

**ANALISIS BANJIR DENGAN MENGGUNAKAN *RAINFALL-RUNOFF-
INUNDATION (RRI) MODEL* DI DAS SEKAMPUNG, PROVINSI
LAMPUNG**

(Tesis)

Oleh

**AULIA FIKRI
NPM 1925011012**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**ANALISIS BANJIR DENGAN MENGGUNAKAN *RAINFALL-RUNOFF-
INUNDATION (RRI) MODEL* DI DAS SEKAMPUNG, PROVINSI
LAMPUNG**

Oleh

AULIA FIKRI

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

ANALISIS BANJIR DENGAN MENGGUNAKAN *RAINFALL-RUNOFF-INUNDATION (RRI) MODEL* DI DAS SEKAMPUNG, PROVINSI LAMPUNG

AULIA FIKRI

1925011012

Dampak banjir sangat berisiko dalam hal sosial ekonomi kehidupan masyarakat di DAS Sekampung. Dalam studi ini, model hujan-limpasan-genangan (*RRI*), yang mampu mensimulasikan limpasan hujan dan genangan banjir secara simultan, digunakan untuk meningkatkan pemahaman tentang karakteristik banjir di wilayah ini dengan menggunakan curah hujan berbasis satelit. Data masukan untuk simulasi ini meliputi data topografi *HydroSHEDS*, data curah hujan *GSMaP*, data tata guna lahan *GLCNMO*, dan penampang melintang sungai.

Dalam studi ini, dikaji pola banjir pada tahun 2001-2010 yang telah dipilih di Daerah Aliran Sungai Sekampung. Hasil simulasi dibandingkan dengan debit yang teramati di stasiun pemantauan di sepanjang sungai dan peta genangan dari citra satelit serta data banjir lapangan. Hasilnya menunjukkan pola debit yang berkesesuaian yang antara debit yang diamati dan yang disimulasikan, namun dengan indikator statistik yang kurang baik efisiensi *Nash-Sutcliffe NSE = -1,308* di Bendung Agroguruh. Model ini memprediksi genangan dengan cukup baik dibandingkan dengan data satelit dan kejadian di lapangan. Oleh karena itu, *RRI Model* cukup berhasil digunakan untuk mensimulasikan genangan banjir dengan menggunakan kumpulan data curah hujan jaringan di DAS Sekampung. Namun, perkiraan yang kurang tepat mungkin disebabkan oleh ketidakpastian data masukan, geometri sungai, skala besar cekungan, resolusi kasar data topografi, dan kesalahan pada citra penginderaan jauh dalam mendeteksi luas banjir.

Kata kunci: *RRI Model, Genangan, Banjir, DAS Sekampung*

ABSTRACT

FLOOD ANALYSIS USING RAINFALL-RUNOFF-INUNDATION (RRI) MODEL IN SEKAMPUNG BASIN, LAMPUNG PROVINCE

AULIA FIKRI

1925011012

The impact of flooding is very risky in terms of socio-economic life of people in the Sekampung Basin. In this study, the rainfall-runoff-inundation (RRI) model, which is capable of simulating rainfall runoff and flood inundation simultaneously, was used to improve the understanding of flood characteristics in this region using satellite-based rainfall. Input data for the simulation included HydroSHEDS topographic data, GSMaP rainfall data, GLCNMO land use data, and river cross sections.

In this study, flood patterns for the years 2001-2010 were examined in selected areas of the Sekampung River Basin. The simulation results were compared with observed discharges at monitoring stations along the river and inundation maps from satellite images and field flood data. The results show a good agreement between observed and simulated discharge patterns, but with a poor statistical indicator of Nash-Sutcliffe efficiency $NSE = -1.308$ at Agroguruh weir. The model predicted inundation reasonably well compared to satellite data and field events. Therefore, the RRI model was successfully used to simulate flood inundation using the networked rainfall dataset in the Sekampung Basin. However, the underestimation may be due to the uncertainty of the input data, river geometry, the large scale of the basin, the coarse resolution of the topographic data, and errors in the remote sensing imagery in detecting the flood extent.

Keyword: *RRI Model, Inundation, Flood, Sekampung River Basin.*

Judul Tesis : **ANALISIS BANJIR DENGAN MENGGUNAKAN *RAINFALL-RUNOFF-INUNDATION (RRI) MODEL* DI DAS SEKAMPUNG, PROVINSI LAMPUNG**

Nama Mahasiswa : **Aulia Fikri**

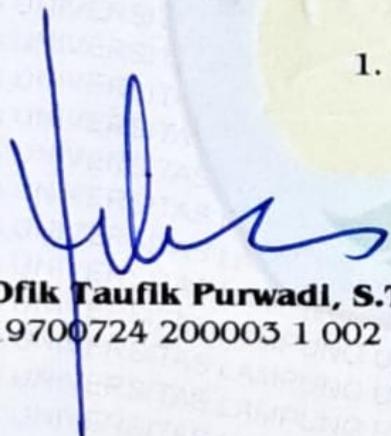
Nomor Pokok Mahasiswa : 1925011012

Program Studi : Magister Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

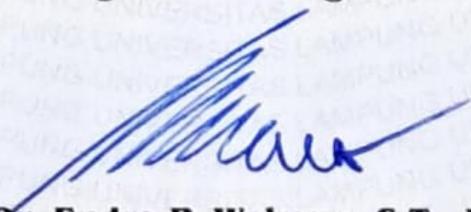
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T., M.T.
NIP 19700724 200003 1 002


Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.
NIP 19670514 199303 1 002

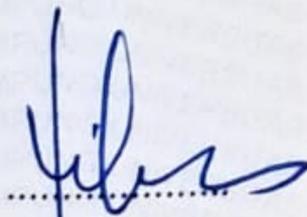
2. Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil


Dr. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.
NIP 19700129 199512 1 001

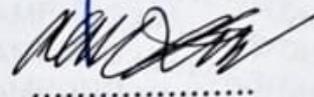
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

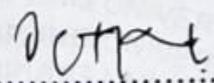
Ketua : **Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T., M.T.**



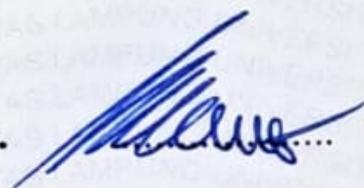
Sekretaris : **Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Prof. Dr. Dyah Indriana K., S.T., M.Sc.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928/200112 1 002



3. Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Iq. Murhadi, M.Si.

NIP 19640526 198902 1 001



4. Tanggal Lulus Ujian Tesis : **17 Juni 2023**

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul "*Analisis Banjir Dengan Menggunakan Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model di DAS Sekampung, Provinsi Lampung*" adalah karya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan serta pengutipan atas karya penulis lain dengan cara tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiarisme.
2. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 Juni 2023

Pembuat Pernyataan



Aulia Fikri

NPM. 1925011012

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Kabupaten Lampung Tengah, Lampung pada tanggal 11 April 1993, sebagai anak ketiga dari empat bersaudara, dari pasangan Bapak Kanti Wibowo dan Ibu Musniah. Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN 1 Sukanegara, Bangunrejo pada tahun 2005, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP N 1 Bangunrejo pada tahun 2008, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Kalirejo pada tahun 2011.

Pada tahun 2011, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN dan menyelesaikan studi Sarjana Teknik Sipil Bidang Hidroteknik dengan baik. Pada tahun 2019, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Pascasarjana Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya tesis ini dapat diselesaikan. Sholawat serta salam marilah kita sanjungkan kejunjungan nabi kita Muhammad SAW, mudah-mudahan kita mendapatkan syafaatnya di yaumul akhir kelak.

Tesis dengan judul “*Analisis Banjir Dengan Menggunakan Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model di DAS Sekampung, Provinsi Lampung*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung;
2. Bapak Dr. Endro P. Wahono, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil sekaligus penguji kedua. Terima kasih untuk masukan dan saran-saran pada saat penyusunan tesis ini;
3. Bapak Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T., M.T., selaku Pembimbing Utama atas kesediaannya untuk memberikan bimbingan, saran, dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini;
4. Bapak Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D., selaku Pembimbing Kedua sekaligus Pembimbing Akademik atas kesediaan memberikan bimbingan, saran, dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini;
5. Ibu Prof. Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc., selaku Penguji Utama. Terima kasih untuk masukan dan saran pada saat penyusunan tesis ini;
6. Bapak dan Ibu Staf Administrasi Program Pascasarjana Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung;

7. Bapak Kanti Wibowo dan Ibu Musniah tersayang yang senantiasa mendoakan terus tiada henti demi cita-cita saya, serta Seluruh kakak-kakak tercinta Mb. Desi Susanti dan Mas Nur Zen, Mas Hari Purwanto dan Mb. Asih serta Adik bungsu tercinta Hisam Ahmad Fahri. Terima kasih atas bantuan dan sokongannya selama ini, mudah-mudahan kebersamaan kita terus terjaga.
8. Istri tercinta Rizka Dwie Merlinda Inneke Putri dan Putriku tersayang Aisyah Juma Rifaulia yang selalu memberikan motivasi, dukungan doa dan kasih sayang selama ini.
9. Ibu Rusmini S dan Ayah Riduan, serta kakak adik tersayang Ayuk Renita Destika Amelia dan Bang Hendra Saputra, serta Adik Ridho Trianta Aji Putra dan Rian Ahmad Wibisana yang senantiasa memberikan doa restu, kasih sayang dan dukungan baik materi maupun moral.
10. Keponakan – keponakan tersayang Lie Dea G, Lie Vincent G, Aqilah Rahma Zein, Nayla, Agam Alghifari Zein, dan Ummi Salamah yang telah menghibur.
11. Seluruh teman-teman Magister Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah membantu dalam menyelesaikan penulisan tesis ini.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
Penulis berharap semoga tesis ini dapat berguna dan bermanfaat serta dapat memberikan sumbangan ilmu pengetahuan bagi khalayak secara umum dan khususnya bagi mahasiswa/i Jurusan Teknik Sipil.

Bandar Lampung, Juni 2023

Penulis

Aulia Fikri

HALAMAN PERSEMBAHAN

Teriring Doa dan Cinta,

Karya ini penulis persembahkan untuk orang tua, istri, anak, kakak-kakak, adik-adik, dan seluruh keluarga besar yang selalu memberikan harapan bagi penulis, juga segenap rekan-rekan serta pembaca sekalian.

Katakanlah: “Kalau sekiranya lautan menjadi tinta untuk (menulis) kalimat-kalimat Tuhanku, sungguh habislah lautan itu sebelum habis (ditulis) kalimat-kalimat Tuhanku, meskipun Kami datangkan tambahan sebanyak itu (pula)”.

(Q.S. Al-Kahfi: 109)

“ Aku tidak menciptakan jin dan manusia melainkan agar mereka beribadah kepada-Ku”

(Q.S. Az-Zariyat : 56)

“Manusia berhasil dengan perbuatannya.
jika saya tidak pernah mencoba, bagaimana saya bisa merasa puas.
jika kesuksesan saya begitu mudah, bagaimana saya bisa menjadi contoh.”

_RiDMIP

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
HALAMAN PERSETUJUAN.....	v
MENGESAHKAN.....	vi
LEMBAR PERNYATAAN	vii
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Bencana Banjir	4
2.2. Daerah Aliran Sungai (DAS)	4
2.3. DAS Sekampung	5
2.4. Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Penginderaan Jauh.....	8
2.4.2 Data <i>Grid</i> dan Penginderaan Jauh.....	9
2.5. Pemodelan Banjir Terkini	10
2.5.1 Pemodelan Banjir	11
2.6. <i>Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model</i>	12
2.6.1 Struktur Model	15
2.6.2 Persamaan Dasar <i>RRI Model</i>	16
2.7. Kalibrasi dan Validasi <i>RRI Model</i>	24
2.7.1 Kalibrasi dan Validasi Debit Banjir	25
III. METODE PENELITIAN.....	27
3.1. Lokasi Penelitian	27
3.2. Pengumpulan Data dan Pengolahan Data	28
3.2.1 Data Topografi	28
3.2.2 Data Hujan	36
3.2.3 Data Evaporasi	41

3.2.4	Data Geometri Sungai	42
3.2.5	Data Tutupan Lahan dan Penggunaan Lahan.....	44
3.3.	Pemodelan <i>Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)</i>	45
3.3.1	Tahapan Pemodelan <i>RRI</i>	45
3.3.2	Hasil Pemodelan.....	52
3.4.	Kalibrasi, Validasi dan Komparasi Model	56
3.5.	Diagram Alir Penelitian	57
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	58
4.1.	Analisis Data	58
4.1.1	Pengolahan Data Topografi.....	58
4.1.2	Pengolahan Data Hujan.....	60
4.1.3	Pengolahan Data Geometri Sungai	62
4.1.4	Pengolahan Penggunaan Lahan.....	64
4.2.	Analisis Pemodelan <i>RRI Model</i>	68
4.2.1	Hasil Pemodelan.....	68
4.2.2	Kalibrasi, Validasi Model	69
4.2.3	Komparasi Model.....	72
V.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	77
5.1.	Kesimpulan.....	77
5.2.	Saran.....	77
	DAFTAR PUSTAKA	80
	LAMPIRAN.....	86

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Rangkuman <i>dataset</i> yang digunakan	28
Tabel 2. Rangkuman <i>dataset GLCNMO v2</i> yang digunakan.....	44
Tabel 3. Modifikasi sistem legenda yang digunakan pada <i>RRI Model</i>	65
Tabel 4. Nilai Parameter pada kondisi (A), (B) dan (C)	67
Tabel 5. Parameter <i>Green-Ampt Infiltration</i> untuk berbagai jenis tanah.....	67

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Peta DAS Sekampung pada Wilayah Sungai Seputih-Sekampung	6
Gambar 2. Skema Pengelolaan Way Sekampung	7
Gambar 3. Skema klasifikasi teknik pemodelan banjir.....	10
Gambar 4. Jenis-jenis aplikasi pemodelan banjir konvensional	12
Gambar 5. Gambaran simulasi <i>Rainfall-Runoff-Inundation Model</i>	13
Gambar 6. Diagram Skema <i>Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model</i>	16
Gambar 7. Kondisi pertukaran air pada tingkat air lereng, air sungai, tanggul dan tanah.....	23
Gambar 8. Peta lokasi studi DAS Sekampung.....	27
Gambar 9. Menjalankan ArcMap dan menambahkan data topografi <i>dem, dir</i> dan <i>acc</i>	30
Gambar 10. Tampilan data <i>acc</i> dengan diperbesar sesuai cakupan DAS untuk proses pembuatan titik <i>outlet/pout point</i>	30
Gambar 11. Pembuatan titik <i>outlet/pour point</i> pada muara Way Sekampung.....	31
Gambar 12. Penggunaan <i>toolbox Watersheds</i> untuk melakukan delineasi DAS..	32
Gambar 13. Hasil delineasi DAS Sekampung	32
Gambar 14. Data topografi <i>dem, dir, acc</i> dilakukan <i>extract</i> dengan parameter <i>mask</i> dari delineasi DAS Sekampung.....	33
Gambar 15. Data topografi <i>dem</i> yang telah di <i>extract</i> dengan <i>toolbox extract by mask</i>	33
Gambar 16. Data <i>header</i> dari hasil <i>export</i> format ASCII pada data topografi	34
Gambar 17. Tampilan <i>dashboard JAXA</i>	36
Gambar 18. Hasil file “ <i>list.txt</i> ” yang berisi <i>file list gsmmap</i>	37
Gambar 19. <i>Control file “calc_area_gsmmap”</i> untuk menghitung cakupan hujan DAS.....	38

Gambar 20. Hasil <i>output file</i> “ <i>calc_area_gsmmap</i> ” sebagai <i>control file</i> pembacaan data spasial.....	39
Gambar 21. Hasil data curah hujan “ <i>rain.dat</i> ” sebagai <i>control file</i> pembacaan data spasial.....	39
Gambar 22. Data yang <i>x y</i> data hujan akan digunakan untuk <i>control file</i> “ <i>RRI_Input.txt</i> ”	40
Gambar 23. Pengaturan <i>control file rainBasin</i> untuk menghitung hujan rerata DAS.....	41
Gambar 24. Pengaturan <i>control file</i> program “ <i>makeRiver3</i> ” dalam penentuan geometri sungai.....	43
Gambar 25. Pengaturan parameter dalam pembentukan geometri sungai.....	43
Gambar 26. Tampilan proses perhitungan <i>RRI Model</i>	51
Gambar 27. Pengaturan <i>control file calcHydro</i> untuk menghitung debit simulasi (hidrograf) model pada titik lokasi yang ditentukan.....	52
Gambar 28. Pengaturan <i>control file rainBasin</i> untuk menghitung hujan rerata DAS.....	53
Gambar 29. Menentukan data <i>loc_i</i> , <i>loc_j</i> pada <i>file acc</i> menggunakan <i>ArcMap</i>	54
Gambar 30. <i>Control file</i> untuk menghitung kedalaman genangan puncak.....	55
Gambar 31. Penentuan data puncak genangan dari <i>time step</i> simulasi.....	55
Gambar 32. Diagram Alir Penelitian	57
Gambar 33. Data <i>Digital Elevation Model (DEM)</i>	59
Gambar 34. Data <i>Flow Direction (dir)</i>	59
Gambar 35. Data <i>Flow Accumulation (acc)</i>	60
Gambar 36. Curah hujan maksimum tahunan tahunan tahun 2000 s/d 2009 di DAS Sekampung.....	61
Gambar 37. Hasil geometri sungai dari parameter empiris menggunakan program “ <i>makeRiver3</i> ”	63
Gambar 38. Perintah “ <i>Stream Order</i> ” untuk menganalisis orde sungai yang diatur dalam “ <i>riv_threshold</i> ”.....	63
Gambar 39. Hasil <i>stream order</i> sungai DAS Sekampung	64
Gambar 40. Klasifikasi <i>Landcover</i> data bersumber <i>GLCNMO v2</i>	65
Gambar 41. Klasifikasi <i>Soil data</i> pada DAS Sekampung.....	66

Gambar 42. Kondisi kondisi aliran <i>Surface/sub-surface</i>	66
Gambar 43. Data <i>Landcover</i> klasifikasi pada DAS Sekampung	68
Gambar 44. Lokasi Bendung Argoguruh di Sungai Way Sekampung	69
Gambar 45. Hidrograf debit observasi dan debit simulasi di Bendung Agroguruh Tahun 2001 s.d. 2009	71
Gambar 46. Hidrograf debit observasi dan debit simulasi di Bendung Agroguruh Tahun 2001 s.d. 2004	72
Gambar 47. Data puncak genangan (<i>hs_peak</i>) DAS Sekampung	74
Gambar 48. Kedalaman puncak genangan di (a) seluruh DAS Sekampung; dan (b) pertemuan Sungai Way Bulok dan Way Sekampung	75
Gambar 49. Peta <i>database</i> kejadian banjir Global di DAS Sekampung	76

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Banjir adalah bencana alam yang paling umum terjadi di negara maju dan berkembang, sampai sering kali menimbulkan dampak yang destruktif seperti telah terjadi di berbagai belahan dunia (Ahern dkk., 2005). Kerugian ekonomi akibat banjir pun telah meningkat pesat, terutama disebabkan oleh meningkatnya eksposur aset-aset yang berisiko (Kundzewicz dkk., 2014). Pemahaman akan fenomena banjir dan konsekuensinya diperlukan untuk memitigasi dan mengurangi kerusakan akibat peristiwa banjir yang terjadi, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia.

Berdasarkan hasil kajian risiko bencana yang disusun oleh BNPB pada tahun 2015, terlihat bahwa jumlah jiwa yang terpapar risiko bencana banjir tersebar di beberapa Pulau di Indonesia dengan jumlah melebihi 170 juta jiwa dan nilai aset terpapar melebihi 750 triliun rupiah. Provinsi Lampung terdapat lebih dari 8 juta jiwa terpapar dan nilai aset melebihi 6 miliar rupiah (*Risiko Bencana Indonesia*, 2016). Terdapat beberapa sungai utama di Provinsi Lampung salah satunya yaitu Way Sekampung yang memiliki peran sangat penting dalam memberikan pasokan untuk domestik, irigasi pertanian, dan penggunaan energi. Daerah Aliran Sungai (DAS) Sekampung juga terdapat lokasi banjir yang teridentifikasi (*Pola Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Seputih - Sekampung*, 2010). Informasi tersebut merupakan awal dalam mengidentifikasi risiko bencana dan dapat menjadi acuan dalam menjalankan perencanaan maupun perumusan kebijakan dan aksi di DAS Sekampung, Provinsi Lampung.

Menyimulasikan dan memperkirakan banjir sangat penting untuk mitigasi risiko, meskipun model numerik yang dirancang untuk memberikan informasi tersebut, namun model biasanya kekurangan akan resolusi spasial dan temporal (Shen dkk., 2019). Pemilihan metode dan data yang tepat untuk penilaian dan pengelolaan risiko banjir berkaitan dengan pemahaman tentang mekanisme risiko banjir, dinamika banjir. Serta parameter utama yang harus ditangani untuk meminimalkan risiko tersebut maka ketersediaan dan penggunaan data *remote sensing* (penginderaan jauh) dari sumber terbuka untuk pengurangan risiko bencana telah semakin meningkat (Thakuri dkk., 2022). DAS Sekampung terdapat juga kekurangan data terkait hidrologi yang terbatas seperti kebanyakan sungai di Indonesia (Wahono dkk., 2014). Sehingga ketersediaan data merupakan tantangan berat yang dihadapi oleh para peneliti dalam mengembangkan sistem peringatan dini banjir.

Dengan demikian permasalahan banjir di atas perlu untuk dilakukannya penelitian akan simulasi model banjir. Pemodelan genangan banjir seperti *RRI model* dapat digunakan untuk DAS Sekampung ini mengingat skala luasan yang cukup besar, penggunaan data terdistribusi dan kemampuannya dari tinjauan dari penelitian sebelumnya. Model ini dapat digunakan untuk salah satu tindakan penanggulangan yang efektif dari genangan banjir tersebut di DAS Sekampung, Provinsi Lampung.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang sebelumnya, penelitian ini dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu:

1. Bagaimana model genangan menggunakan *RRI Model* di DAS Sekampung?
2. Bagaimana perbandingan dan kesesuaian antara model simulasi dan data pengamatan (observasi) terhadap tersebut?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis nilai debit sungai, tinggi dan luas genangan di DAS Sekampung.
2. Menganalisis perbandingan dan kesesuaian antara model simulasi RRI dan data pengamatan (observasi) terhadap tersebut.

1.4. Batasan Masalah

1. DAS yang menjadi fokus penelitian adalah seluruh DAS Sekampung di Provinsi Lampung.
2. Pemodelan yang dipakai adalah (*Rainfall-Runoff-Inundation*) *RRI Model*.

1.5. Manfaat Penelitian

1. Menggunakan *RRI Model* untuk mengetahui debit sungai, tinggi dan luas genangan di DAS Sekampung.
2. Mengetahui perbandingan dan kesesuaian antara model simulasi dan data pengamatan (observasi) terhadap tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berdasarkan literatur yang telah didapatkan, pada bab ini disajikan kajian pustaka untuk memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini.

2.1. Bencana Banjir

Menurut KBBI, kata genangan memiliki arti (1) tempat atau daerah yang berair, (2) hasil menggenangi. Sedangkan kata banjir berarti (1) berair banyak dan deras, kadang-kadang meluap (tentang kali dan sebagainya), (2) air yang banyak dan mengalir deras; air bah, (3) peristiwa terbenamnya daratan (yang biasanya kering) karena volume air yang meningkat (Tim Penyusun KBBI, 2008). Hubungan keduanya saling erat namun bisa dibedakan dari klasifikasi, skala waktu, skala ruang dan penyebabnya. Jadi dikatakan banjir atau masuk dalam katagori bencana apabila parameter menunjukkan angka-angka yang di klasifikasikan seperti contohnya dalam Permen PU No. 12/PRT/M/2014 (PU, 2014).

2.2. Daerah Aliran Sungai (DAS)

Berdasarkan peraturan yang ada di Indonesia (misalnya Pemerintah, 2012) Daerah Aliran Sungai yang selanjutnya disebut DAS adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan. Berdasarkan

pengertian ini jelas bahwa DAS terdiri dari berbagai komponen yang berinteraksi dan saling berpengaruh satu sama lain.

DAS adalah area yang mengalirkan semua air yang berupa aliran air dan curah hujan ke arah *outlet* seperti aliran ke arah muara, waduk, atau titik dimana pun di sepanjang saluran sungai. DAS dapat berukuran sekecil telapak kaki ataupun lebih luas lagi dengan mencakup semua lahan yang mengalirkan air ke sungai yang bermuara di laut. Daerah aliran sungai yang lebih besar dapat berisi daerah aliran sungai yang lebih kecil, semua tergantung dari titik keluarnya (*outlet*) yang berarti bahwa semua area yang mengalirkan air ke titik keluar adalah DAS untuk lokasi keluar tersebut.

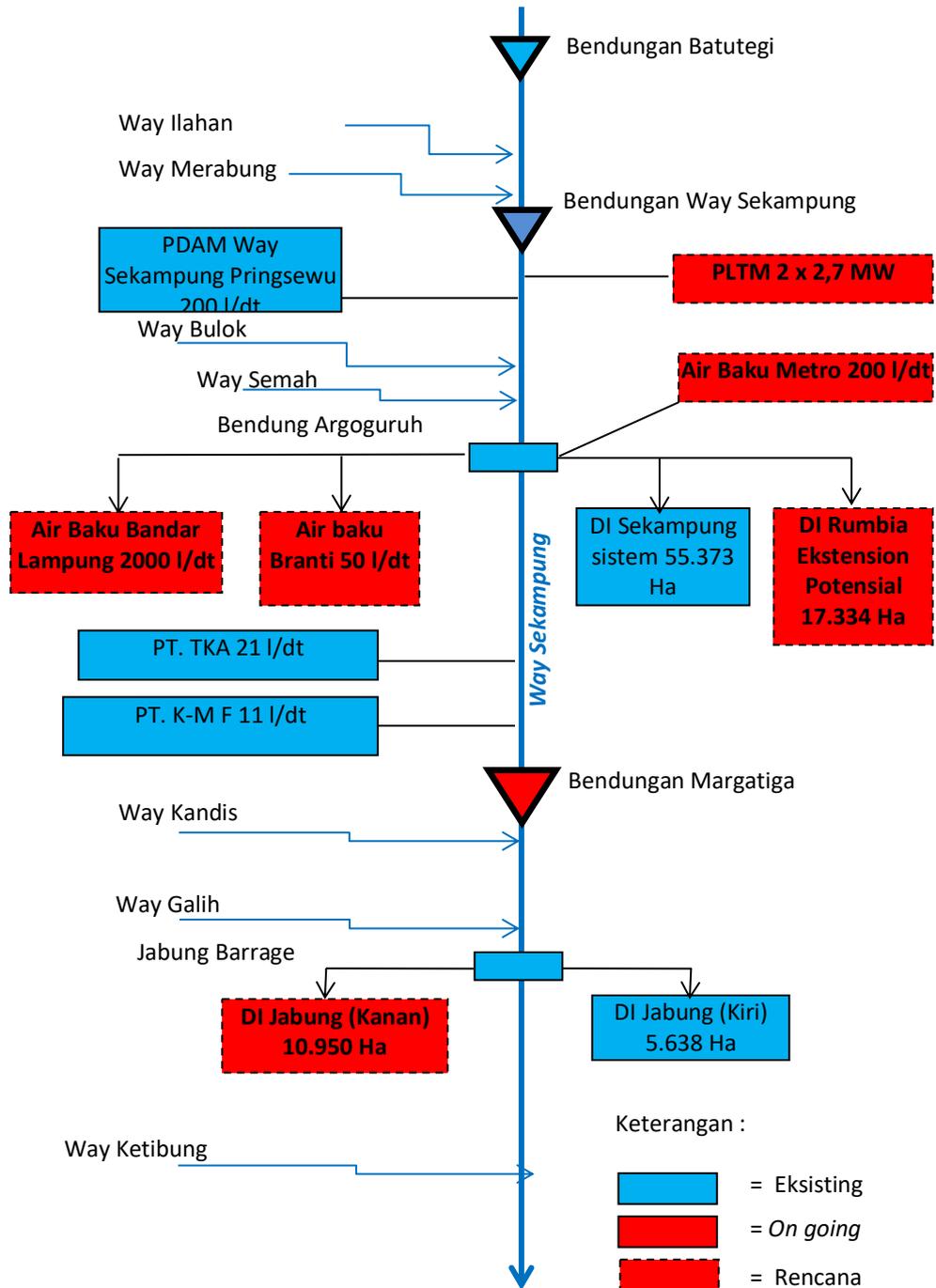
Berikut adalah beberapa istilah yang berkaitan atau menggunakan istilah DAS sebagai suatu kesamaan yaitu (Notodihardjo, 1982):

1. *Watershed* dalam artian fisik dan diartikan sebagai sistem air;
2. *Catchment area* dalam artian sebagai daerah tangkapan hujan;
3. *Drainage basin* dalam artian sebagai ledok pengatusan; dan
4. *River basin* dalam artian sebagai regime sungai.

2.3. DAS Sekampung

DAS Sekampung masuk salah satu dari 42 DAS yang ke dalam Wilayah Sungai Seputih-Sekampung dengan sungai utama yaitu sungai Way Sekampung seperti digambarkan dalam Gambar 1. lahan pada DAS Sekampung dikelola untuk lahan pertanian, perkebunan, permukiman dan hal lainnya cukup besar digunakan. Pada masing-masing bagian DAS Sekampung baik hulu, tengah dan hilir memiliki pemanfaatan lahan yang cukup besar. DAS ini telah menjadi prioritas untuk dipulihkan pemerintah pusat dikarenakan termasuk DAS yang dinilai berstatus kritis masuk dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024.

DAS Sekampung Hulu misalnya dengan seluas 42.400 ha sudah sangat diperlukan adanya penanganan, dikarenakan sebagian besar DAS Sekampung



Gambar 2. Skema Pengelolaan Way Sekampung

Sumber: (Bahan paparan Bendungan Margatiga, 2020), (Ditambahkan penulis, 2023)

2.4. Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Penginderaan Jauh

2.4.1 Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis (*Geographics Information System/GIS*) atau yang sering disebut SIG merupakan informasi berbasis komputer yang digunakan untuk mengolah dan menyimpan data atau informasi geografis. Pemodelan hidrologi dalam aplikasi SIG menyediakan metode untuk menggambarkan komponen fisik permukaan bumi. Alat atau biasa disebut *tools* hidrologi pun telah lama ada yang memungkinkan kita mengidentifikasi permukaan tanah, menentukan arah aliran, menghitung akumulasi aliran, menentukan batas air, dan membuat jaringan aliran.

Adapun fungsi - fungsi dasar dalam SIG adalah akuisisi data, pengelolaan *database*, pengukuran keruangan dan analisis serta penayangan grafis dan visualisasi. Akuisisi data meliputi digitasi, pemberian atribut, *editing*, pembangunan topologi, konversi format data, dll. Pengelolaan *database* meliputi pengarsipan data, pemodelan bertingkat, pemodelan jaringan pencarian atribut dll. Pengukuran keruangan dan analisis meliputi : operasi pengukuran, analisis daerah penyangga, *overlay*, dll. Serta penayangan grafis dan visualisasi meliputi: transformasi skala, generalisasi, peta topografi, peta statistik, tampilan perspektif.

Sistem informasi geografis dapat digunakan untuk melacak dan memprediksi tren bencana serta memitigasi risiko dan kerusakan. Banyak peneliti telah mendefinisikan pendekatan dan metode yang berbeda untuk memahami penilaian kerentanan dan bagaimana sistem informasi geografis menilai kerentanan banjir dan risiko yang terkait. (Chan dkk., 2022). Maka teknik analisis dalam SIG akan sangat bermanfaat dalam studi-studi terkait masalah banjir.

2.4.2 Data *Grid* dan Penginderaan Jauh

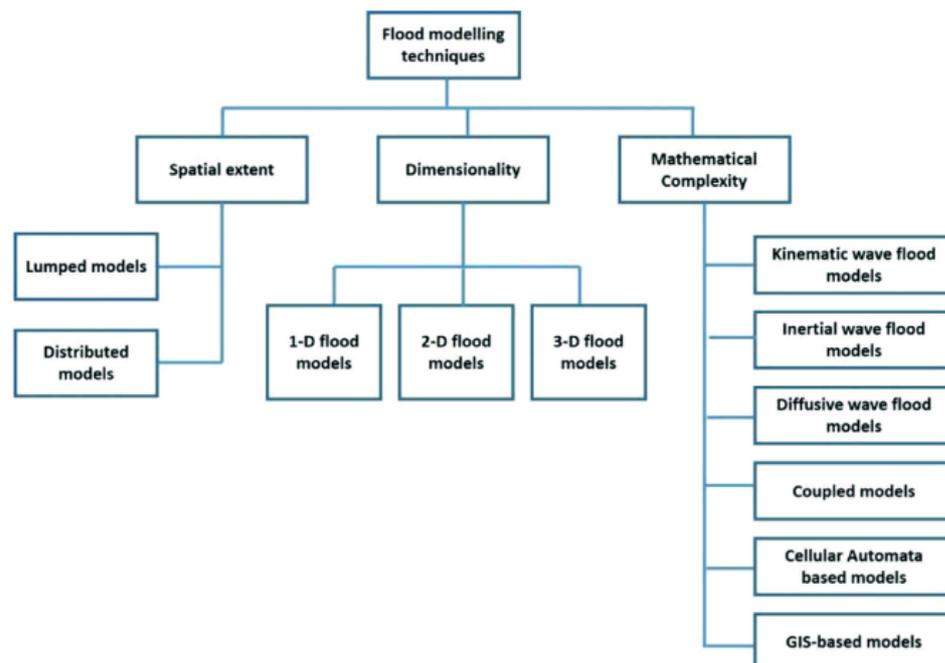
Objek di permukaan bumi disajikan sebagai elemen dengan menggunakan struktur matriks yang membentuk *grid*. Data raster atau *grid* disimpan sebagai kisi-kisi nilai yang ditampilkan pada peta sebagai piksel. Setiap nilai piksel mewakili suatu area di permukaan bumi. *File raster* terdiri dari kisi-kisi sel yang teratur, yang semuanya berukuran sama. *File* raster berbeda dengan foto biasa karena *file* ini memiliki referensi spasial. Setiap piksel mewakili area tanah di permukaan bumi. Area tersebut ditentukan oleh resolusi spasial dari raster tersebut. Atribut spasial penting yang terkait dengan data raster yaitu sistem referensi koordinat (*CRS*), resolusi, dan cakupan spasial.

Data penginderaan jauh dapat dikumpulkan dari darat, udara (menggunakan pesawat terbang atau helikopter) atau dari luar angkasa. Data yang dikumpulkan dari luar angkasa sering kali memiliki resolusi spasial yang lebih rendah daripada data yang dikumpulkan dari pesawat terbang. Namun, data yang dikumpulkan dari satelit sering kali memberikan cakupan yang lebih baik hingga skala global. Satelit menggunakan spektrum elektromagnetik yang terdiri dari berbagai panjang gelombang yang berbeda atau "warna" energi cahaya. Instrumen penginderaan jauh spektral mengumpulkan energi cahaya dalam wilayah tertentu dari spektrum elektromagnetik. Jadi setiap wilayah dalam spektrum disebut sebagai *band*.

Sebagai contoh, satelit Landsat 8 memiliki siklus pengulangan 16 hari untuk seluruh dunia. Ini berarti bahwa data dapat ditemukan gambar baru untuk suatu area, setiap 16 hari. Dibutuhkan banyak waktu dan sumber daya keuangan untuk mengumpulkan data dari udara. Oleh karena itu, data sering kali hanya tersedia untuk wilayah geografis yang lebih kecil. Selain itu, mungkin tidak menemukan data yang tersedia untuk periode waktu yang dibutuhkan. Sebagai contoh, dalam kasus NAIP, mungkin hanya memiliki *dataset* baru setiap 2-4 tahun.

2.5. Pemodelan Banjir Terkini

Beberapa metode telah banyak digunakan untuk melakukan simulasi genangan banjir dan debit aliran sungai seperti metode statistik, teknik empiris, dan model curah hujan-limpasan (Try dkk., 2018). Model-model tersebut dapat membantu dalam memahami dinamika banjir dengan memberikan prediksi risiko banjir yang masuk akal, termasuk luas wilayah banjir dan kedalaman air banjir. Namun, model hidrodinamika memiliki keterbatasan dengan beberapa kendala yang dapat menghambat penerapannya. Menurut (Afshari dkk., 2018) sebagian besar model hidraulik/hidrodinamika memerlukan fitur geografis yang signifikan, seperti penampang melintang saluran dan dataran banjir, atau nilai parameter yang ideal, yang biasanya sulit diperoleh.



Gambar 3. Skema klasifikasi teknik pemodelan banjir.

Sumber :(Nkwunonwo dkk., 2020)

Pada Gambar 3. di atas dapat dilihat perkembangan dalam lingkup pemodelan banjir telah sangat luas, dan selama bertahun-tahun telah berbagai macam skema, kumpulan data, dan metodologi untuk mensimulasikan

hidrodinamika banjir telah dihasilkan. Namun, potensi hasil penggunaan dari perkembangan ini belum dapat ditunjukkan dari pengelolaan risiko banjir di negara berkembang. Hingga saat ini, model yang sempurna atau teknik umum yang dapat menangkap setiap aspek hidrodinamika banjir secara optimal dalam keragaman lokasi studi masih belum realistis (Nkwunonwo dkk., 2020).

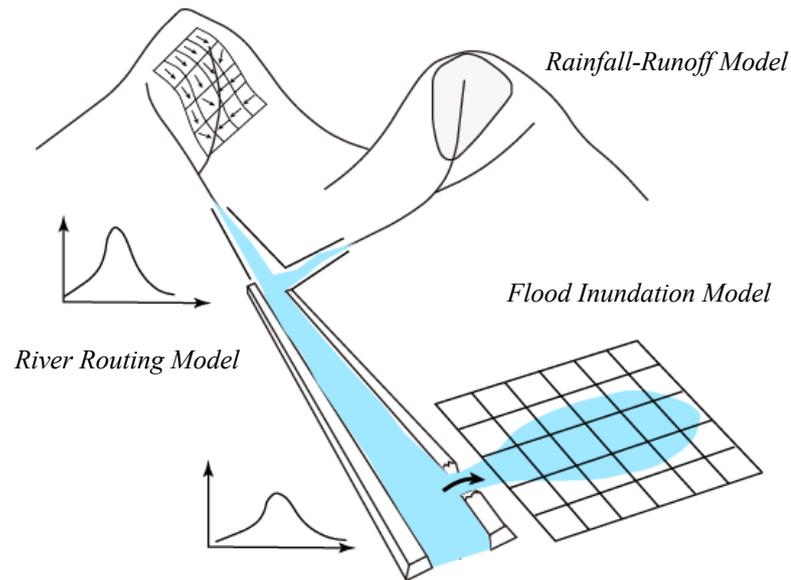
Gambar di atas dapat digambarkan teknik/metode yang dikembangkan dalam penggunaan terkini di dunia khususnya di bidang pemodelan banjir kawasan *urban*. Seperti *HEC-RAS*, *HEC HMS*, *ISIS-2D*, *ISIS-1D*, *ISIS – FREE*, *ISIS-FAST*, *LISFLOOD-FP*, *LISFLOOD*, *MIKE 11*, *MIKE 21*, *MIKE-FLOOD*, *TUFLOW-1D*, *TUFLOW-2D*, *JFLOW*, *DIVAST*, *DIVAST- TVD*, *SOBEK*, *TELEMAC*, *TRENT*, *MOD_freeSURF 2D*, *CADDIES*, *MIKE URBAN 2010*, *USEPA* yang masing-masing menggunakan teknik dan algoritmanya tersendiri dengan kelebihan dan kekurangannya masing-masing.

2.5.1 Pemodelan Banjir

Model DAS adalah penggambaran dari sistem kerja DAS di mana model ini dibuat bertujuan untuk mendekati kondisi asli lapangan dari sistem tersebut. Dalam model dilakukan penyederhanaan dari sistem yang kompleks sehingga lebih mudah dilakukan penelusuran sistem secara empiris dan kuantitatif, dengan memanfaatkan karakteristik DAS sebagai *input* untuk memprediksi respons DAS.

Pada Gambar 4. di bawah ini digambarkan pemodelan banjir konvensional dikenal 3 pemodelan banjir yaitu:

1. *Rainfall-Runoff Model*: simulasi debit aliran sungai dengan *input* curah hujan.
2. *River Routing Model*: melacak pergerakan gelombang banjir di sepanjang saluran sungai dengan menggunakan hidrograf hulu.
3. *Flood Inundation Model*: simulasi banjir yang menyebar di dataran banjir berdasarkan debit aliran masuk.

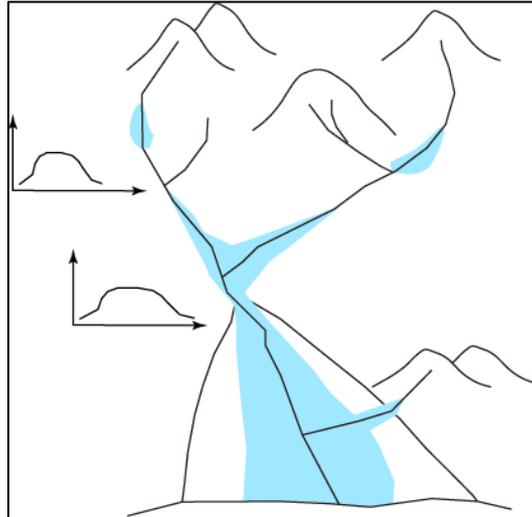


Gambar 4. Jenis-jenis aplikasi pemodelan banjir konvensional
 Sumber : (Sayama, 2007)

2.6. *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model*

RRI Model yang dikembangkan oleh *International Centre for Water Hazard and Risk Management (ICHARM)* Jepang, merupakan model hidrologi terdistribusi 2D yang dapat mensimulasikan limpasan hujan dan genangan banjir secara simultan (Sayama dkk., 2012). *RRI Model* dimiliki dan hak cipta program dikembangkan oleh ICHARM dan memiliki kode sumber model yang dikembangkan berdasarkan bahasa komputer Fortran 90.

Secara garis besar *RRI Model* menggunakan jaringan sungai untuk membuat saluran sungai. Model mengasumsikan bahwa saluran sungai terletak pada *grid cell* yang sama dengan lereng pada sel jaringan sungai. Aliran sungai dideskretkan sebagai satu garis tunggal di sepanjang garis tengah sel jaringan lereng di atasnya. Model gelombang difusi 2D digunakan untuk menghitung aliran yang melewati lereng *grid cell*, sedangkan model gelombang difusi 1D digunakan untuk menghitung aliran di saluran sungai. Jadi perbedaan RRI dari pemodelan banjir konvensional dapat dilihat pada Gambar 5. di bawah ini.



Gambar 5. Gambaran simulasi *Rainfall-Runoff-Inundation Model*

Sumber : (Sayama, 2007)

RRI Model juga mampu mensimulasikan aliran bawah permukaan lateral, aliran infiltrasi vertikal, dan aliran permukaan, yang lebih baik dalam merepresentasikan proses hujan – limpasan - genangan. Aliran bawah permukaan lateral, yang biasanya lebih penting di daerah pegunungan adalah dalam hal hubungan gradien debit-hidrolik, yang mempertimbangkan aliran bawah permukaan dan aliran permukaan yang jenuh.

Model *Green-Ampt* dapat digunakan untuk memperkirakan aliran infiltrasi vertikal. Interaksi aliran antara saluran sungai dan lereng diestimasi berdasarkan persamaan luapan yang berbeda, tergantung pada ketinggian air dan kondisi ketinggian tanggul. *RRI Model* memberikan keluaran berupa data debit sungai (qr), tinggi muka air sungai (hr), area genangan dan kedalaman (hs) secara bersamaan, lihat Gambar 6 di bawah ini (Try dkk., 2020).

Model ini telah berhasil digunakan untuk mensimulasikan banjir di berbagai cekungan berskala besar di berbagai wilayah di seluruh dunia. Misalnya penilaian kerusakan akibat banjir untuk menilai risiko banjir di DAS Pampanga di Filipina yang kurang data dengan menggunakan model numerik berbasis fisik, informasi berbasis satelit, dan faktor sosial ekonomi. (Shrestha dkk., 2016). Penelitian banjir tahun 2020 Jakarta dilakukan untuk mengkaji

debit banjir dan luasan genangan yang diakibatkan oleh hujan dengan *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model* untuk menyimulasikan banjir kemudian dibandingkan dengan periode ulang banjir. Hasilnya menunjukkan bahwa banjir yang terjadi pada 2020 lebih besar dari pada banjir dengan periode ulang 100 tahun (Sihombing dkk., 2023).

Sejumlah penelitian lain juga dilakukan berdasarkan *RRI Model* di berbagai wilayah, yaitu (Nastiti dkk., 2015; Sihombing dkk., 2023; Try dkk., 2020). Sebagai contoh, (Try dkk., 2020) menerapkan *RRI Model* dengan untuk mengukur kinerja model di DAS dievaluasi dengan menggunakan curah hujan stasiun hujan. Hasil kalibrasi (2000-2003) dan validasi (2004-2007) menunjukkan bahwa *RRI Model* memiliki kinerja yang dapat diterima di DAS Mekong. Selain itu, model ini menunjukkan kinerja yang baik dalam memprediksi daerah genangan banjir di daerah aliran sungai berskala besar seperti DAS Citarum bagian hulu di Indonesia (Nastiti dkk., 2015).

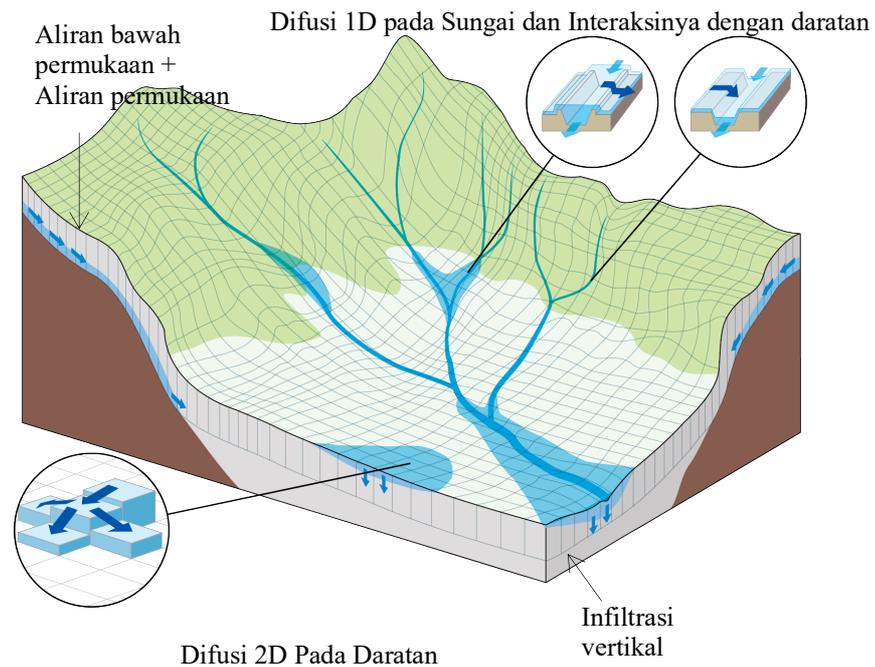
Salah satu kelemahan dari simulasi hujan-limpasan atau perhitungan debit dengan menggunakan data hujan adalah asumsi bahwa hujan terjadi secara seragam dan bersamaan di seluruh Daerah Aliran Sungai (DAS). Namun, kejadian hujan yang seperti itu jarang terjadi, terutama di DAS yang luas. Akibatnya, estimasi debit yang dihasilkan dari proses ini sering kali terlalu besar atau terlalu tinggi (*over estimated*) karena asumsi hujan yang merata di seluruh DAS. *RRI model* mampu mengekspresikan proses limpasan seakurat mungkin (karena menggunakan model terdistribusi).

Salah satu keuntungan juga dari *RRI Model* adalah bahwa model ini menerapkan metode *Green-Ampt* untuk memperkirakan infiltrasi vertikal. Model ini memiliki solusi analitis yang tepat berdasarkan perkiraan teori fisik untuk kadar air tanah dan sifat-sifat tanah (Hapsari dkk., 2021). RRI juga menghitung banjir luapan dan banjir daratan pada saat yang waktu yang sama. Namun model gelombang difusi memang membutuhkan waktu yang lebih singkat dan menjanjikan stabilitas model yang lebih tinggi namun mengorbankan ketepatan hasil (Quiroga dkk., 2016).

2.6.1 Struktur Model

Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model merupakan model dua dimensi yang mampu mensimulasikan curah hujan-limpasan dan genangan banjir secara simultan (Sayama dkk., 2012). Model ini menghitung lereng dan saluran sungai secara terpisah. Pada *grid cell* di mana saluran sungai berada, model ini mengasumsikan bahwa lereng dan sungai diposisikan di dalam *grid cell* yang sama. Saluran sungai didiskritkan sebagai garis tunggal di sepanjang garis tengah *grid cell* lereng di atasnya. Aliran pada *grid cell* lereng dihitung dengan model gelombang difusi 2D, sedangkan aliran saluran sungai dihitung dengan model gelombang difusi 1D.

Untuk representasi yang lebih baik dari proses hujan-limpasan-genangan, *RRI Model* juga mensimulasikan aliran bawah permukaan lateral, aliran infiltrasi vertikal, dan aliran permukaan. Aliran bawah permukaan lateral, yang biasanya lebih penting di daerah pegunungan, diperlakukan dalam hal hubungan gradien debit-hidrolik, yang memperhitungkan aliran bawah permukaan dan aliran permukaan yang jenuh. Di sisi lain, aliran infiltrasi vertikal diperkirakan dengan menggunakan model *Green-Ampt*. Interaksi aliran antara alur sungai dan lereng daratan diperkirakan berdasarkan rumus luapan yang berbeda, tergantung pada kondisi tinggi muka air dan tinggi tanggul (Lihat Gambar 6 di bawah ini)



Gambar 6. Diagram Skema *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model* (Sayama dkk., 2012)

RRI Model mempunyai fitur:

- *RRI* merupakan simulasi model 2D untuk curah hujan-limpasan dan genangan banjir secara bersamaan.
- Dapat menyimulasikan aliran di darat dan di sungai dan interaksinya pada wilayah sungai.
- Dapat menyimulasikan aliran bawah permukaan lateral di daerah pegunungan dan infiltrasi di daerah datar.

2.6.2 Persamaan Dasar *RRI Model*

RRI Model pada aliran lateral menggunakan 2 persamaan utama yaitu persamaan *mass balance equation (1)* dan *momentum equation (2)*. Aliran pada *grid-cells* lereng dihitung dengan model gelombang difusi 2D, sedangkan aliran saluran/sungai dihitung dengan model gelombang difusi 1D. Aliran infiltrasi vertikal diperkirakan dengan menggunakan model *Green-Ampt*.

Sebuah metode untuk menghitung aliran lateral pada grid sel lereng dikarakteristikan sebagai "*a storage cell-based inundation model*" (Hunter dkk., 2007). Persamaan model diturunkan berdasarkan 2 persamaan di atas untuk aliran *unsteady flow* yang divariasikan secara bertahap.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial uq_x}{\partial x} + \frac{\partial vq_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial uq_y}{\partial x} + \frac{\partial vq_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (3)$$

dimana:

h	= ketinggian air dari permukaan lokal,
q_x, q_y	= debit dalam arah x dan y ,
u, v	= kecepatan aliran dalam arah x dan y ,
r	= intensitas curah hujan,
f	= laju infiltrasi,
H	= ketinggian air dari datum,
ρ_w	= massa jenis air,
g	= percepatan gravitasi, dan
τ_x, τ_y	= tegangan geser pada arah x dan y .

Suku kedua sisi kanan Persamaan (2) dan (3) dihitung dengan persamaan *Manning*:

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{\tau_b}{\rho_w} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{\tau_b}{\rho_w} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5)$$

di mana τ_b adalah tegangan geser dasar yang didefinisikan sebagai:

$$\tau_b = \rho_w g h i \quad (6)$$

Di mana i adalah faktor gesekan lereng. Substitusi (6) dan rumus Manning menjadi (4) dan (5) menghasilkan:

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

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

di mana n adalah koefisien kekasaran Manning. Menggunakan relasi $\sqrt{u^2 + v^2} = \frac{1}{n} 1^{1/2} h^{2/3}$ dan $q_x = uh$ dan $q_y = vh$ untuk persamaan (7) dan (8), diperoleh :

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = n g h^{-2/3} i^{1/2} q_x \quad (9)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = n g h^{-2/3} i^{1/2} q_y \quad (10)$$

dan i didefinisikan sebagai:

$$i = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (11)$$

Pendekatan gelombang difusi, yang menghilangkan sisi kiri (2) dan (3) dengan mengganti (9) dan (10) ke dalam persamaan tegangan geser menghasilkan:

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{1}{q^{1/2}} \quad (12)$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{1}{q^{1/2}} \quad (13)$$

Perhatikan bahwa versi sebelumnya dari manual RRI dan makalah terkait menjelaskan persamaan berikut (14) dan (15) untuk menghitung q_x dan q_y . Persamaan (12) dan (13) diturunkan berdasarkan perhitungan independen q_x dan q_y (Hunter dkk., 2007) dan digunakan untuk *RRI Model* yang memungkinkan aliran dalam arah diagonal dengan *grid cell* segi delapan.

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (14)$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (15)$$

di mana *sgn* adalah fungsi signum. *RRI Model* secara spasial mendiskretisasikan persamaan keseimbangan massa (1) sebagai berikut:

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} + \frac{q_x^{i-1,j} - q_x^{i,j}}{\Delta x} + \frac{q_y^{i,j-1} - q_y^{i,j}}{\Delta y} = r^{i,j} - f^{i,j} \quad (16)$$

Di mana $q_x^{i,j}$ $q_y^{i,j}$, adalah arah x dan y yang dilepaskan dari sel kisi pada (i, j).

Dengan menggabungkan persamaan (1), (12) dan (13), kedalaman dan debit air dihitung pada setiap *grid cell* untuk setiap langkah waktu (*time step*). Satu perbedaan penting antara *RRI Model* dan model genangan lainnya adalah bahwa yang pertama menggunakan berbagai bentuk hubungan gradien pelepasan-hidrolik, sehingga dapat menyimulasikan aliran permukaan dan bawah permukaan dengan algoritma yang sama. *RRI Model* menggantikan persamaan (12) dan (13) dengan persamaan berikut (17) dan (18), yang awalnya dikonseptualisasikan oleh (Ishihara & Takasao, 1962) berdasarkan pendekatan gelombang kinematik.

Persamaan pertama dalam (17) dan (18) ($h \leq d_a$) menggambarkan aliran bawah permukaan jenuh berdasarkan hukum Darcy, sedangkan persamaan kedua ($d_a \leq h$) menggambarkan kombinasi aliran bawah permukaan jenuh dan aliran permukaan. Perhatikan bahwa untuk model gelombang kinematik, gradien hidrolik diasumsikan sama dengan kemiringan topografi, sedangkan *RRI Model* mengasumsikan kemiringan permukaan air sebagai gradien hidrolik.

$$q_x = \begin{cases} -k_a h \frac{\partial H}{\partial x} & (h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{1}{i^{1/2}} - k_a h \frac{\partial H}{\partial x} & (d_a < h) \end{cases} \quad (17)$$

$$q_y = \begin{cases} -k_a h \frac{\partial H}{\partial y} & (h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{1}{i^{1/2}} - k_a h \frac{\partial H}{\partial y} & (d_a < h) \end{cases} \quad (18)$$

di mana k_a adalah konduktivitas hidrolis jenuh lateral dan d_a adalah kedalaman tanah dikalikan porositas efektif.

Persamaan (19) dan (20) juga dapat digunakan untuk menyimulasikan efek aliran bawah permukaan jenuh dan aliran permukaan yang tidak jenuh dengan variabel tunggal h (Sayama & McDonnell, 2009; Tachikawa dkk., 2004).

$$q_x = \begin{cases} -k_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta \frac{\partial H}{\partial x} & (h \leq d_m) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x} & (d_m < h \leq d) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{1}{i^{1/2}} - k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x} & (d_a < h) \end{cases} \quad (19)$$

$$q_y = \begin{cases} -k_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta \frac{\partial H}{\partial y} & (h \leq d_m) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial y} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial y} & (d_m < h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{1}{i^{1/2}} - k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial y} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial y} & (d_a < h) \end{cases} \quad (20)$$

Perhatikan bahwa untuk memastikan kontinuitas perubahan debit ketika $h = d_m$, konduktivitas hidrolis lateral di zona tak jenuh (k_m) dapat dihitung dengan $k_m = k_a / \beta$, sehingga k_m tidak lagi menjadi parameter model.

Persamaan hubungan tahap debit ini awalnya dikembangkan untuk diterapkan pada kawasan hutan lembah dengan lapisan tanah permeabel

tinggi, di mana aliran bawah permukaan lateral adalah mekanisme pembangkitan limpasan yang dominan. Di sisi lain, untuk daerah yang relatif datar, proses infiltrasi vertikal selama periode pertama curah hujan lebih berdampak pada banjir skala besar. Oleh karena itu, infiltrasi vertikal dapat diperlakukan sebagai kerugian untuk simulasi berbasis peristiwa. Di sini kita menghitung kehilangan infiltrasi f dengan model infiltrasi *Green-Ampt* (Raws dkk., 1992).

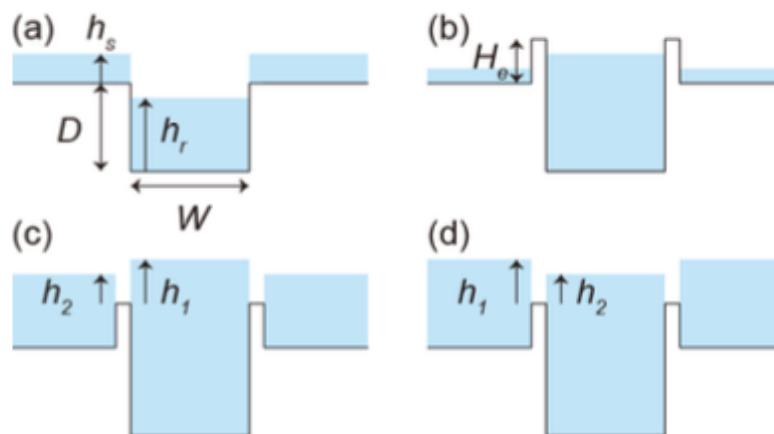
$$f = k_v \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i) s_f}{F} \right] \quad (21)$$

di mana k_v adalah konduktivitas hidrolik jenuh vertikal, ϕ adalah porositas tanah, θ_i adalah kandungan volume air awal, s_f adalah hisap di depan pembasahan vertikal dan F adalah kedalaman infiltrasi kumulatif.

Biasanya untuk daerah pegunungan di mana aliran bawah permukaan lateral dan kelebihan aliran darat jenuh mendominasi, persamaan (17) dan (18) (atau (19) dan (20)) dapat digunakan dengan pengaturan f sama dengan nol. (Perhatikan bahwa persamaan (17) dan (18) (atau (19) dan (20)) secara implisit mengasumsikan bahwa laju infiltrasi vertikal di dalam tanah tidak terbatas.) Di sisi lain, untuk daerah dataran di mana infiltrasi kelebihan aliran darat mendominasi, persamaan aliran permukaan (12) dan (13) dapat digunakan dengan pertimbangan infiltrasi vertikal dengan persamaan (21). Jika infiltrasi vertikal f diatur menjadi bukan nol dan persamaan bawah permukaan lateral digunakan sebagai pengganti persamaan aliran permukaan, air bawah permukaan lateral diinfiltrasi ke batuan dasar dengan laju f .

Seperti yang dapat dilihat dari persamaan, nilai parameter k_a , k_m dan k_v memutuskan persamaan mana yang akan digunakan; yaitu (12) dan (13) digunakan ketika k_a dan k_m adalah nol, (17) dan (18) digunakan ketika k_m adalah nol, dan (21) tidak aktif ketika k_v adalah nol.

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



Gambar 7. Kondisi pertukaran air pada tingkat air lereng, air sungai, tanggul dan tanah

- a. Ketika permukaan air sungai lebih rendah dari permukaan tanah, q_{sr} dihitung dengan rumus penurunan bertahap berikut ini

$$q_{sr} = \mu_1 h_s \sqrt{g h_s} \quad (22)$$

di mana μ_1 adalah koefisien konstan ($= (2/3)^{3/2}$), dan h_s adalah kedalaman air pada sel lereng. Sejauh permukaan air sungai lebih rendah dari permukaan tanah, persamaan yang sama digunakan bahkan untuk kasus dengan 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. Jika tinggi muka air sungai lebih tinggi dari puncak tanggul dan tinggi muka air lereng, rumus berikut ini digunakan untuk menghitung debit limpasan dari sungai ke lereng.

$$q_{rs} = \begin{cases} \mu_2 h_1 \sqrt{2gh_1} & h_2/h_1 \leq 2/3 \\ \mu_3 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & h_2/h_1 > 2/3 \end{cases} \quad (23)$$

di mana μ_2 dan μ_3 adalah koefisien konstanta ($=0,35, 0,91$), dan h_1 adalah selisih antara tinggi muka air sungai dan puncak tanggul.

- d. Jika tinggi muka air lereng lebih tinggi daripada tinggi tanggul dan tinggi muka air sungai, rumus yang sama dengan (23) digunakan untuk menghitung aliran luapan q_{rs} 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.

2.7. Kalibrasi dan Validasi *RRI Model*

Model *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)* yang terdiri dari model curah hujan-limpasan dan genangan dua dimensi yang digabungkan perlu divalidasi dengan membandingkannya dengan data pengamatan hasil simulasi dibandingkan dengan yang teramati di *outlet*. Kalibrasi dan verifikasi adalah hal sangat penting untuk dilakukan dalam pemodelan debit sungai. Untuk keperluan kalibrasi dan verifikasi diperlukan data observasi lapangan dari sungai yang diteliti. Selanjutnya akan dibandingkan pula peta area genangan dengan produk pengolahan penginderaan jauh yang teramati oleh satelit serta dari data kejadian banjir yang terjadi.

2.7.1 Kalibrasi dan Validasi Debit Banjir

Dalam banyak penelitian telah banyak dilakukan metode kalibrasi dan validasi untuk menilai kinerja *RRI Model*. Beberapa indeks statistik digunakan dalam proses model ini seperti *Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)*, *coefficient of determination (R²)*, dan *percent bias (BIAS)*. Pertama Efisiensi *Nash-Sutcliffe (NSE)* digunakan untuk menilai kecocokan statistik dari aliran yang disimulasikan (Abdelmoneim dkk., 2022). Koefisien determinasi (*R²*) dan persen bias (*BIAS*) juga digunakan untuk menentukan kesesuaian hasil simulasi dengan hasil pengukuran. Selain itu, *BIAS* juga digunakan untuk menyelidiki kecenderungan estimasi yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dari aliran simulasi. (Gilewski & Nawalany, 2018). Indikator statistik di atas dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q'_{sim})^2} \quad (24)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q'_{obs})(Q_{sim} - Q'_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q'_{obs})^2 (Q_{sim} - Q'_{sim})^2} \quad (25)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \times 100 \quad (26)$$

Di mana Q_{obs} dan Q_{sim} masing-masing adalah data yang diamati dan hasil simulasi. $Q_{obs'}$ dan $Q_{sim'}$ mewakili rata-rata periode simulasi. Skala *NSE* berkisar dari $-\infty$ sampai 1, dengan nilai yang lebih tinggi dengan mendekati nilai 1 menunjukkan nilai kesesuaian model yang lebih besar. (Legates & McCabe Jr., 1999). Jika *NSE* kurang dari nol, maka model tidak memiliki kemampuan untuk memprediksi yang diukur (Lakew dkk., 2017). Koefisien determinasi (*R²*) dan persen bias (*BIAS*) juga digunakan untuk menentukan kesesuaian antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran.

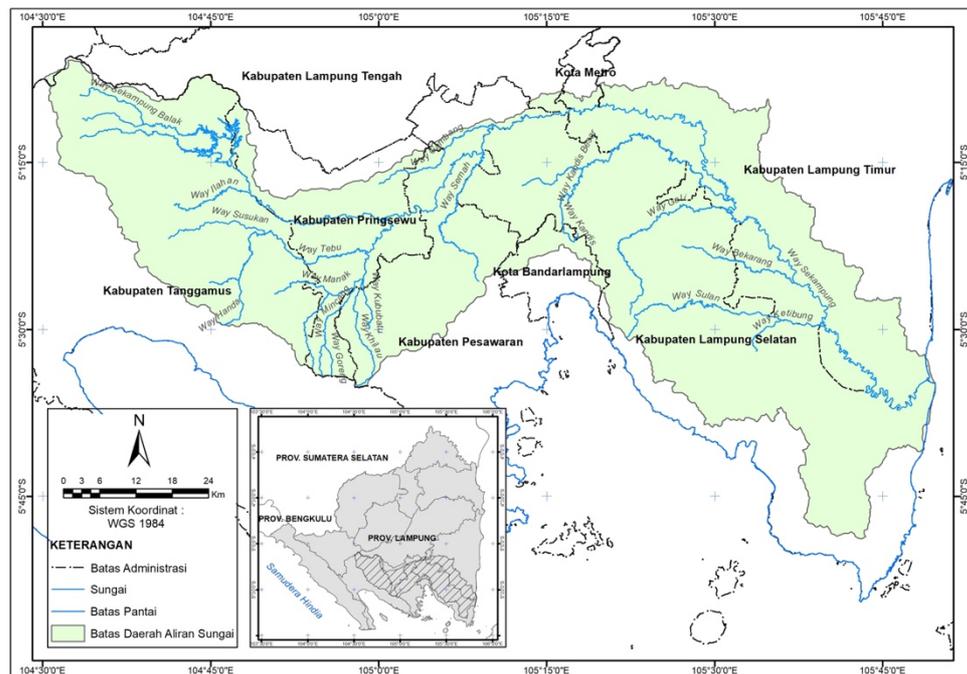
Berdasarkan penelitian sebelumnya perbandingkan hasil simulasi *RRI Model* di Hulu Sungai Citarum dengan debit air yang teramati di *outlet* debit simulasi menunjukkan beberapa perbedaan. (Nastiti dkk., 2015). Hasil penelitian lainnya menunjukkan kesesuaian yang baik antara aliran sungai yang diamati dan yang disimulasikan baik pada skala harian maupun bulanan untuk simulasi yang dilakukan di *Nile River Basin* (Abdelmoneim dkk., 2023).

Data yang digunakan untuk analisis dalam penelitian ini dikumpulkan dari stasiun pengukuran debit (AWLR) di bagian hilir Bendung Argoguruh yang pengukurannya dilakukan oleh UPTD Balai Pengelola Sumber Daya Air (BPSDA) Sungai Sekampung di Metro. Data ini disampaikan pada penelitian (Wahono dkk., 2014), sehingga akan digunakan kembali pada penelitian ini.

III. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan suatu cara yang sistematis dalam penelitian yang akan dilaksanakan untuk mengantisipasi segala hambatan yang terjadi selama berlangsungnya proses penelitian. Pemodelan genangan banjir pada DAS Sekampung yang menggunakan *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model*. Proses pemodelan akan menggunakan acuan dari manual dan beberapa penelitian terdahulu.

3.1. Lokasi Penelitian



Gambar 8. Peta lokasi studi DAS Sekampung

DAS Sekampung terletak di Provinsi Lampung, Indonesia. Secara administratif meliputi 8 (delapan) wilayah administratif yaitu Kabupaten

Tanggamus, Pringsewu, Pesawaran, Lampung Tengah, Kota Bandar Lampung, Lampung Selatan dan Lampung Timur, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 di atas. DAS ini yang secara akumulatif memiliki luas 4760.23 km². Wilayah studi terletak di antara garis lintang 4° 56' 0" S sampai dengan lintang 5° 55' 45" S dan bujur 104° 24' 0" BT sampai dengan bujur 106° 1' 15" BT.

3.2. Pengumpulan Data dan Pengolahan Data

Beberapa kumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini digunakan sebagai sumber dalam menjalankan, mengkalibrasi, dan memvalidasi *RRI Model*. Kumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini disediakan atau diunduh dari sumber yang relevan. Data meteorologi dan hidrologi dikumpulkan dari sumber data sekunder yang akan dijabarkan sumber di sub-bab di bawah ini.

Tabel 1. Rangkuman *dataset* yang digunakan

Jenis Data	Nama Data	Sumber Data	Resolusi Spasial	Resolusi Temporal
Hujan	<i>GSMaP</i>	<i>ftp://sharaku.eorc.jaxa.jp</i>	<i>0.1 degree</i>	<i>daily</i>
Topografi	<i>HydroSHE DS</i>	<i>https://www.hydrosheds.org/</i>	<i>15 arc second</i>	-
Tutupan Lahan	GLCNMO	<i>https://github.com/globalmaps/gm_lc_v2</i>	<i>15 arc second</i>	-

3.2.1 Data Topografi

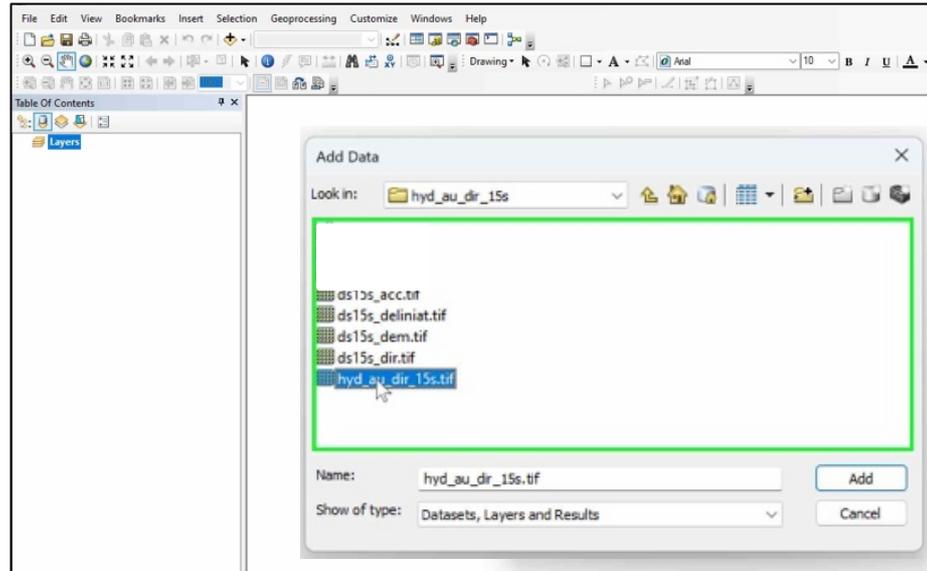
Data topografi termasuk *digital elvation model (dem)*, arah aliran (*dir*), dan akumulasi aliran (*acc*) diperoleh dari *HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales)* dengan resolusi asli *15-arc second* (sekitar 90 m di ekuator) (Lehner dkk., 2008). Data ini akan dilakukan *clip/mask* sesuai delineasi DAS Sekampung dengan *outlet/pour point* di muara sungai Way Sekampung.

Dengan deskripsi data yang tersedia yaitu:

1. Data ketinggian/elevasi (*dem*)
3 *arc-second* (sekitar 90 m), 15 *arc-second* (sekitar 450 m), dan 30 *arc-second* (sekitar 1.000 m) tersedia.
2. Data arah aliran (*dir*)
Tersedia dalam 3 *arc-second*, 15 *arc-second*, dan 30 *arc-second*.
3. Data akumulasi aliran (*acc*)
Hanya tersedia 15 *arc-second* dan 30 *arc-second*. Untuk resolusi 3 *arc-second*, pengguna harus menyiapkan akumulasi aliran dengan menggunakan fungsi *GIS Flow Accumulation*.

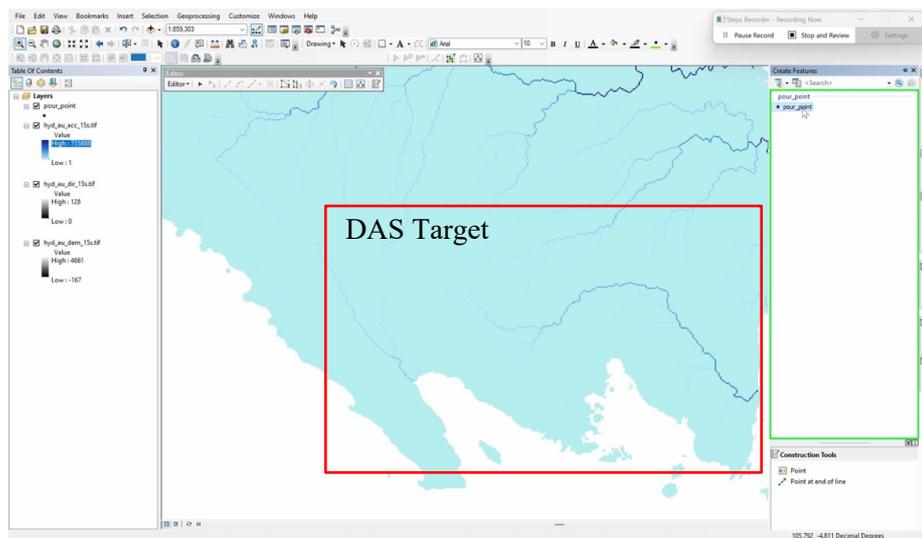
Spesifikasi data *HydroSHEDS* yang digunakan yaitu beresolusi 15s dengan 15 *arc-second* atau sekitar 500 m di ekuator. Data diunduh dari *hydrosheds.org*. Selanjutnya yaitu tahap *pre-processing* data untuk delineasi *HydroSHEDS* menggunakan *ArcGIS*:

1. Delineasi data menggunakan *ArcGIS* dengan menjalankan *ArcMap*, dan membaca *file* yang telah *unzip* dengan memilih [*File*]->[*Add Data*]. (Atau gunakan ikon "*Add Data*" pada *tool bar standard*). Lakukan operasi yang sama untuk ketiga jenis data topografi (*dem*, *dir*, *acc*) seperti ditunjukkan pada Gambar 9 di bawah ini.
2. Jika folder yang perlu sambungkan tidak ditampilkan di jendela, klik "*Connect to Folder*" untuk menyambungkan ke folder kerja.



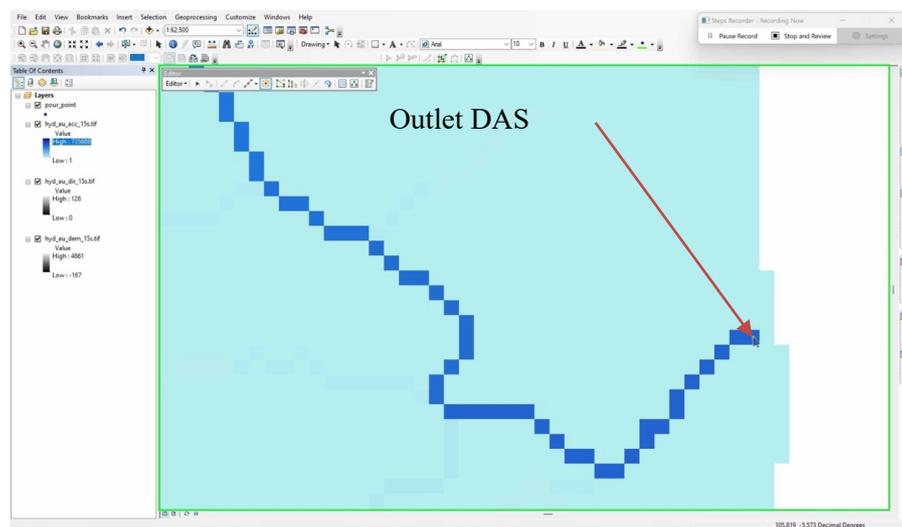
Gambar 9. Menjalankan ArcMap dan menambahkan data topografi *dem, dir* dan *acc*

3. Tampilkan data akumulasi aliran (misalnya *hyd_au_acc_15s.tif*) seperti pada Gambar 10. di bawah ini, di bagian atas (ubah rentang warna untuk menunjukkan jaringan sungai dengan jelas). Kemudian cari sungai target dan tentukan kisaran persegi panjang, yang mencakup semua daerah yang berkontribusi di bagian hulu.



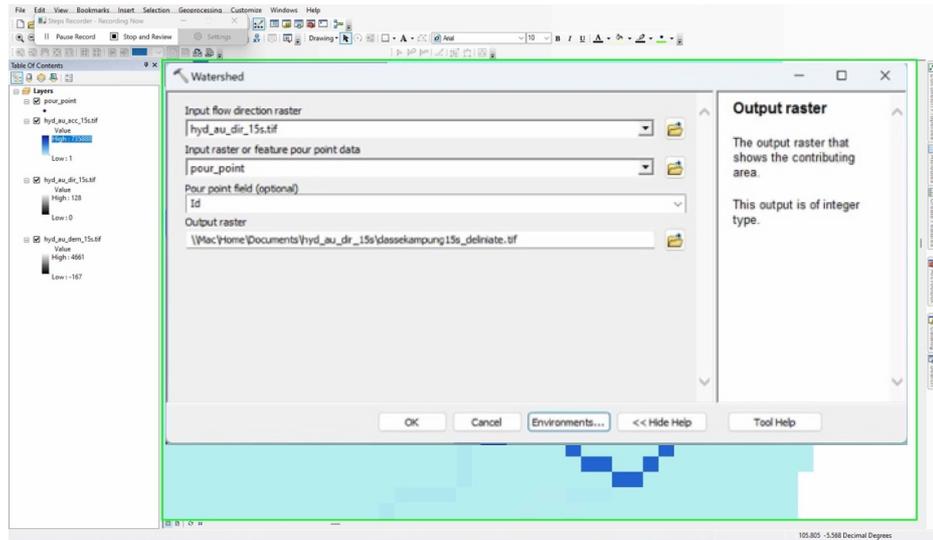
Gambar 10. Tampilan data *acc* dengan diperbesar sesuai cakupan DAS untuk proses pembuatan titik *outlet/pout point*

4. Membuat *point shapefile* sebagai "*Outlet/Pour Point.shp*", Mengklik "*Outlet*", lalu dapat menuju titik seperti Gambar 11. di bawah ini untuk menunjukkan *outlet* target. Setelah mengedit titik *outlet*, masuk ke menu editor untuk menyimpan dan berhenti mengedit. Sehingga proses deliniasi dihasilkan dari titik *outlet* target tersebut. Dengan menggunakan alat bantu *ArcToolbox* -> [*SpatialAnalystTools*] -> [*Hidrology*] -> [*Watersheds*] untuk menghasilkan sebuah DAS dengan *outlet* yang ditentukan.

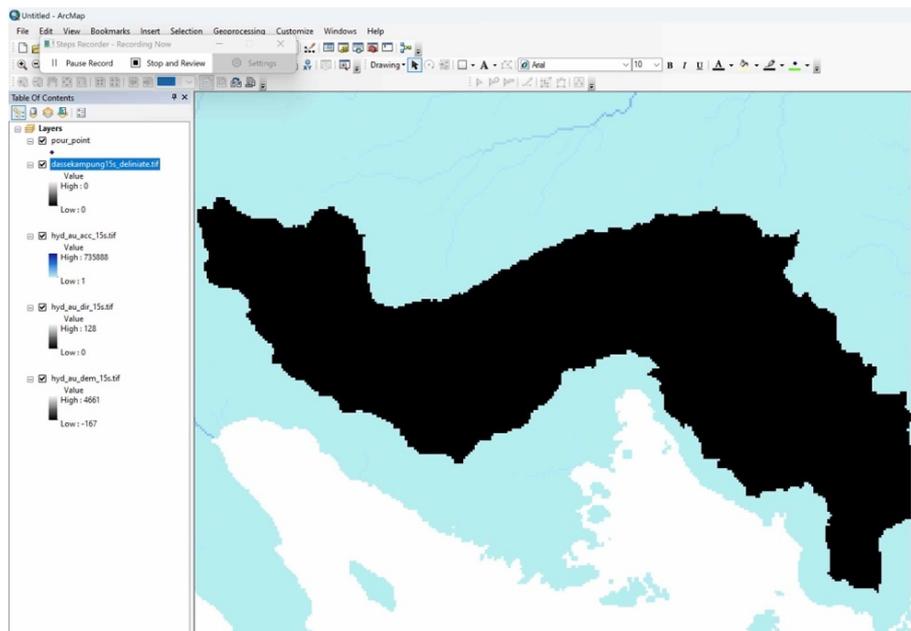


Gambar 11. Pembuatan titik *outlet/pour point* pada muara Way Sekampung

Pada Gambar 12. di bawah ditunjukkan *input* data *dir* dari *Hydrosheds*, file *shapefile outlet/pour_point* yang telah dibuat serta lokasi output raster yang dihasilkan dari analisis ini. Selanjutnya hasil deliniasi ini dapat ditunjukkan dalam Gambar 13. di bawah ini. Perlu diperhatikan bahwa *output* file ini mempunyai jumlah kolom dan baris yang akan digunakan dalam *RRI Model*.

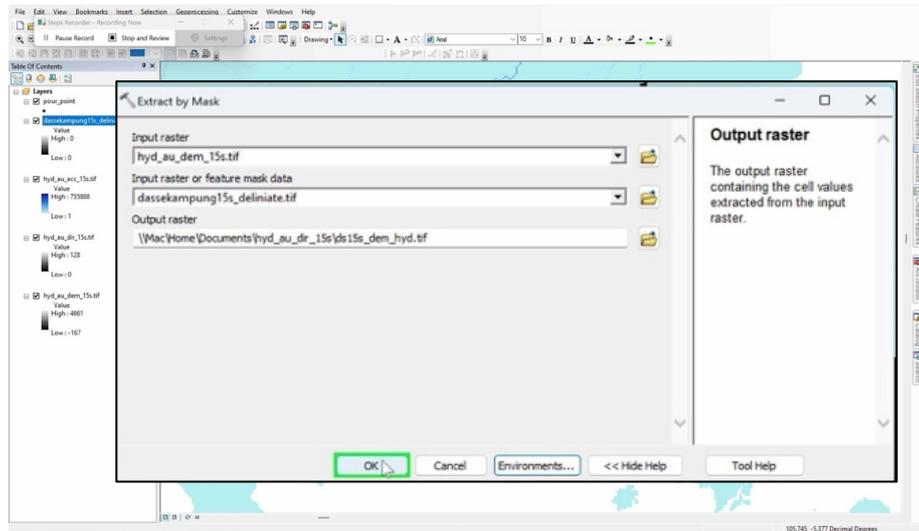


Gambar 12. Penggunaan *toolbox Watersheds* untuk melakukan deliniasi DAS

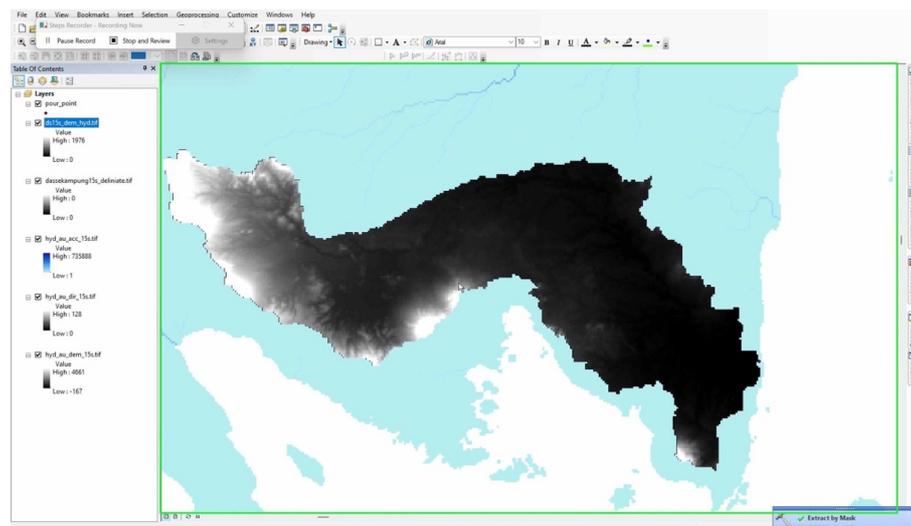


Gambar 13. Hasil deliniasi DAS Sekampung

5. Selanjutnya [*Spasial Analyst Tools*]->[*Extraction*]->[*Extract by Mask*] dengan menyiapkan data *dem* (elevasi), *acc* (akumulasi aliran) dan *dir* (arah aliran) yang *mask* oleh DAS yang telah didelineasi.



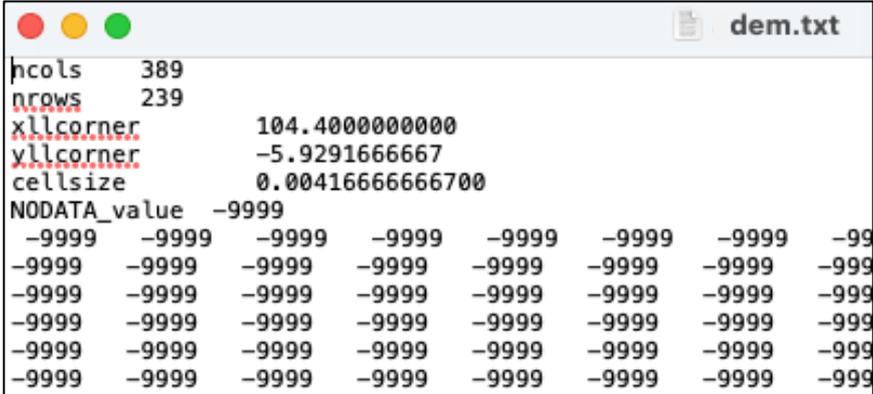
Gambar 14. Data topografi *dem*, *dir*, *acc* dilakukan *extract* dengan parameter *mask* dari delineasi DAS Sekampung



Gambar 15. Data topografi *dem* yang telah di *extract* dengan *toolbox extract by mask*

Pada Gambar 15. di atas dapat ditunjukkan hasil dari data topografi yang telah diekstrak berdasarkan *mask* delineasi DAS. Ketiga data *dem*, *dir* dan *acc* perlu dilakukan ekstrak dengan cara yang sama seperti tahapan di atas.

6. Konversikan semua data yang telah diproses (yaitu *dem*, *dir*, dan *acc*) dari *ArcGIS* Raster ke ASCII, yang merupakan *file* data *input* untuk *RRI Model*. Dengan menggunakan [*Conversion Tool*]->[*Conversion from Raster*]->[*Raster to ASCII*], lakukan konversi dari raster ke ASCII untuk ketiga jenis data topografi. Gambar 16 di bawah adalah contoh dari *dem* hasil ekstrak ke format ASCII. Selanjutnya data *dir* dan *acc* juga harus diekstrak dengan cara yang sama.



```

ncols      389
nrows     239
xllcorner  104.4000000000
yllcorner  -5.9291666667
cellsize   0.00416666666700
NODATA_value -9999
-9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
-9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
-9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
-9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
-9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999

```

Gambar 16. Data *header* dari hasil *export* format ASCII pada data topografi

Dalam format ASCII *ncols* dan *nrows* merupakan jumlah kolom dan baris matriks data dari yang disiapkan. Dimana *xllcorner* dan *yllcorner* merupakan koordinat dari *south west end* dari data, *cellsize* merupakan ukuran *cell* dari matriks yang digunakan tersebut. Dikarenakan data ini merupakan data raster yang kotak *cell* maka pada bagian data diluar DAS dimaknai sebagai *NODATA_value* dengan nilai *default* ASCII versi ini yaitu -9999.

Selanjutnya perlu dilakukan penyesuaian data *DEM* (*dem adjustment*) dikarenakan terdapat beberapa *hollows* pada data elevasi *HydroSHEDS* yang asli (Lehner, 2022). Beberapa di antaranya merupakan fitur topografi yang sesuai dengan keadaan sebenarnya, sementara beberapa di antaranya disebabkan oleh karakteristik *DEM*. Sebagai contoh, lembah yang dalam dan sempit, di mana air sungai mengalir, hal ini

dapat terhalang oleh topografi di sekitarnya karena resolusi DEM. Karena hal ini, kedalaman air dan debit sungai yang disimulasikan dengan *DEM* asli menjadi tidak realistis.

Oleh karena itu, penyesuaian *DEM* berikut direkomendasikan untuk menghindari *hollows* yang tidak realistis pada *DEM* asli. Program yang disediakan bernama *demAdjust2* (*demAdjust2.exe*) untuk pengguna *windows*) mengikuti arah aliran *HydroSHEDS* dan menghilangkan semua kemiringan negatif di sepanjang arah aliran dengan *carving* dan *lifting* *DEM* asli.

Program *demAdjust2* melakukan setiap prosedur di atas secara berulang-ulang untuk setiap jalur aliran dari semua sel hulu yang terdeteksi sampai semua kemiringan negatif dihilangkan. Perhatikan bahwa prosedur di atas tidak mengubah arah aliran.

- a. Berdasarkan arah aliran, *demAdjust2* menemukan sel hulu (yaitu sel yang tidak memiliki aliran masuk).
- b. Di antara sel-sel hulu yang terdeteksi, urutan pencarian ditentukan dari total panjang jalur aliran dari setiap sel hulu ke sel paling hilir.

Edit *demAdjust2.txt* jika perlu dan jalankan program *demAdjustment2* dengan mengetikkan "*demAdjustment2.exe*" pada *Command Prompt* di bawah *Project Folder* (misal: *sekampung15s*).

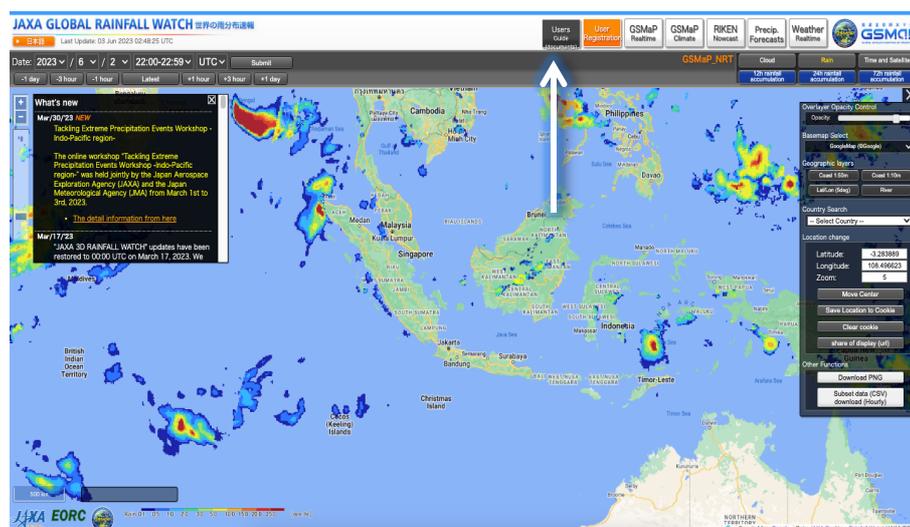
Proses ini diperlukan bahkan jika ingin menggunakan data *dem* asli. Program "*demAdjust2*" tidak hanya memodifikasi data "*dem*" tetapi juga data arah aliran "*dir*". "*dir*" yang dimodifikasi (dinamai sebagai "*adir*") memiliki arah aliran yang sama dengan nol pada sel *outlet*. Operasi ini harus dilakukan dan "*adir*" harus selalu digunakan untuk simulasi RRI. Perhatikan juga bahwa tidak ada koreksi untuk "*acc*", jadi gunakan "*acc*" yang asli terlepas dari prosedur *demAdjust2*.

3.2.2 Data Hujan

Data akan digunakan sebagai *input* dari pemodelan *RRI* ini. Data curah hujan harus mencakup semua area simulasi. Namun, tidak harus untuk memiliki resolusi yang sama atau area cakupan yang sama. Produk *GSMaP* akan digunakan pada penelitian ini dimana data meliputi *GSMaP_NRT (realtime)*, *GSMaP_MVK* (standar ver.5 atau ver.6) dan *GSMaP_Gauge* (komposit penakar hujan).

Penelitian menggunakan produk pemetaan curah hujan satelit global (*GSMaP*) sebagai data curah hujan satelit dalam penelitian ini karena resolusi spasial dan temporal yang tinggi. Data yang digunakan yaitu *GSMaP_NRT (realtime)* berupa data harian (*daily*) dengan resolusi *0,1 degree* atau sekitar 11,1 km yang nantinya akan di *subset* melingkupi DAS Sekampung yang menjadi lokasi penelitian. Data ini dipersiapkan dari rentang tahun 2000 sampai dengan 2009.

Situs web seperti pada Gambar 17. untuk mendapatkan informasi dan pendaftaran serta mengunduh data di *ftp (http://sharaku.eorc.jaxa.jp)*. Setelah itu melakukan pendaftaran pengguna kemudian akan diberikan *user id (IUD)* dan *password (PW)* melalui *e-mail*.



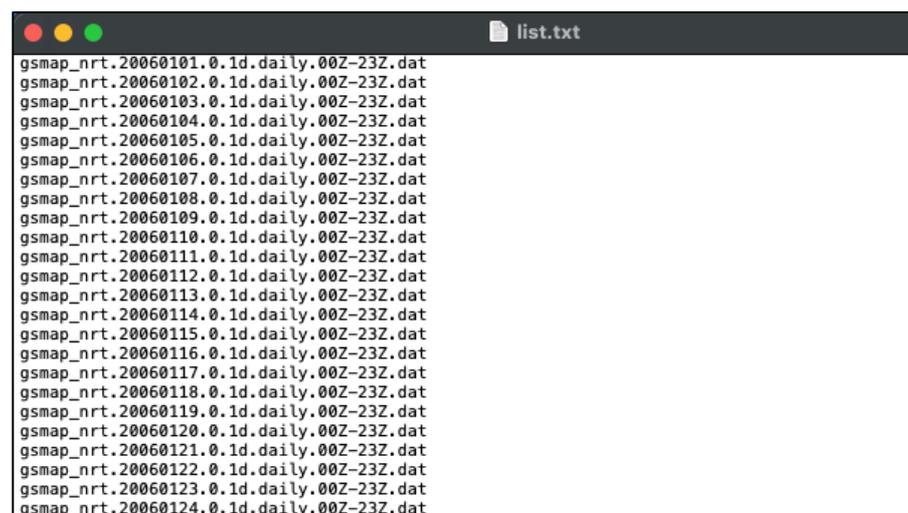
Gambar 17. Tampilan *dashboard* JAXA

Data curah hujan ini mencakup dari tahun 2000 hingga saat ini dan terdiri dari kumpulan data curah hujan harian jangka panjang, yang dikumpulkan dan dianalisis dari pengamatan penakar hujan dengan resolusi 0,1°. Untuk kebutuhan analisis maka akan digunakan data dari rentang tahun 2000 sampai dengan 2009.

Data disiapkan dalam *Project Folder* yang telah disiapkan dengan beberapa langkah secara umum yang dilakukan yaitu:

1. Membuka semua *file* yang telah diunduh (dapat menggunakan "*gunzip **", atau menggunakan program yang sesuai untuk membuka *file* "**.dat.gz*") sehingga format data menjadi "**.dat*". Menempatkan *file* data hujan yang telah di *extract* di atas dalam folder "*/Project/sekampung15s/rain/infile*".
2. Menyalin *file* "*/etc/GSMaP/makeList.bat*" di dalam "*gsmmap*" dan jalankan untuk mendaftarkan semua *file* "*gsmmap_*.dat*" sebagai "*list.txt*". Atau dengan perintah pada "*Terminal*"/"*shell*"/"*Bash*" pada direktori *file* simulasi "*/Project/sekampung15s/rain/*" hasil dapat dilihat pada Gambar 18. di bawah ini menggunakan perintah:

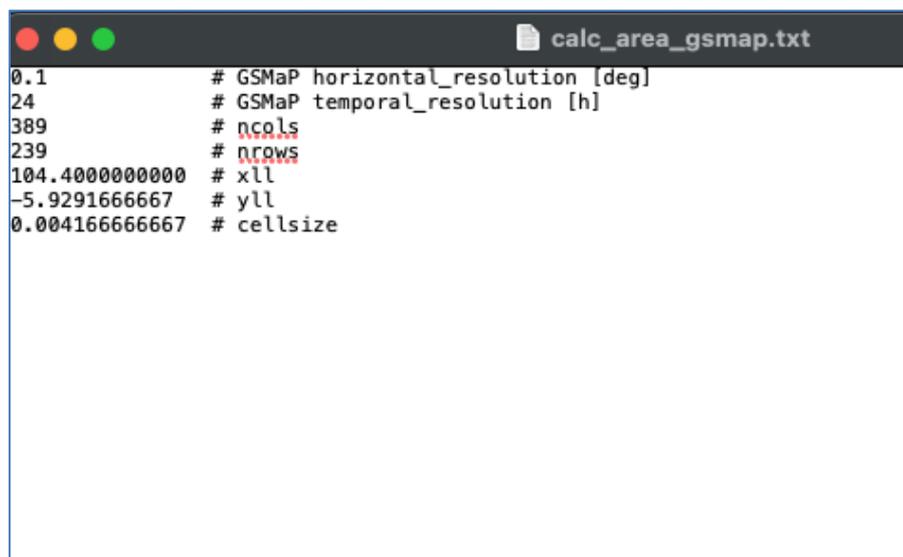
```
$ dir /b "infile" > list.txt           # untuk Windows
$ ls ./infile > list.txt              # untuk Linux/Unix
```



```
gsmmap_nrt.20060101.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060102.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060103.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060104.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060105.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060106.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060107.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060108.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060109.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060110.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060111.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060112.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060113.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060114.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060115.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060116.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060117.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060118.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060119.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060120.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060121.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060122.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060123.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
gsmmap_nrt.20060124.0.1d.daily.00Z-23Z.dat
```

Gambar 18. Hasil file "*list.txt*" yang berisi *file list gsmmap*

3. Untuk menghitung rentang untuk data hujan yang mencakupi DAS Sekampung dapat menggunakan program *executable* “*calc_area_gsmap*”. Sebelum menjalankan *file* tersebut terlebih dahulu menyalin *control file* “*/etc/GSMaP/calc_area_gsmap.txt*” dan diletakkan di bawah folder “*/Project/sekampung15s/rain/*” yang telah dibuat.
4. Pada “*calc_area_gsmap.txt*” yang telah disalin, tentukan “*horizontal_resolution [d]*” dan “*temporal_resolution [h]*” dari produk *GSMaP* asli yang akan digunakan. Tentukan juga “*ncols*” untuk “*cellsize*” berdasarkan target DAS, yang parameternya dapat diperoleh dari *header file* topografi “*dem*” pada Gambar 16. Sehingga *input* dapat dilihat pada Gambar 19. di bawah ini.



```

0.1          # GSMaP horizontal_resolution [deg]
24           # GSMaP temporal_resolution [h]
389         # ncols
239         # nrows
104.400000000 # xll
-5.929166667 # yll
0.004166667 # cellsize

```

Gambar 19. *Control file* “*calc_area_gsmap*” untuk menghitung cakupan hujan DAS

5. Selanjutnya menjalankan “*calc_area_gsmap*” sehingga dihasilkan *file* keluaran “*out_by_calc_area_gsmap.txt*” yang merupakan hasil perhitungan area koordinat, lokasi *i, j* data hujan seperti ditunjukkan pada Gambar 20 di bawah ini.

```

out_by_calc_area_gsmmap.txt
horizontal_resolution [d] : 0.1000000
temporal_resolution [h] : 24

xll : 104.4000
yll : -5.929167
xur : 106.0208
yur : -4.933333

xll_rain : 104.4500
yll_rain : -6.049999
xur_rain : 106.0500
yur_rain : -4.850002

jleft : 1044
ibottom : 660
iright : 1060
itop : 648

xllcorner_rain (raster): 104.4000
yllcorner_rain (raster): -6.099999
cellsize_rain : 0.1000000

```

Gambar 20. Hasil *output file* “*calc_area_gsmmap*” sebagai *control file* pembacaan data spasial

- Menjalankan “*read_gsmmap*” pada *command prompt*/terminal pada folder “*rain*”. Maka akan dihasilkan data “*rain.dat*” yang merupakan *file input* curah hujan untuk simulasi RRI. Data ini berupa data hujan pada setiap *time step* seperti pada Gambar 21. di bawah ini.

```

rain.dat
|
0      17      13
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.10  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.12  0.08  0.07  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.07  0.03  0.03  0.00  0.05  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.04  0.01  0.13  0.09  0.04  0.02  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
86400      17      13
0.01  0.25  0.55  0.37  0.27  0.49  0.56  0.58  0.70  0.91  1.17  1.44
0.02  0.01  0.19  0.54  0.61  0.65  0.67  0.68  0.75  0.91  1.03  1.16
0.00  0.00  0.16  0.43  0.55  0.68  0.83  0.78  0.26  0.30  0.88  1.21
0.00  0.00  0.00  0.00  0.52  0.66  0.74  0.80  0.88  0.14  0.18  0.22
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.11
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.20
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.08  0.20  0.34
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.08  0.18  0.20
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00

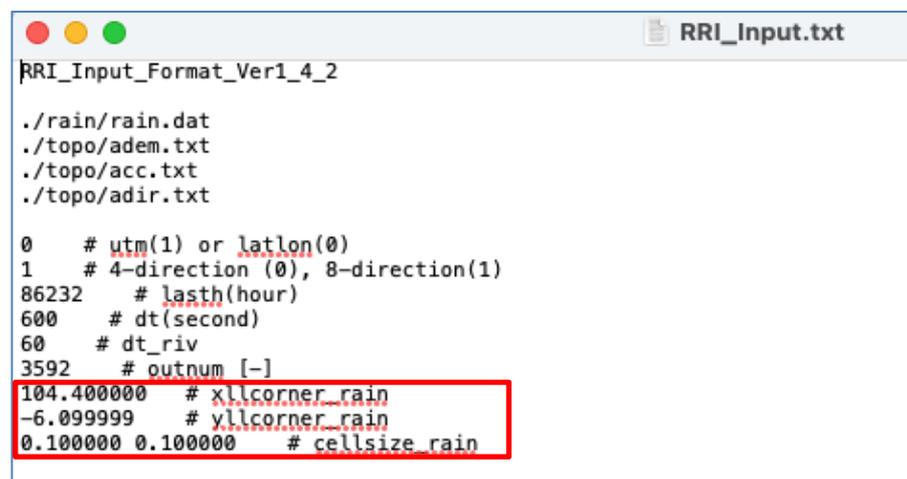
```

Gambar 21. Hasil data curah hujan “*rain.dat*” sebagai *control file* pembacaan data spasial

7. Untuk menghitung curah hujan rata-rata DAS dari data curah hujan yang dimasukkan RRI model, dapat menggunakan program "rainBasin.exe". Untuk menjalankan program ini, "rainBasin.txt" harus disiapkan terlebih dahulu.

Format data curah hujan masukan yang digunakan untuk *RRI Model*. Dengan menentukan ukuran sel, *xll_corner* dan *yll_corner* dari data curah hujan seperti ditunjukkan pada Gambar 20. di atas yang akan dimasukkan ke dalam *file* kontrol *RRI Model* (yaitu "*RRI_Input.txt*") seperti di gambarkan dalam Gambar 22. di bawah ini. Model ini dapat menampilkan distribusi curah hujan meskipun rentang dan resolusinya berbeda dengan data topografi sejauh data curah hujan tersebut mencakup seluruh cakupan simulasi.

Unit *input* curah hujan harus selalu dalam mm/jam, terlepas dari interval datanya. Interval waktu tidak perlu konstan. Curah hujan antara 3600 dan 7200 ditulis di bawah stempel waktu 7200 (sama seperti data hujan).



```

RRI_Input_Format_Ver1_4_2
./rain/rain.dat
./topo/adem.txt
./topo/acc.txt
./topo/adir.txt

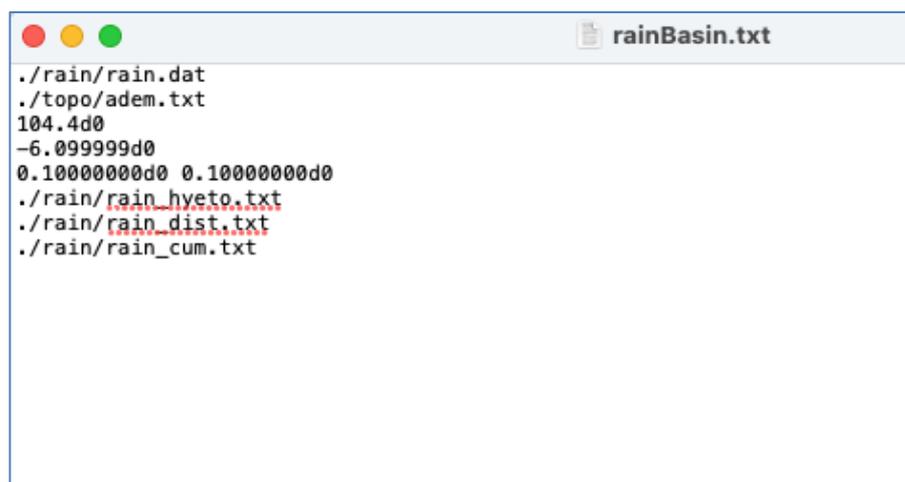
0 # utm(1) or latlon(0)
1 # 4-direction (0), 8-direction(1)
86232 # lasth(hour)
600 # dt(second)
60 # dt_riv
3592 # outnum [-]
104.400000 # xllcorner_rain
-6.099999 # yllcorner_rain
0.100000 0.100000 # cellsize_rain

```

Gambar 22. Data yang *x y* data hujan akan digunakan untuk *control file* "*RRI_Input.txt*"

Untuk menghitung curah hujan rata-rata DAS dari data curah hujan yang dimasukkan, pengguna dapat menggunakan program

"rainBasin.exe". Untuk menjalankan program ini, "rainBasin.txt" seperti digambarkan pada Gambar 23. di bawah ini harus disiapkan dengan cara mengatur L1-L2 sebagai lokasi input file hujan dan *dem*, pada L3-L4 merupakan koordinat *x* dan *y* data hujan (dapat melihat file "out_by_calc_area_gsmmap.txt", L5 merupakan ukuran *cell* data hujan dan L6-L8 dan menunjukkan *hyetograph*, peta distribusi curah hujan total dan curah hujan kumulatif.



```

./rain/rain.dat
./topo/adem.txt
104.4d0
-6.099999d0
0.1000000d0 0.1000000d0
./rain/rain_hyeto.txt
./rain/rain_dist.txt
./rain/rain_cum.txt

```

Gambar 23. Pengaturan *control file* rainBasin untuk menghitung hujan rerata DAS

Pada *command prompt*, ketik "rainBasin.exe" untuk membuat tiga *file* keluaran yang diidentifikasi di L6, L7 dan L8 untuk menunjukkan *hyetograph*, peta distribusi curah hujan total dan curah hujan kumulatif dengan menggunakan program *GIS* atau *spreadsheet* terkait.

3.2.3 Data Evaporasi

RRI Model tidak memiliki fungsi untuk memperkirakan evaporasi dari variabel iklim. Namun, dengan memberikan nilai evaporasi sebagai salah satu *file input*, model ini akan mengambil jumlah air yang sama dari penyimpanan di air permukaan dan di bawah permukaan.

Format data *input* evaporasi sama dengan data hujan. Oleh karena itu, ukuran *grid cell* dan *time step* dari *file* evaporasi dapat diatur secara acak. Sedangkan mengatur laju evaporasi yang konstan, dapat menyiapkan *file input* berikut ini (*evp_4mm.txt*), dimana sebagai contoh nilai 0.166667 mm/jam setara dengan evaporasi sebesar 4 mm/d. Perhatikan bahwa jika terdapat cukup air pada *grid cell* lereng, dan jika *grid cell* menyimpan air pada *Green Ampt-Model*, maka model akan mengambil air dari air kumulatif pada model *GA*.

Pada penelitian ini akan digunakan data laju penguapan (evaporasi) dari data BMKG Stasiun Meteorologi Radin Inten II Lampung dengan penilaian peneliti untuk evaporasi rata-rata yang terjadi di DAS Sekampung. Data akan dibuat dalam ASCII seperti data hujan dengan *time step*, *ukuran grid* yang sama pula untuk *input* penelitian ini.

3.2.4 Data Geometri Sungai

RRI Model mengasumsikan bentuk persegi panjang untuk semua penampang melintang sungai. Untuk menentukan penampang melintang sungai (termasuk lebar sungai W , kedalaman D , dan tinggi tanggul (He)). Parameter dari persamaan empiris berikut ini harus ditetapkan secara tepat untuk mewakili kondisi target tangkapan air.

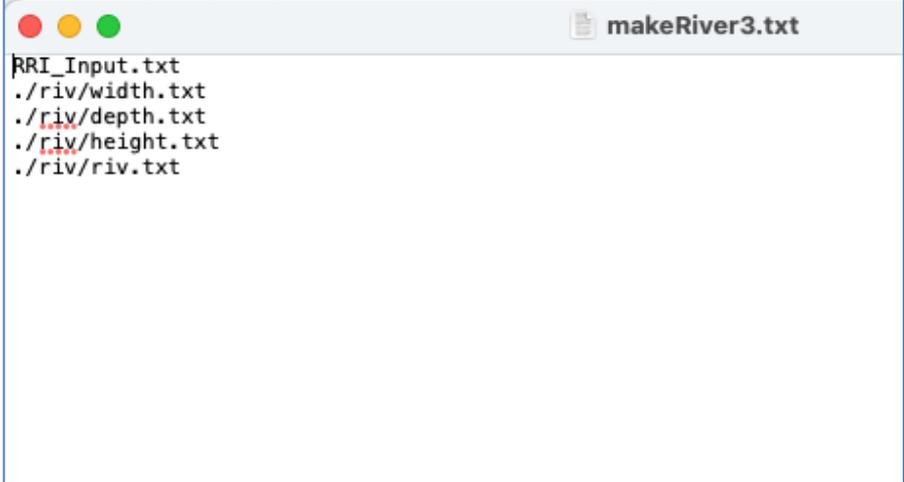
$$width = c_w A^{s_w} \quad (27)$$

$$depth = c_d A^{s_d} \quad (28)$$

di mana A dalam persamaan tersebut adalah daerah tangkapan air di hulu [km^2] untuk setiap sel jaringan sungai.

Pada Gambar 24. di bawah ini L1 merupakan *file* untuk mengontrol *input* dan *output* dari penentuan geometri sungai. *File* “*RRI_Input.txt*”

berisi file parameter yang digunakan seperti di tunjukan Gambar 25 di bawah ini. Sedangkan L2-L5 merupakan lokasi *output file* program ini.

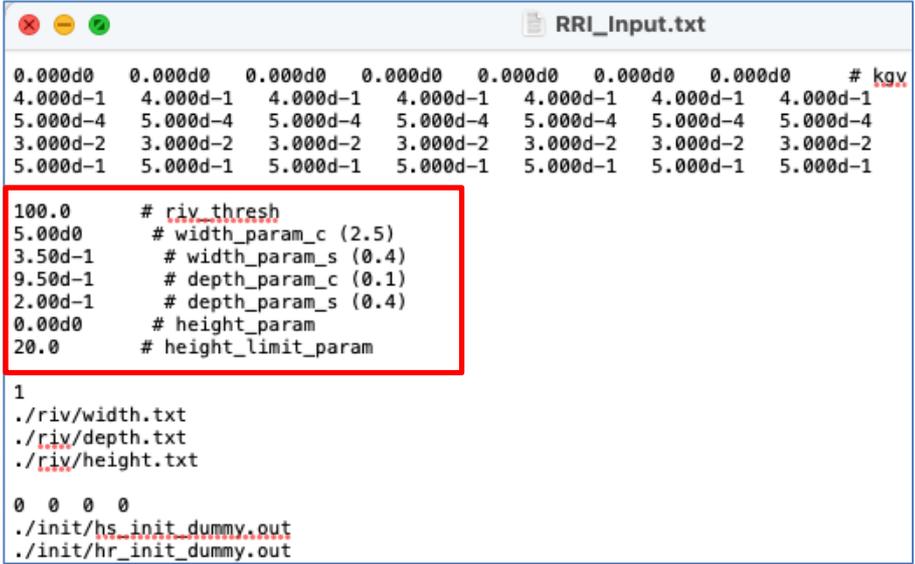


```

RRI_Input.txt
./riv/width.txt
./riv/depth.txt
./riv/height.txt
./riv/riv.txt

```

Gambar 24. Pengaturan *control file* program “makeRiver3” dalam penentuan geometri sungai



```

0.000d0 0.000d0 0.000d0 0.000d0 0.000d0 0.000d0 0.000d0 # kgv
4.000d-1 4.000d-1 4.000d-1 4.000d-1 4.000d-1 4.000d-1 4.000d-1
5.000d-4 5.000d-4 5.000d-4 5.000d-4 5.000d-4 5.000d-4 5.000d-4
3.000d-2 3.000d-2 3.000d-2 3.000d-2 3.000d-2 3.000d-2 3.000d-2
5.000d-1 5.000d-1 5.000d-1 5.000d-1 5.000d-1 5.000d-1 5.000d-1

100.0 # riv_thresh
5.00d0 # width_param_c (2.5)
3.50d-1 # width_param_s (0.4)
9.50d-1 # depth_param_c (0.1)
2.00d-1 # depth_param_s (0.4)
0.00d0 # height_param
20.0 # height_limit_param

1
./riv/width.txt
./riv/depth.txt
./riv/height.txt

0 0 0 0
./init/hs_init_dummy.out
./init/hr_init_dummy.out

```

Gambar 25. Pengaturan parameter dalam pembentukan geometri sungai

Untuk mengetahui jumlah orde sungai yang masuk dalam analisis simulasi maka digunakan *toolbox Stream order* dengan metode *Stahler* seperti digambarkan dalam Gambar 38. Perintah “*Stream Order*” untuk menganalisis orde sungai yang diatur dalam “*riv_threshold*” di atas.

3.2.5 Data Tutupan Lahan dan Penggunaan Lahan

Pengaruh dari tutupan lahan (atau jenis tanah) dapat direfleksikan pada model dengan menetapkan parameter model yang berbeda. Pada penelitian ini akan digunakan *GLCNMO2008*. Data tutupan lahan (GLCNMO) versi global dikembangkan oleh sekretariat *ISCGM* bekerja sama dengan Otoritas Informasi Geospasial Jepang (*GSI*), Universitas Chiba, dan *NGIA* dari masing-masing negara dan wilayah.

Global Land Cover by National Mapping Organizations (GLCNMO) merupakan informasi geospasial dalam format raster yang mengklasifikasikan status tutupan lahan di seluruh dunia ke dalam 20 kategori. Klasifikasi ini didasarkan pada *LCCS* yang dikembangkan oleh *FAO*. Oleh karena itu, dimungkinkan untuk membandingkan dan mengintegrasikan *GLCNMO* dan produk data tutupan lahan lainnya berdasarkan *LCCS* (Tateishi dkk., 2014).

Data versi *Global Land Cover (GLCNMO)* dikembangkan oleh sekretariat *ISCGM* bekerja sama dengan Otoritas Informasi Geospasial Jepang (*GSI*), Universitas Chiba, dan *NGIA* perwakilan negara. Data tersebut dibuat dengan menggunakan data *MODIS* dengan teknologi penginderaan jauh. Berikut spesifikasi data yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 2. Rangkuman *dataset GLCNMO v2* yang digunakan

	<i>Version 2</i>
<i>Data source</i>	<i>MODIS data 2008 (Terra & Aqua)</i>
<i>Coordinate system</i>	<i>WGS84</i>
<i>Resolution</i>	<i>15 arcseconds</i>
<i>Data type</i>	<i>Byte (8bits)</i>

3.3. Pemodelan *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)*

3.3.1 Tahapan Pemodelan *RRI*

1. Persiapan *RRI Model*

Dalam tahap pemodelan ini konfigurasi *file* dilakukan sesuai dengan pengaturan *control file* kode sumber dan format data yang sesuai dengan *input* model. Pengaturan folder *input* dan *output* mengikuti konfigurasi yang telah dijelaskan pada manual *RRI* yaitu terdapat pada *file* “*RRI_Input.txt*”.

Pada tahap sebelumnya *pre-processing* terkait *input data GIS* telah dijelaskan pada bab sebelumnya. *Input* data berupa data hujan, topografi dan parameter lainnya di letakan pada folder yang ditentukan. Serta mengatur *control file* “*RRI_Input.txt*” yang menjadi *file* yang mengatur model dan *variable condition* lainnya.

Persiapan untuk penggunaan *RRI-CUI*

1. Buka *zip* “*RRI_1_4_2_7.zip*” dan pindahkan di bawah direktori kerja
2. Tambahkan *path* ke folder *RRI-CUI* dengan mengatur *Environment* sistem operasi dan *install compiler fortran* juga terlebih dahulu.
3. Proses Pengaturan Kondisi untuk Simulasi *RRI* “*RRI_Input*” yaitu:

L1 : Versi format *file* kontrol.

Versi ini harus kompatibel dengan versi program *RRI*. Ketika versi *RRI Model* diperbarui, pengguna mungkin diminta untuk memodifikasi *file* kontrol ini agar sesuai dengan versi yang diperbarui.

L3 - L6: Jalur dari *file input* (curah hujan, *dem*, *acc*, *dir*)

Perhatikan bahwa *file* arah yang disesuaikan dengan nol di *outlet* harus dibaca di kolom arah aliran. Penyesuaian ini (untuk *dem* dan *dir*) dapat diimplementasikan melalui proses *demAdjust2*.

L8 : Sistem koordinat data topografi dan curah hujan
(UTM (0) atau Lat Lon (1))

L9 : Simulasi dengan 4
(0) atau 8-arah (1) oleh model dua dimensi [*default*: 1]

L10 : Periode simulasi [jam]

L11: Langkah waktu simulasi [detik], [*default*: 600 detik]

L12 : Langkah waktu simulasi untuk sungai [detik], [*default* : 60 detik]

Langkah-langkah waktu di atas hanyalah pengaturan awal. Algoritma *Runge-Kutta* adaptif yang digunakan untuk simulasi RRI dapat memperpendek langkah waktu jika diperlukan.

L13 : Jumlah *file output*

Periode simulasi yang ditentukan di atas dibagi rata untuk *output* simulasi.

L14 - L16 : Koordinat barat daya dan resolusi data curah hujan
Jumlah kolom dan baris ditulis dalam data curah hujan.

L18 : Kekasaran *Manning* di saluran sungai

L19 : Jumlah penggunaan lahan

Set parameter yang ditentukan di bawah ini harus sesuai dengan jumlah penggunaan lahan yang ditentukan di sini. Sebagai

contoh, jika terdapat tiga jenis penggunaan lahan di daerah tangkapan air, tuliskan tiga set parameter yang berbeda. Siapkan juga peta penggunaan lahan yang memiliki nomor dari satu sampai tiga, sehingga set parameter yang dijelaskan di bawah ini akan ditetapkan ke setiap *grid cell* penggunaan lahan. Parameter kolom pertama diberikan pada tipe penggunaan lahan "1" di peta penggunaan lahan.

L20 : difusi (1) atau *kinematik* (0) [*default*: 1]

Mode *default RRI Model* menggunakan persamaan gelombang difusi. Namun, dengan mengatur nol di sini, *RRI Model* dapat menggunakan pendekatan gelombang *kinematik*.

L21 : Kekasaran *Manning* pada sel lereng

L22: Kedalaman tanah [m]

L23 : Porositas efektif [-]

L25, L26 : Parameter model infiltrasi *Green-Ampt*

Tetapkan $ksv = 0$ untuk menonaktifkan model infiltrasi *Green-Ampt*. nilai "*ksv*": konduktivitas hidraulik jenuh vertikal [*m/s*], "*faij*" adalah isapan pada bagian depan pembasahan yang ditentukan oleh *Sf*.

Catatan: Pada versi sebelumnya dari *RRI Model*, parameter "*delta*" dan "*infiltr_limit*" digunakan. Parameter "*delta*" sekarang digantikan oleh "*gamma*" untuk mewakili porositas tanah dikurangi kandungan volume air awal ($\phi - \theta_i$). Parameter "*infiltr_limit*" dihitung dalam program *RRI* dengan mengalikan "*soildepth*" dan "*gamma*" untuk memperkirakan kedalaman infiltrasi kumulatif maksimum dalam meter. Setelah kedalaman infiltrasi kumulatif mencapai kedalaman maksimum ini, tidak

ada lagi infiltrasi yang terjadi pada *grid cell*.

L28 - L30 : parameter model bawah permukaan dan permukaan lateral

L28 dan L30 adalah opsi untuk mempertimbangkan aliran bawah permukaan tak jenuh dan jenuh serta aliran permukaan ke arah lateral. "*ka*" adalah konduktivitas hidraulik jenuh lateral (yang biasanya dua atau tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan konduktivitas hidraulik vertikal yang ditetapkan untuk model *Green-Ampt*). Sebagai permulaan, tetapkan nilai nol untuk "*dm*" untuk menonaktifkan opsi untuk mempertimbangkan aliran bawah permukaan yang tidak jenuh. Dengan menetapkan nol, maka tidak ada pertimbangan aliran bawah permukaan jenuh. Lihat 8.7 untuk detail pengaturan parameter.

Catatan: Pada versi sebelumnya dari *RRI Model*, parameter "*da*" digunakan untuk merepresentasikan kedalaman air maksimum pada aliran bawah permukaan jenuh. Sekarang ini dihitung sebagai "kedalaman tanah" dikalikan dengan "*gammaa*" di dalam program.

L32 - L36

Tetapkan "*ksg = 0.d0*" untuk menghindari komponen air tanah dalam. L33 - L36 menjadi tidak aktif ketika *ksg = 0.d0*. Jika ingin mengaktifkan komponen air tanah dalam, pastikan untuk mengatur kondisi awal yang sesuai setelah komputasi *spin-up* yang cukup. Jika tidak, model akan dimulai dengan *hg = 0*, yang berarti air tanah dalam sudah jenuh di dalam batuan dasar. Catatan *hg* adalah jarak dari antarmuka tanah-batuan dasar ke muka air tanah di dalam batuan dasar.

L32: *ksg*: konduktivitas hidrolis vertikal di bagian atas batuan dasar
[m/s]

L33: γg : porositas batuan dasar [-]

L34: kg_0 : konduktivitas hidrolik lateral pada permukaan batuan dasar [m/s]
L35: fg : peluruhan eksponensial konduktivitas hidrolik batuan dasar

L36: rgl (m/s): kehilangan air tanah secara vertikal dari dasar batuan dasar (biasanya diatur menjadi nol untuk menjaga keseimbangan air di dalam model).

L38 - L44: Pengaturan geometri saluran sungai dengan persamaan
Persamaan di atas digunakan sebagai pengaturan *default* untuk lebar dan kedalaman saluran sungai. Perhatikan bahwa A dalam persamaan adalah daerah tangkapan air hulu [km²] untuk setiap sel jaringan sungai.

L46 - L49 : Pengaturan geometri saluran sungai dengan *file* (opsional)
Jika ingin mengatur lebar, kedalaman dan tinggi tanggul dari *file* dan bukan dari persamaan di atas, setel 1 pada L46 dan siapkan *file* dalam format ESRI/ASCII.

L51 - L55 : Kedalaman air awal pada lereng, sungai, air tanah dan Model GA kumulatif berdasarkan *file* (opsional)

Jika seseorang ingin mengatur kedalaman air awal pada lereng dan sungai untuk setiap *grid cell*, tetapkan 1 pada L51 dan siapkan *file* distribusi kondisi awal yang ditentukan pada L52, L53, L54 dan L55. Perhatikan bahwa format *file-file* tersebut sama dengan keluaran *RRI Model*.

L57 - L59: Kondisi batas kedalaman air (opsional)

L57 : Kondisi batas kedalaman air lereng, L58: Kondisi batas kedalaman air sungai Lihat Bagian 8 untuk format *file* kondisi batas. Gunakan *flag* 1 untuk format data satu dimensi (yaitu data

deret waktu pada lokasi kondisi batas tertentu). Gunakan *flag 2* jika *file* kondisi batas disiapkan dalam format data dua dimensi, yang jumlah *grid cellnya* harus sama dengan data topografi termasuk *dem*, *dir*, dan *acc*. Pada kedua kasus tersebut, keterangan waktu dalam kondisi batas dapat bervariasi di dalam *file*.

L61 - L63: Kondisi batas debit air (opsional)

(Sama seperti L57 - L59)

L65 - L66 : Pengaturan penggunaan lahan (opsional)

Jika ingin menggunakan beberapa set parameter untuk *grid cell* yang berbeda, tetapkan 1 di L65 dan baca *file landuse* yang ditentukan di L66.

L68 - L69 : Pengaturan kondisi bendungan (opsional)

RRI Model menyimulasikan efek dari operasi waduk bendungan berdasarkan aturan sederhana. Lihat kode sumber "RRI_Dam.f90" untuk detailnya. (Lihat juga 8.11)

L71 - L72 : Pengaturan pengalihan sungai (opsional)

Pengaturan pengalihan saluran sungai

L74 - L78 : Pengaturan evapotranspirasi (opsional)

Siapkan *file* ET dan tentukan jalur pada L75. Format *file* ET sama dengan curah hujan. Resolusi dan sudut *xll* dan *yll* dapat berbeda dari *file* curah hujan sejauh mencakup semua domain simulasi.

L80 - L81 : Pengaturan panjang sungai (opsional):

Opsi yang baru ditambahkan untuk mengatur panjang saluran sungai secara sembarang untuk setiap *grid cell* sungai (sedang dalam persiapan untuk detail lebih lanjut tentang opsi ini).

L83 - L85 : Pengaturan penampang melintang sungai (opsional):

Opsi yang baru ditambahkan untuk mengatur informasi penampang melintang sembarang untuk setiap sel jaringan sungai (sedang dalam pengembangan)

L87 - L97 : Pengaturan *file* keluaran

Ubah pengaturan L87 ke "1" untuk menampilkan rangkaian hasil simulasi yang berbeda yang tercantum dalam urutan yang sama antara L88 dan L97.

L99 - L100: Keluaran hidrograf di lokasi yang dikehendaki

Tetapkan 1 di L99 untuk membaca *file* lokasi dan mengeluarkan hidrograf di lokasi yang ditentukan.

2. Running RRI Model

Setelah proses persiapan sub-bab di atas selesai, dilakukan *RRI Model* dengan melakukan eksekusi *file executable* "0_RRI_version_" menggunakan *command prompt/terminal* yang tersedia sistem operasi. Perlu dilihat status kalkulasinya untuk melihat proses dari model yang dijalankan seperti ditunjukkan pada Gambar 26 di bawah ini.

```

0.522E-02
1312 / 96624
shrink (riv): 34.6164424205827 5.92168508806005 1522
shrink (riv): 29.0635944093541 1.32039074672774 1523
max hr: 2.31432023183301 loc : 160 327
max hs: 0.859536048718181 loc : 154 338
0.175E+09 0.000E+00 0.000E+00 0.140E+09 0.356E+08
0.522E-02
1313 / 96624
shrink (riv): 37.9074351332486 4.11791556385418 1523
shrink (riv): 19.9305228470926 8.58603930140883 1522
max hr: 2.31744943423062 loc : 160 327
max hs: 0.859536105853313 loc : 154 338
0.175E+09 0.000E+00 0.000E+00 0.140E+09 0.355E+08
0.521E-02
1314 / 96624
shrink (riv): 46.5229280396262 1.81512641873758 1522
shrink (riv): 23.2614640198131 27.4334385478799 1522
max hr: 2.31014179891999 loc : 160 327
max hs: 0.859536162847006 loc : 154 338
0.175E+09 0.000E+00 0.000E+00 0.140E+09 0.355E+08
0.521E-02
1315 / 96624
shrink (riv): 46.6772134645307 1.79124649134904 1522
shrink (riv): 23.3386067322654 27.7754936023543 1522

```

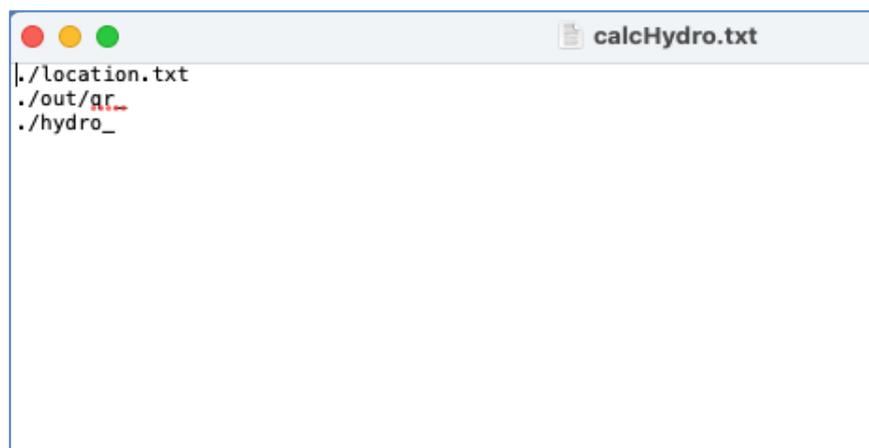
Gambar 26. Tampilan proses perhitungan *RRI Model*

3.3.2 Hasil Pemodelan

Hasil dari simulasi model RRI berupa data *file* keluaran berisi kedalaman air di lereng/ genangan ($hs_{_}$) dan kedalaman di sungai ($hr_{_}$) serta debit sungai ($qr_{_}$) pada *time step* tertentu. Satuan dari *output* adalah [m] untuk kedalaman air dan [m^3/s] untuk debit. Selanjutnya akan di visualisasikan untuk keperluan kalibrasi, validasi dan komparasi proses selanjutnya.

1. Penentuan Hidrograf di lokasi debit Observasi

Menggunakan Program *Fortran* bernama "*calcHydro.exe*" dapat digunakan untuk menghasilkan hidrograf dengan mengambil nilai dari "*out/qr_***.txt*" pada lokasi tertentu. Dimana L1 pada *control file* untuk lokasi *output* hidrograf yang dituju dalam hal ini Bendung Agroguruh.



Gambar 27. Pengaturan *control file calcHydro* untuk menghitung debit simulasi (hidrograf) model pada titik lokasi yang ditentukan

- Edit "*RRI/Model/calcHydro.txt*" (dapat melihat "*RRI-CUI/etc/calcHydro/00_readme.txt*"),
L1 : [*Input*] *file* lokasi (misalnya *./sekampung15s/location.txt*)
L2 : [*Input*] *file* keluaran RRI (misalnya *./out/qr_*)

L3: [Output] file hidrograf (contohnya
./project/sekampung15s/disc_)

- Jalankan "calcHydro.exe". (Jalankan "makePostProcess.bat" terlebih dahulu untuk melakukan kompilasi).
- Periksa file yang telah dibuat yang ditentukan di L3 dari "calcHydro.txt". (Misalnya ./infile/sekampung15s/disc_)

Untuk menghasilkan hidrograf. Perangkat lunak *plotting* lainnya, seperti *Excel*, juga dapat digunakan untuk menggambar hidrograf dari file yang telah dibuat (./sekampung15s/disc_Agroguruh.txt).

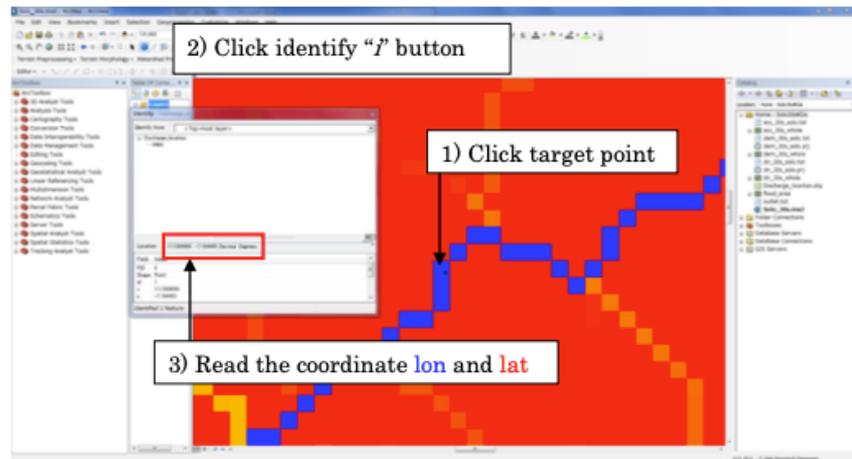
Pada file lokasi (contoh: ./sekampung15s/location.txt), dapat mencantumkan semua titik target yang ingin hitung hidrografnya. Tuliskan "nama lokasi" dan "loc_i" (arah-y) dan "loc_j" (arah-x).



Gambar 28. Pengaturan *control file rainBasin* untuk menghitung hujan rerata DAS

Perhatikan bahwa "loc_i" adalah baris (arah y dari atas) dan "loc_j" adalah kolom (arah x dari kiri). Untuk mengidentifikasi titik pengamatan dalam koordinat *mesh* (loc_i, loc_j), seseorang dapat menggunakan "/RRI/etc/coordinate.xlsx" untuk menghitung berdasarkan koordinat pada garis lintang (y) dan garis bujur (x).

Temukan garis lintang (y) dan garis bujur (x) dari titik pengamatan menggunakan *ArcGIS*.



(Displaying "acc" on top to make sure the selected point is on a river grid cell.)

Gambar 29. Menentukan data loc_i , loc_j pada file *acc* menggunakan *ArcMap*

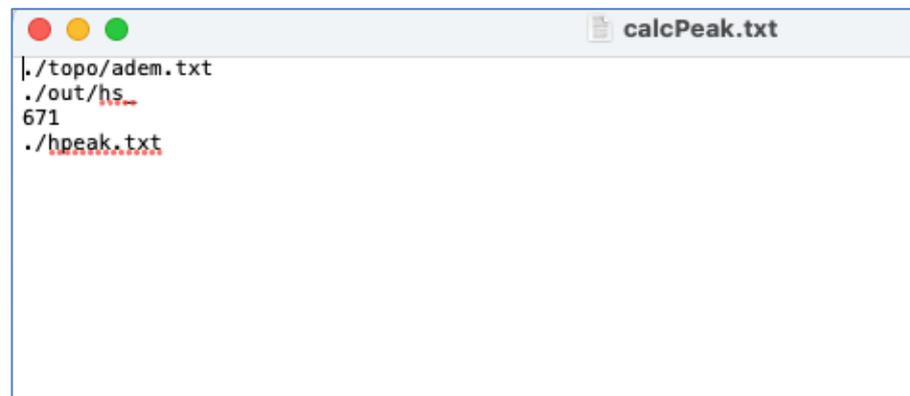
Menampilkan "acc" di bagian atas untuk memastikan titik yang dipilih berada pada sel jaringan sungai). Membuka salah satu data topografi (yaitu *dem*, *dir*, atau *acc*).

Baca bagian *header* (kotak merah pada gambar di atas) dari data topografi dan salin informasi yang sama ke dalam file Excel (contoh: */RRI-CUI/etc/koordinat.xlsx*). Ketik koordinat x dan y (atau *lon* dan *lat*) dari titik target, kemudian koordinat jaring yang dihitung (loc_i , loc_j) muncul di (E4, E5). "coordinate.xlsx" juga dapat digunakan untuk mengonversi dari (loc_i , loc_j) ke (*lon*, *lat*).

2. Memvisualisasikan Kedalaman Genangan Puncak

Program *Fortran* bernama "calcPeak.exe" dapat digunakan untuk menghitung kedalaman banjir maksimum berdasarkan keluaran Model RRI ("*out/hs_*.out*"). Untuk prosedur yang lebih rinci yaitu:

- Edit file "*RRI/Model/calcPeak.txt*" setelah eksekusi model RRI.
- Dalam "*calcPeak.txt*", L1 menetapkan jalur file *dem*, L2 menetapkan file keluaran model RRI untuk menghitung puncak, dan L3 menetapkan jumlah file keluaran. L4 mendefinisikan file keluaran program *calcPeak*. Lihat detail file *readme* dari "*/etc/calcPeak*".
- Jalankan "*calcPeak.exe*". (Jalankan "*makePostProcess.bat*" jika file yang dapat dieksekusi tidak ada). Periksa file yang dibuat yang ditentukan di L4 dari "*calcPeak.txt*". Dapat melihat Gambar 30. dibawah ini:



```

./topo/adem.txt
./out/hs_
671
./hpeak.txt

```

Gambar 30. Control file untuk menghitung kedalaman genangan puncak



```

(base) → dialy2000_2001withoutBoundaryq_ - aulfik@192 - ..outBoundaryq_ - -z...
1/ 671
2/ 671
3/ 671
4/ 671
5/ 671
6/ 671
7/ 671
8/ 671
9/ 671
10/ 671
11/ 671
12/ 671
13/ 671
14/ 671
15/ 671
16/ 671
17/ 671
18/ 671
19/ 671
20/ 671

```

Gambar 31. Penentuan data puncak genangan dari *time step* simulasi

Data puncak air yang diperoleh mengikuti format *ESRI/ASCII* yang dapat divisualisasikan dengan *ArcGIS*.

3.4. Kalibrasi, Validasi dan Komparasi Model

Kalibrasi bertujuan untuk menyesuaikan parameter-parameter yang berpengaruh terhadap model, sehingga dapat memperkecil perbedaan hasil model dan observasi. Sedangkan validasi berguna untuk membuktikan suatu model yang dapat memberikan hasil yang konsisten sesuai mekanisme pengukuran model terhadap kondisi di lapangan.

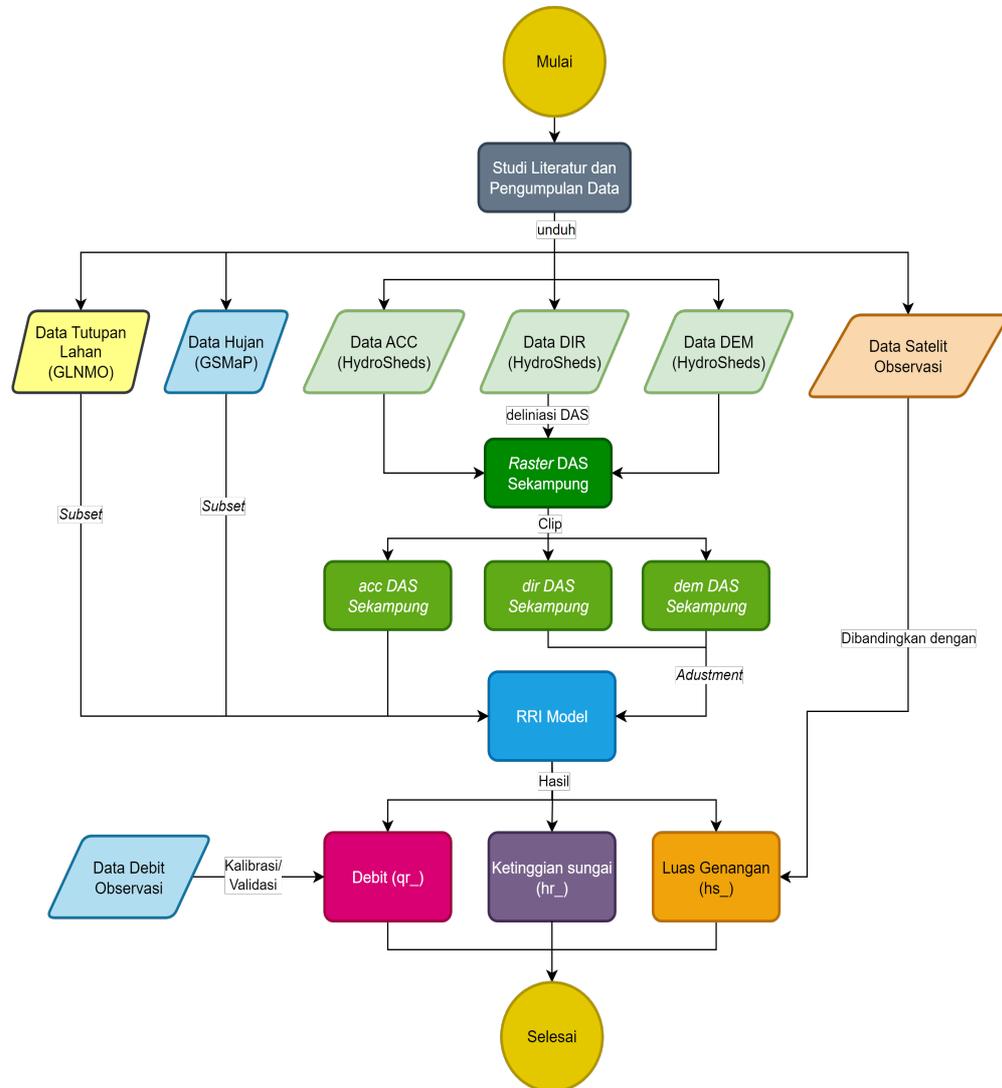
Untuk melakukan validasi dan kalibrasi model akan dilakukan dengan membandingkan data debit observasi terukur dan debit simulasi model. Data yang digunakan dalam proses ini yaitu yang bersumber dari UPTD Balai Pengelola Sumber Daya Air (BPSDA) Sungai Sekampung di Metro sebagaimana dipakai juga pada penelitian (Wahono dkk., 2014).. Data debit selama sepuluh tahun dari tahun 2000 hingga tahun 2009 yang data dipilih untuk memberikan pola aliran sungai yang wajar.

Selanjutnya akan ditetapkan lokasi *grid* sungai yang akan dibandingkan sesuai data di atas dan digambarkan berdasarkan debit simulasi model di lokasi tersebut. Lokasi pelaksanaan validasi dan kalibrasi akan dilakukan di stasiun pengamatan Bendung Agroguruh.

Dalam penelitian ini proses selanjutnya akan dilakukan komparasi data peta luasan genangan dari simulasi model dan data pengamatan observasi satelit. Data pengindraan jauh yang akan digunakan dalam penelitian ini menggunakan data dari sumber penginderaan jauh untuk genangan banjir.

3.5. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir di bawah ini:



Gambar 32. Diagram Alir Penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, karakteristik model genangan di DAS Sekampung diselidiki dengan menerapkan *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model*.

1. Hasil analisis penelitian di DAS Sekampung dihasilkan nilai debit sungai (hidrograf) sepanjang sungai yang diteliti, tinggi dan luas genangan. Nilai tinggi dan luas genangan puncak diidentifikasi dengan baik oleh model.
2. Debit yang dihasilkan dari model RRI lebih tinggi daripada debit observasi. Dengan nilai parameter $NSE = -1,308$, $R2 = 0,179$ $BIAS = 83,93\%$. Namun simulasi ini mengidentifikasi pola genangan banjir di seluruh DAS Sekampung hasilnya menunjukkan bahwa model tersebut *over estimate* banjir yang sebenarnya, yang dapat disebabkan oleh ketidakpastian dalam data masukan, parameter geometri sungai, DAS yang besar, dan resolusi kasar data topografi. Selain itu, citra penginderaan jauh mungkin juga mengandung kesalahan dalam mendeteksi daerah banjir. Namun, model RRI berhasil diterapkan untuk menyelidiki dan menyimulasikan banjir di Sungai Bulok dan Sekampung Hilir.

5.2. Saran

Beberapa saran diberikan sebagai *input* untuk penelitian sejenis. Saran-saran tersebut adalah sebagai berikut:

1. Hendaknya dilakukan teknik kalibrasi menggunakan *Optimization Tool*

seperti metode *SCE-UA* atau lainnya untuk mengefisienkan dan mengefektifkan kalibrasi model simulasi hidrologi non linier.

2. Hendaknya data evaporasi dapat digunakan dalam bentuk terdistribusi dari sumber yang baik.
3. Dapat dilakukan penambahan data bendungan (*dam*) dalam *RRI Model* menyimulasikan efek waduk bendungan.
4. Hasil penelitian ini dapat ditingkatkan jika akurasi dan kualitas data dapat ditingkatkan, misalnya, jika data penakar hujan berbasis lapangan untuk curah hujan tersedia untuk seluruh wilayah studi.
5. Pengamatan lapangan seperti data hidrologi, iklim, tanah, dan topografi, serta kerusakan akibat banjir yang pernah terjadi, harus dicatat dengan baik sebagai sumber data yang berguna untuk studi di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmoneim, H., Eldardiry, H., Saber, M., Kantoush, S. A., Moghazy, H. M., & Sumi, T. (2023). Integrating multi-sensor observations and rainfall-runoff inundation modeling for mapping flood extents over the Nile River basin: Example from the 2020 flooding in Sudan. *Geocarto International*, 38(1), 2197504. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197504>
- Abdelmoneim, H., Soliman, M. R., & Moghazy, H. M. (2022). Hydrologic Assessment of the Uncertainty of Six Remote Sensing Precipitation Estimates Driven by a Distributed Hydrologic Model in the Blue Nile Basin. Dalam T. Sumi, S. A. Kantoush, & M. Saber (Ed.), *Wadi Flash Floods: Challenges and Advanced Approaches for Disaster Risk Reduction* (hlm. 225–249). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4_8
- Adji, P. S. (2017, Februari 22). Dikepung Banjir, Mobil PNS Pringsewu Ini Terpaksa Ditinggal di Kantor. *Lampungnews.com*. <https://lampungnews.com/2017/02/dikepung-banjir-mobil-pns-pringsewu-ini-terpaksa-ditinggal-di-kantor/>
- Afshari, S., Tavakoly, A. A., Rajib, M. A., Zheng, X., Follum, M. L., Omranian, E., & Fekete, B. M. (2018). Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. *Journal of Hydrology*, 556, 539–556. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036>
- Ahern, M., Kovats, R. S., Wilkinson, P., Few, R., & Matthies, F. (2005). Global Health Impacts of Floods: Epidemiologic Evidence. *Epidemiologic Reviews*, 27(1), 36–46. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxi004>
- BPDAS WSS. (2003). *Master Plan (Rencana Induk) Rehabilitasi Hutan dan Lahan Daerah Lampung tahun 2003-2007*. Bandar Lampung.

- Chan, S. W., Abid, S. K., Sulaiman, N., Nazir, U., & Azam, K. (2022). A systematic review of the flood vulnerability using geographic information system. *Heliyon*, 8(3), e09075. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>
- de Bruijn, J. A., de Moel, H., Jongman, B., de Ruiter, M. C., Wagemaker, J., & Aerts, J. C. J. H. (2019). A global database of historic and real-time flood events based on social media. *Scientific Data*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0326-9>
- de Bruijn, J. A., de Moel, H., Jongman, B., Wagemaker, J., & Aerts, J. C. J. H. (2017). TAGGS: Grouping Tweets to Improve Global Geoparsing for Disaster Response. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s41651-017-0010-6>
- Gilewski, P., & Nawalany, M. (2018). Inter-Comparison of Rain-Gauge, Radar, and Satellite (IMERG GPM) Precipitation Estimates Performance for Rainfall-Runoff Modeling in a Mountainous Catchment in Poland. *Water*, 10(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/w10111665>
- GRDC. (2020). *Major river basins of the World/Global Runoff Data Centre (GRDC)*. Federal Institute of Hydrology (BfG) Koblenz, Germany.
- Hapsari, R. I., Syarifuddin, M., Putri, R. I., & Novianto, D. (2021). Comparisons of distributed and lumped rainfall-runoff model for soil moisture estimation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 930(1), 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012071>
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., & Wilson, M. D. (2007). Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology*, 90(3), 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.021>
- Ishihara, T., & Takasao, T. (1962). *A study on the subsurface runoff and its effects on runoff process*, *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*. 79, 15–23.
- Iwasa, Y., & Inoue, K. (1982). Mathematical Simulations of Channel and Overland Flood Flows in View of Flood Disaster Engineering. *Water and Energy International*, 40, 39–64.

- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Kusumastuti, D. I., & Jokowinarno, D. (2012). Time Step Issue in Unit Hydrograph for Improving Runoff Prediction in Small Catchments. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(8), Article 8. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.48079>
- Lakew, H. B., Moges, S. A., & Asfaw, D. H. (2017). Hydrological Evaluation of Satellite and Reanalysis Precipitation Products in the Upper Blue Nile Basin: A Case Study of Gilgel Abbay. *Hydrology*, 4(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/hydrology4030039>
- Legates, D. R., & McCabe Jr., G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Lehner, B. (2022). *HydroSHEDS Technical Documentation Version 1.4*.
- Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2008). New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(10), 93–94. <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>
- Nastiti, K. D., Kim, Y., Jung, K., & An, H. (2015). The Application of Rainfall-Runoff-inundation (RRI) Model for Inundation Case in Upper Citarum Watershed, West Java-Indonesia. *Procedia Engineering*, 125, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.024>
- Nkwunonwo, U. C., Whitworth, M., & Baily, B. (2020). A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, 7, e00269–e00269. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>

- Notodihardjo, M. (1982). Pengelolaan Sumberdaya Air untuk Pengembangan Lingkungan Hidup. *Buletin Asosiasi Sumberdaya Air Indonesia*. CV. Sarajaya. Jakarta.
- Pemerintah, P. (2012). Lampiran Peraturan Pemerintah nomor 37 tahun 2012. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia*.
- Pola Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Seputih—Sekampung*. (2010). PUPR.
- PU, M. P. (2014). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 12/PRT/M/2014 Tentang Penyelenggaraan Sistem Drainase Perkotaan*.
- Quirogaa, V. M., Kurea, S., Udoa, K., & Manoa, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua*, 3(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Raws, W. J., Ahuja, L. R., Brakensiek, D. L., & Shirmohammadi, A. (1992). *Infiltration and soil water movement, Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Inc., New York.
- Republik Indonesia, P. (2012). *Keputusan Presiden (KEPPRES) tentang Penetapan Wilayah Sungai*. JAKARTA: JDIH BPK RI.
- Risiko Bencana Indonesia*. (2016). BNPB.
- Sayama, T. (2007). *Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model: Model Brief*.
- Sayama, T., & McDonnell, J. J. (2009). A new time-space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale. *Water Resources Research*, 45(7). <https://doi.org/10.1029/2008WR007549>
- Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., & Fukami, K. (2012). *Rainfall – runoff – inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin* *Rainfall – runoff – inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the. April 2012*, 37–41.
- Shen, X., Wang, D., Mao, K., Anagnostou, E., & Hong, Y. (2019). Inundation Extent Mapping by Synthetic Aperture Radar: A Review. *Remote Sensing*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs11070879>

- Shrestha, B. b., Okazumi, T., Miyamoto, M., & Sawano, H. (2016). Flood damage assessment in the Pampanga river basin of the Philippines. *Journal of Flood Risk Management*, 9(4), 355–369. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12174>
- Sihombing, Y. I., Rizaldi, A., Farid, M., Januriyadi, N. F., & Moe, I. R. (2023). *Jakarta's 2020 New Year Flood Assessment by Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model*.
- Tachikawa, Y., Nagatani, G., & Takara, K. (2004). Development of Stage-Discharge Relationship Equation Incorporating Saturated-Unsaturated Flow Mechanism. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 48, 7–12. <https://doi.org/10.2208/prohe.48.7>
- Tateishi, R., Hoan, N., Kobayashi, T., Alsaaidh, B., Tana, G., & Phong, D. (2014). Production of Global Land Cover Data – GLCNMO2008. *Journal of Geography and Geology*, 6(3), Article 3. <https://doi.org/10.5539/jgg.v6n3p99>
- Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870), Article 7870. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>
- Thakuri, S., Parajuli, B. P., Shakya, P., Baskota, P., Pradhan, D., & Chauhan, R. (2022). Open-Source Data Alternatives and Models for Flood Risk Management in Nepal. *Remote Sensing*, 14(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/rs14225660>
- Tim Penyusun KBBI, K. (2008). *Kamus Besar Bahasa Indonesia*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Try, S., Lee, G., Yu, W., Oeurng, C., & Jang, C. (2018). Large-Scale Flood-Inundation Modeling in the Mekong River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(7), 05018011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001664](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001664)
- Try, S., Tanaka, S., Tanaka, K., Sayama, T., Oeurng, C., Uk, S., Takara, K., Hu, M., & Han, D. (2020). Comparison of gridded precipitation datasets for rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin. *PLoS ONE*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226814>

Wahono, E. P., Legono, D., Istiarto, & Yulistiyanto, B. (2014). Environmental Flow Assessment Using Water-Sediment Approach at the Sekampung River, Indonesia. *Open Journal of Modern Hydrology*, 04(04), 164–172. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2014.44016>