bagaimana curah hujan diterjemahkan menjadi limpasan. Jenis *physically-based model*, sangat cocok digunakan dengan *input* prakiraan hujan berbasis satelit dan pengamatan radar cuaca, meskipun rata-rata tangkapan hasil observasi *rain-gauge* menyediakan opsi lain. Nilai parameter biasanya diperkirakan dari hasil percobaan laboratorium dan lapangan serta nilai-nilai lain yang juga diterapkan pada hidrologi. Estimasi *initial* (awal) seringkali didasarkan pada analisa spasial pada *Geographic Information System* (GIS) dan faktor-faktor seperti jenis tanah, tutupan lahan, jalur aliran, geologi, dan topografi.
2. *Conceptual models* - menggunakan pendekatan konseptual yang lebih sederhana untuk mewakili konversi curah hujan menjadi limpasan. Sementara tipe *physically-based model* banyak digunakan secara *offline* dalam hidrologi dan studi sumber daya air, untuk aplikasi prakiraan

jangka pendek hingga menengah tipe *conceptual model* lebih umum digunakan. *Conceptual model* masih menggunakan distribusi formula tetapi memasukkan pula konsep secara sederhana pada beberapa atau seluruh proses kunci, seperti penyimpanan yang diilustrasikan pada Gambar 21.

3. *Data-driven models* - menggunakan fungsi transfer, jaringan saraf tiruan, dan pendekatan serupa untuk memperkirakan aliran sungai atas adanya data curah hujan yang tersedia dan kadang pula disebut sebagai *black-box models*. Untuk *driven-data model*, pemodelan melakukan berbagai pendekatan untuk menjalankan model sesuai tipe yang dibutuhkan. Misalnya, untuk jaringan saraf tiruan, *input* untuk setiap neuron biasanya ditimbang kemudian ditransformasikan ke *output* menggunakan aktivasi atau fungsi transfer. Sistem kemudian dikalibrasi dengan menyesuaikan faktor bobot dan menambah atau menghilangkan neuron, menggunakan metode *Bayesian*, algoritma genetika, dan pendekatan stokastik seperti penguatan dalam simulasi.

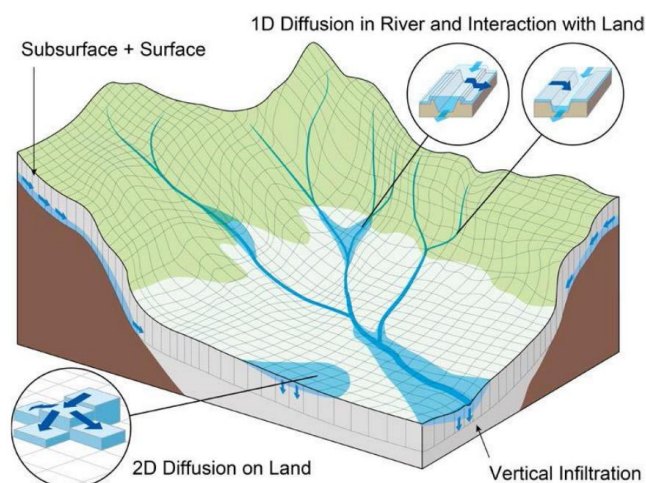


Gambar 21 Beberapa contoh sederhana rainfall-runoff model berbasis fisik, konseptual, dan berbasis data, tanpa komponen evapotranspirasi. (a) Rencana daerah tangkapan, (b) Physically-based model dengan tiga lapisan tanah dan bawah permukaan, (c) Model jaringan saraf tiruan dan, (d) Konsepual model dengan intersepsi, tanah, limpasan permukaan, dan penyimpanan air tanah (Sene, 2008)

2.3 Model RRI (Rainfall Runoff Inundation)

Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) adalah model dua dimensi yang mampu mensimulasikan limpasan curah hujan dan genangan banjir secara bersamaan (Sayama *et al.*, 2012a; Sayama, 2014; Sayama, Tatebe and Tanaka, 2015; Kudo *et al.*, 2016).

Model ini menangani lereng dan saluran sungai secara terpisah. Pada *grid cell* di mana aliran sungai berada, model mengasumsikan bahwa kemiringan dan sungai berada pada *grid cell* yang sama. Saluran didiskritkan sebagai satu garis di sepanjang garis tengah *grid cell* di atasnya. Aliran pada kemiringan *grid cell* dikalkulasikan dengan model gelombang difusi 2D, sedangkan aliran dari saluran sungai dihitung dengan model gelombang difusi 1D. Untuk representasi yang lebih baik dari proses *rainfall-runoff-inundation*, model RRI juga mensimulasikan aliran bawah permukaan, aliran *infiltrasi* vertikal, dan aliran permukaan (Gambar 22).



Gambar 22 Diagram skematik dari model Rainfall-Runoff-Inundation (Sayama, 2017)

Interaksi aliran antara saluran sungai dan kemiringan diperkirakan berdasarkan pada berbagai formula luapan, tergantung pada kondisi ketinggian air, dan

ketinggian tanggul.

2.3.1 Rainfall - runoff Inundation Model Equation

Metode untuk menghitung aliran lateral pada kemiringan *grid cell* dicirikan sebagai “Pemodelan Banjir berbasis sel tampungan” (Hunter dkk, 2007). Persamaan model diturunkan berdasarkan pada Persamaan (4), lalu untuk aliran tidak stabil yang bervariasi secara bertahap diturunkan oleh (Sayama, 2017) pada Persamaan Momentum (5) dan (6).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial qx}{\partial x} + \frac{\partial qy}{\partial y} = r - f \quad (4)$$

$$\frac{\partial qx}{\partial t} + \frac{\partial uqx}{\partial x} + \frac{\partial vqy}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (5)$$

$$\frac{\partial qy}{\partial t} + \frac{\partial uqy}{\partial x} + \frac{\partial vqy}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (6)$$

Keterangan :

- h : Tinggi air dari permukaan (m)
 qx, qy : Unit debit per satuan luas dalam arah x dan y (m²/dt)
 u, v : u dan v merupakan kecepatan aliran dalam arah x dan y (m/dt)
 r : Intensitas Hujan (mm/jam)
 f : Rata-rata laju *infiltrasi* (mm/jam)
 H : Tinggi air dari datum (m)
 ρ_w : Densitas air (kg/m³)
 g : Percepatan gravitasi (m/dt²)
 τ_x, τ_y : Belokan *stress* pada arah x dan y (N/m²)

Suku kedua pada ruas kanan persamaan (5) dan (6) dihitung dengan persamaan Manning.

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (7)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (8)$$

Dimana n adalah parameter kekasaran Manning,

Dalam pendekatan gelombang difusi, parameter inersia (inersia pada sisi kiri dari persamaan (5) dan (6) diabaikan). Selain itu, dengan memisahkan arah x dan arah y (yaitu mengabaikan parameter v dan u di persamaan (5) dan (6) berturut-turut), maka diperoleh persamaan :

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left|\frac{\partial H}{\partial x}\right|} \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) \quad (9)$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left|\frac{\partial H}{\partial y}\right|} \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial H}{\partial y}\right) \quad (10)$$

di mana sgn adalah fungsi signum

Model RRI mendiskrisasi persamaan konservasi massa secara spasial sebagai berikut :

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} + \frac{q_x^{i,j-1} - q_x^{i,j}}{\Delta x} + \frac{q_y^{i-1,j} - q_y^{i,j}}{\Delta y} = r^{i,j} - f^{i,j} \quad (11)$$

Di mana $q_x^{i,j}$, $q_y^{i,j}$ adalah debit keluaran pada arah x dan y pada sebuah sel grid pada titik (i,j).

Dengan menggabungkan persamaan (9), (10) dan (11), kedalaman air dan debit air dihitung pada setiap sel grid untuk setiap langkah waktu. Satu perbedaan penting antara model RRI dan model banjir lainnya yaitu model yang dulu menggunakan bentuk yang berbeda pada hubungan antara gradien hidrolis dan debit sehingga model itu bisa mensimulasikan aliran permukaan dan bawah permukaan dengan menggunakan algoritma yang sama. Model RRI mengganti persamaan (9) dan (10) dengan menggunakan persamaan (12) dan (13) dimana sebelumnya hal ini dibuktikan oleh (Ishihara, T. and Takasao, 1962) dan diformulasi menggunakan sebuah variable tunggal oleh (Takasao, T. and Shiiba, 1988) berdasarkan pada pendekatan gelombang kinematik. Persamaan pertama pada pers (12) dan (13) ($h \leq d_a$) menggambarkan aliran tunak bawah permukaan berdasarkan pada hukum darcy, sementara persamaan kedua ($d_a \leq h$) menggambarkan kombinasi dari aliran tunak bawah permukaan dan aliran permukaan. Dicatat bahwa untuk model gelombang kinematik, gradien hidrolis diasumsikan sama dengan kemiringan permukaan tanah, sementara model RRI

mengasumsikan bahwa yang menjadi gradien hidrolis adalah kemiringan permukaan air tanah.

$$q_x = \begin{cases} -k_a h \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) - k_a h \frac{\partial H}{\partial x}, & (d_a < h) \end{cases} \quad (12)$$

$$q_y = \begin{cases} -k_a h \frac{\partial H}{\partial y}, & (h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) - k_a h \frac{\partial H}{\partial y}, & (d_a < h) \end{cases} \quad (13)$$

Dimana k_a adalah konduktivitas hidraulik kondisi tunak pada arah lateral dan d_a adalah kedalaman tanah dikalikan dengan porositas efektif.

Persamaan (14) dan (15) juga dapat digunakan untuk mensimulasikan efek tunak dan tidak tunak aliran bawah permukaan serta aliran permukaan dengan variable tunggal H (Tachikawa et al. 2004, Sayama and McDonnell 2009 for English).

$$q_x = \begin{cases} -k_m d_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d_m) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x}, & (d_m < h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) - k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x}, & (d_a < h) \end{cases} \quad (14)$$

$$q_y = \begin{cases} -k_m d_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta \frac{\partial H}{\partial y}, & (h \leq d_m) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial y} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial y}, & (d_m < h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) - k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial y} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial y}, & (d_a < h) \end{cases} \quad (15)$$

Dicatat bahwa untuk memastikan kontinuitas perubahan debit ketika $h = d_m$, konduktivitas hidrolis lateral pada zona tidak tunak (k_m) dapat dihitung dengan $k_m = k_a / \beta$, sehingga k_m tidak lagi menjadi parameter dalam model tersebut.

Semua persamaan hubungan debit ini awalnya dikembangkan untuk

diaplikasikan pada areal hutan yang lembab dengan lapisan tanah sangat permeabilitas (sangat mudah tembus air), dimana aliran lateral bawah permukaan ini adalah mekanisme dominan dari *runoff*. Disisi lain untuk areal yang relatif lebih datar, proses *infiltrasi* vertikal selama periode awal dari hujan memiliki dampak yang lebih, pada skala banjir yang lebih besar karena itu *infiltrasi* vertikal dapat di jadikan sebagai bagian dari kehilangan pada simulasi kejadian tersebut. Disini menghitung kehilangan *infiltrasi* f dengan menggunakan model *infiltrasi* Green-Ampt (Raws ,et al, 1992).

$$f = k_v \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i) S_f}{F} \right] \quad (16)$$

Dimana k_v adalah konduktivitas hidrolik pada arah vertikal, ϕ adalah porositas tanah, θ_i adalah kadar air tanah awal \rightarrow (air yang terkandung pada satu volume tanah di kondisi awal tersebut) , S_f adalah nilai hisap tanah pada arah vertikal dibagian depan/permukaan dan F adalah kedalaman *infiltrasi* kumulatif.

Biasanya untuk area yang berbukit dimana aliran lateral bawah permukaan dan aliran tunak yang melebihi permukaan tanah mendominasi, persamaan (10) dan (11) (atau (12) dan (13)) dapat digunakan dengan pengaturan f sama dengan nol. (Catatan bahwa persamaan (12) dan (13) (atau (14) dan (15) secara implisit diasumsikan bahwa debit *infiltrasi* vertikal didalam sebuah volume tanah tidak terbatas/tak berhingga.) Disisi lain untuk daerah yang datar dimana aliran *infiltrasi* yang melebihi permukaan mendominasi, maka persamaa aliran permukaan (9) dan (10) dapat digunakan dengan mempertimbangkan *infiltrasi* vertikal pada persamaan (16). Jika *infiltrasi vertical* f dipasang sebagai angka bukan nol dan persamaan lateral bawah permukaan digunakan meskipun ada persamaan aliran permukaan, air bawah permukaan lateral akan ber-*infiltrasi* masuk ke dalam batuan dengan debit sebesar f .

Dan kita bisa lihat dari persamaan ini bahwa nilai parameter k_a , k_m dan k_v akan memberikan kita pertimbangan tentang persamaan apa yang digunakan misalnya pers (9) dan (10) digunakan ketika nilai k_a dan k_m adalah 0, kemudian (12) dan (13) jika $k_m = 0$ dan persamaan (16) tidak digunakan ketika $k_v = 0$.

Model gelombang difusi satu dimensi diterapkan pada *grid cell* sungai.

Geometri diasumsikan menjadi persegi panjang, yang bentuknya ditentukan oleh lebar W , kedalaman D , dan tinggi tanggul H_e . Ketika informasi geometri terperinci tidak tersedia, lebar dan kedalaman diperkirakan Sayama (2017) dari daerah hulu yang berpengaruh pada wilayah tersebut dengan satuan kilometer persegi hal ini dapat dilihat pada Persamaan 17 dan 18.

$$W = C_w \cdot A^{S_w} \quad (17)$$

$$D = C_D \cdot A^{S_D} \quad (18)$$

Keterangan :

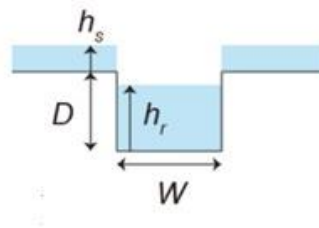
W : *Width* (lebar sungai)

D : *Depth* (kedalaman sungai)

C_w, S_w, C_D, S_D : Channel/Storage Width & Channel/Storage Depth
(Parameter geometri sungai)

A : Luas daerah tangkapan untuk tiap *cell grid* sungai (km^2)

Pertukaran air antara *cell grid* kemiringan dan *cell grid* sungai di atasnya dihitung pada setiap tahap waktu tergantung pada hubungan antara tingkat air di lereng, air sungai, tanggul, dan tanah. Gambar di bawah menunjukkan empat kondisi yang berbeda. Untuk setiap kondisi, diterapkan rumus *overtopping* yang berbeda untuk menghitung debit satuan panjang dari lereng ke sungai (q_{sr}) atau dari sungai ke lereng (q_{rs}), yang kemudian dikalikan dengan panjang vektor sungai pada setiap sel grid untuk menghitung total pertukaran laju aliran (Iwasa dan Inoue, 1982).

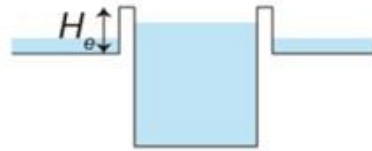


(a) Ketika muka air sungai lebih rendah dari muka tanah, q_{sr} dihitung dengan penurunan rumus sebagai berikut:

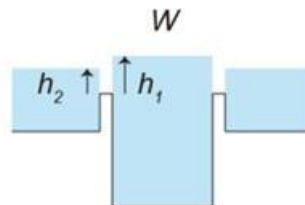
$$q_{sr} = \mu_l h_s \sqrt{g \cdot h_s} \quad (19)$$

di mana μ_l adalah koefisien konstanta ($= (2/3)^{3/2}$), dan h_s adalah kedalaman air pada

bagian lereng. Se jauh muka air sungai lebih rendah dari muka tanah, persamaan yang sama digunakan bahkan untuk tanggul sehingga air lereng dapat mengalir ke sungai.



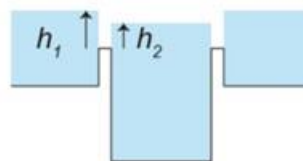
(b) Ketika permukaan air sungai lebih tinggi dari permukaan tanah dan permukaan air sungai dan lereng lebih rendah dari ketinggian tanggul, diasumsikan tidak ada pertukaran air antara lereng dan sungai.



(c) Ketika muka air sungai lebih tinggi dari Puncak tanggul dan muka air lereng, rumus berikut digunakan untuk menghitung qrs aliran limpasan dari sungai ke lereng.

$$q_{rs} = \begin{cases} \mu_2 h_1 \sqrt{2 g h_1} & h_2/h_1 \leq 2/3 \\ \mu_3 h_2 \sqrt{2 g (h_1 - h_2)} & h_2/h_1 > 2/3 \end{cases} \quad (20)$$

di mana μ_2 dan μ_3 adalah koefisien konstanta ($=0.35, 0.91$), dan h_1 adalah selisih antara muka air sungai dan puncak tanggul.



(d) Bila muka air lereng lebih tinggi dari tinggi tanggul dan muka air sungai, rumus yang sama seperti (20) digunakan untuk menghitung aliran luapan qsr dari lereng ke sungai. Dalam hal ini, h_1 adalah perbedaan elevasi antara lereng dan sungai, dan h_2 adalah perbedaan elevasi antara sungai dan puncak tanggul.

Persamaan *Runge-Kutta* juga diterapkan pada model RRI. Metode ini memecahkan persamaan diferensial biasa dengan rumus *Runge-Kutta* dan

memperkirakan kesalahannya dengan rumus urutan maju untuk mengendalikan *time-step* (Cash, J. R. dan Karp, 1990). *Error* diestimasi menggunakan algoritma Runge-Kutta orde ke-5 untuk mengadaptasi *time-step*.

Bentuk umum dari rumus Runge-Kutta orde kelima adalah

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \Delta t f(t, h_t) \\
 k_2 &= \Delta t f\left(t + a_2 \Delta t, h_t + b_{21} k_1\right) \\
 &\dots \\
 k_5 &= \Delta t f\left(t + a_5 \Delta t, h_t + b_{51} k_1 + \dots + b_{55} k_5\right) \\
 h_{t+1} &= h_t + c_1 k_1 + c_2 k_2 + c_3 k_3 + c_4 k_4 + c_5 k_5 + c_6 k_6 + O\left(\Delta t^6\right)
 \end{aligned} \tag{21}$$

Sementara rumus orde keempat yang diikutkan (Cash, J. R. dan Karp, 1990) adalah

$$h_{t+1}^* = h_t + c_1^* k_1 + c_2^* k_2 + c_3^* k_3 + c_4^* k_4 + c_5^* k_5 + c_6^* k_6 + O\left(\Delta t^6\right) \tag{22}$$

Dengan mengurangi h_{t+1} dikurangi h_{t+1}^* , *error* dapat diperkirakan dengan menggunakan k_1 hingga k_6 sebagai berikut,

$$\delta = h_{t+1} - h_{t+1}^* = \sum_{i=1}^6 (c_i - c_i^*) k_i \tag{23}$$

Nilai konstanta (a_i, b_{ij}, c_i, c_i^*) yang digunakan dalam studi ini adalah yang diperkenalkan oleh Cash dan Karp (1990). Jika S melebihi akurasi yang diinginkan S_d , h_{t+1} dihitung ulang dengan langkah waktu yang lebih kecil (Δt_{post}).

$$\Delta t_{post} = \max\left(0.9 \Delta t \left|\frac{\delta_d}{\delta}\right|^{0.25}, 0.5 \Delta t\right) \tag{24}$$

Seperti dijelaskan di atas, model RRI menghitung lereng, sungai, dan interaksi lereng-sungai. Pengguna model menentukan langkah waktu untuk interaksi lereng-sungai k_t , yang juga digunakan sebagai langkah waktu awal untuk perhitungan kemiringan. Karena perhitungan sungai biasanya memerlukan langkah waktu yang lebih kecil karena kecepatan dan kedalaman air yang lebih tinggi, model ini memungkinkan perhitungan sungai untuk dilanjutkan secara mandiri dengan langkah waktu yang berbeda hingga langkah waktu perhitungan kemiringan sungai berikutnya. Langkah waktu awal untuk perhitungan sungai (k_{tr}) juga dapat

ditentukan oleh pengguna model sebagai pembagi bersama dari kt.

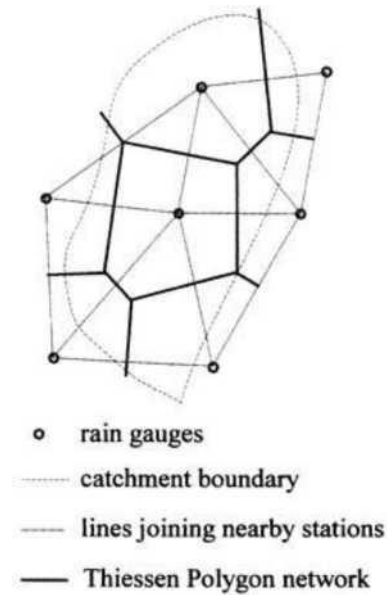
Prosedur model RRI kalkulasinya berawal dari kemiringan lahan, sungai, lalu interaksi antara kemiringan dan sungai.

2.3.2 Data topografi Rainfall-runoff Inundation

Data topografi merupakan suatu data penting dalam distribusi aliran yang terjadi akibat curah hujan. Data topografi yang mencakup elevasi dan kemiringan lahan adalah contoh hal kompleks yang dapat diperhitungkan. Data topografi suatu wilayah dapat mempengaruhi variabilitas spasial dalam pengembangan prakiraan hidrometeorologi (Sene, 2015). Untuk model *Rainfall-runoff Inundation*, data topografi disediakan oleh situs USGS HydroSHEDS, yang menyediakan kumpulan data skala global yang ditawarkan oleh *United States Geological Survey* (USGS). Data mencakup ketinggian, arah aliran, dan akumulasi aliran. Data ini menyediakan informasi hidrografi dalam format yang konsisten dan komprehensif untuk aplikasi skala regional dan global. Data HydroSHEDS menawarkan serangkaian data referensi geografis (vektor dan raster), termasuk sistem aliran, batasan drainase, dan lapisan data tambahan seperti akumulasi aliran, jarak, dan informasi topologi sungai. Sistem aliran sungai yang diturunkan dibandingkan secara visual dengan DCW, ArcWorld, berbagai atlas, dan peta kertas (Lehner, 2013).

2.3.3 Data curah hujan Rainfall-runoff Inundation

Dalam model RRI, secara *default* ada tiga data yang bisa digunakan sebagai *input* dari model RRI yaitu data observasi curah hujan dengan interpolasi Thiessen secara poligonal, data satelit yang berasal dari GSMaP dan TRMM atau 3B42RT. (Schumann, 1998) menjelaskan mengenai metode poligon Thiessen didasarkan pada asumsi bahwa jumlah yang diukur pada setiap stasiun menuju stasiun berikutnya dengan ke segala arah, yang berarti bahwa untuk tiap titik curah hujan sama dengan curah hujan yang diamati pada pengukur curah hujan terdekat. Nilai dari catatan *rain-gauge* diperkirakan melalui perhitungan menggunakan sistem pola Thiessen berdasar area relatifnya. Luas setiap poligon digunakan untuk menimbang jumlah curah hujan pada stasiun di tengah poligon (Gambar 23). Metode ini tidak mempertimbangkan perbedaan orografis dalam distribusi curah hujan.



Gambar 23 Contoh pola poligon Thiessen (Thiessen, 1911)

2.3.4 Curah hujan dengan Radar Cuaca

Intensitas curah hujan disebut juga laju curah hujan didefinisikan oleh (Rauber dan Nesbit, 2014) sebagai volume air yang mengalir ke bawah melalui sebuah permukaan horizontal, per satuan luas, per satuan waktu. Definisi ini menyiratkan bahwa laju curah hujan dapat diukur pada ketinggian apa pun di atmosfer, tidak hanya di permukaan. Berdasarkan definisi ini, tingkat curah hujan akan memiliki satuan volume/area/waktu atau $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s} = \text{ms}^{-1}$. Karenanya curah hujan memiliki satuan kecepatan. Pada umumnya, laju curah hujan dinyatakan dalam satuan mm/h. *Precipitation gauge (rain-gauge)* adalah perangkat yang mengumpulkan dan mengukur curah hujan. Beberapa jenis alat pengukur, beberapa akumulasi curah hujan dibaca secara manual dari waktu ke waktu dan lainnya mencatat akumulasi curah hujan baik secara elektronik atau di atas kertas grafik.

Radar merupakan suatu *critical tool* dalam model hidrologi. Radar memungkinkan ahli meteorologi untuk secara rutin mendeteksi tornado dan banjir dalam waktu yang cukup untuk memperingatkan masyarakat mencari perlindungan. Radar adalah satu-satunya alat yang dapat mendeteksi secara detail bentuk dari badai. Penggunaan data radar saat ini diasimilasikan dengan model numerik dalam penggunaannya untuk penelitian maupun prakiraan (Rauber dan Nesbit, 2014).

Karena pentingnya curah hujan, ahli radar meteorologi melakukan penelitian untuk membangun hubungan antara faktor reflektifitas radar dan tingkat curah hujan. Dijelaskan oleh Rauber dan Nesbitt (2014), studi empiris membandingkan faktor reflektifitas radar dan laju curah hujan di berbagai jenis cuaca menunjukkan suatu bentuk persamaan (25).

$$Z = Z_R \left(\frac{R}{R_0} \right)^b \quad (25)$$

Keterangan

Z : Reflektivitas radar

Z_R, b : Konstanta

R : Laju curah hujan secara normal

Dalam aplikasi radar cuaca, laju curah hujan R secara normal diestimasi oleh perhitungan faktor Z reflektivitas dari radar. Maka dari itu digunakanlah persamaan (25).

$$R = R_Z \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (25)$$

Keterangan :

R_Z : Nilai R ketika $Z = Z_0$

Z_0 : Referensi nilai dari Z ($1 \text{ mm}^6 \text{ mm}^{-3}$)

(Pessoa M. L., Bras R. L., 1993) menyebutkan bahwa kejadian hujan dapat bervariasi dalam skala ruang dan waktu secara bersamaan. Hal tersebut menunjukkan bahwa variabilitas secara spasial dari fenomena hidrologi dapat lebih secara langsung disimulasikan melalui radar cuaca. Walaupun radar tidak dapat menjelaskan jumlah dari curah hujan secara pasti, radar tetap akan memberikan informasi mengenai variasi spasial dan evolusi dari peristiwa hujan. Penelitian penggunaan model simulasi hidrologi dengan *input* dari radar cuaca untuk peristiwa banjir di Okutone pada tahun 2001 menunjukkan bahwa perhitungan curah hujan dari radar cuaca memberi pola spasial yang lebih baik daripada perhitungan data yang berasal dari data *rain-gauge* (Yang D., Koike T., 2004)

Model prediksi atau prakiraan banjir biasanya mencakup representasi dari *inflow*, *outflow*, dan *gate-operations* serta kemungkinan hal lain seperti curah hujan secara langsung dan penguapan di permukaan air (WMO, 2011). *Range* dari pemodelan berawal dari keseimbangan air sederhana lalu melakukan pendekatan

hingga penjalaran aliran, dan model hidrodinamis. Teknik probabilistik semakin sering digunakan, terutama untuk prakiraan jangka panjang dan aplikasi yang memiliki faktor risiko tinggi. Data radar cuaca dapat diturunkan menjadi produk-produk yang memiliki fungsi sesuai apa yang pengguna data radar butuhkan.

A. Produk *Column Maximum* (CMAX)

Produk CMAX menghasilkan gambar *top view* dalam arah vertikal dengan nilai tertinggi, setiap piksel mewakili kolom secara vertikal. Pengaturan awal produk SRI dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24 Contoh pengaturan awal produk CMAX (Leonardo, 2018)

Pada pilihan *image*, *range* dipilih untuk menampilkan citra sesuai pilihan dalam jarak yang dibutuhkan. *Size* merupakan besaran resolusi dari citra yang akan ditampilkan. *Height* merupakan pengaturan untuk menghitung ketinggian data yang akan diukur dari data topografi di atas permukaan laut. Sedangkan *Bottom* menghitung data dari tinggi dasar di atas permukaan laut (Leonardo, 2018).

B. Produk *Precipitation Accumulation* (PAC)

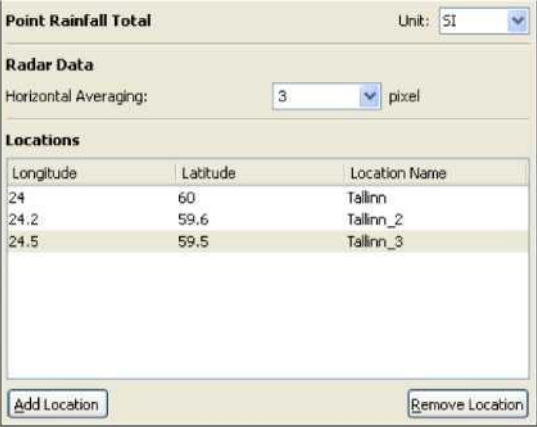
Presipitasi yang turun dalam periode tertentu dari suatu waktu secara permanen diproses dengan pengulangan dari jadwal waktu atau hanya setelah waktu aksi pengulangan. Setiap waktu *input* dari produk tersedia dan perbaruan dari produk PAC dihitung. Pengaturan awal produk SRI dapat dilihat pada Gambar 25.

Gambar 25 Contoh pengaturan awal produk PAC (Leonardo, 2018)

Akumulasi dari PAC diatur dalam *setting Accumulation* dan *Mode*, dimana *interval* digunakan untuk mengatur selang atau jarak waktu yang digunakan, dalam hitungan hari, jam, dan menit. Dalam pilihan *mode* terdapat pilihan untuk cara menghitung dari total presipitasi yang ada, tiap-tiap pilihannya yaitu 'average', 'look forward', dan 'look backward'. Pengaturan *Timed PAC/Fixed Start* digunakan untuk menghitung keseluruhan PAC atau diatur dalam kurun waktu tertentu sesuai kebutuhan pengguna (Leonardo, 2018).

C. Produk Point Rainfall Total (PRT)

Produk PRT menyediakan informasi mengenai akumulasi CH pada lokasi yang dipilih pada jangkauan radar dalam waktu yang ditentukan. PRT merupakan produk turunan kedua dengan menggunakan *input* dari produk PAC. Akumulasi CH dihitung terhadap lokasi yang ditentukan dan berada dalam jangkauan radar cuaca. Pengaturan awal produk SRI dapat dilihat pada Gambar 26.



The screenshot shows the 'Point Rainfall Total' software interface. At the top right, there is a 'Unit' dropdown menu set to 'SI'. Below this is the 'Radar Data' section, which includes a 'Horizontal Averaging' dropdown menu set to '3' and the unit 'pixel'. The 'Locations' section contains a table with three columns: 'Longitude', 'Latitude', and 'Location Name'. The table lists three locations: 'Tallinn' (Longitude: 24, Latitude: 60), 'Tallinn_2' (Longitude: 24.2, Latitude: 59.6), and 'Tallinn_3' (Longitude: 24.5, Latitude: 59.5). At the bottom of the interface, there are two buttons: 'Add Location' and 'Remove Location'.

Longitude	Latitude	Location Name
24	60	Tallinn
24.2	59.6	Tallinn_2
24.5	59.5	Tallinn_3

Gambar 26 Contoh pengaturan awal produk PRT (Leonardo, 2018)

Rata-rata secara horizontal diukur dalam satuan pixel. Letak dan nama lokasi diatur sesuai koordinat bujur (*longitude*) dan lintang (*latitude*) yang ingin diketahui. (Leonardo, 2018).

2.4 Kerangka Pikir

Kerangka pemikiran penelitian yang dilakukan, disajikan dalam bentuk bagan alir pada Gambar 27

Gambar 27 Kerangka Pikir Penelitian