

SKRIPSI
ANALISA KOEFISIEN FRAKTAL DAERAH ALIRAN SUNGAI
(STUDI KASUS SUB DAS MATA ALLO)



Oleh:

AZIZAH MUFIDAH

105811106821

SITI YUNMI HANDAYANI

105811107021

JURUSAN TEKNIK PENGAIRAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2024/2025



MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST)
Program Studi Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **ANALISA KOEFISIEN FRAKTAL DAERAH ALIRAN SUNGAI
(STUDI KASUS SUB DAS MATA ALLO)**

Nama : 1. AZIZAH MUFIDAH
2. SITI YUNMI HANDAYANI

Stambuk : 1. 105 811 1068 21
2. 105 811 1070 21

Makassar, Agustus 2025

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Ir. H. Riswal K. ST., MT., IPM. Asean.Eng

Ir. M. Agusalin, ST., MT.

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Pengairan



Ir. M. Agusalin, ST., MT.

NBM : 947 993





MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST)
Program Studi Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : ANALISA KOEFISIEN FRAKTAL DAERAH ALIRAN SUNGAI
(STUDI KASUS SUB DAS MATA ALLO)

Nama : 1. AZIZAH MUFIDAH
2. SITI YUNMI HANDAYANI

Stambuk : 1. 105 811 1068 21
2. 105 811 1070 21

Makassar, Agustus 2025

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Ir. H. Riswal K, ST., MT., IPM. Asean.Eng


Ir. M. Agusalmi, ST., MT.

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Pengairan




Ir. M. Agusalmi, ST., MT.

NBM : 947 993



KATA PENGANTAR



“Analisa Koefisien Fraktal Daerah Aliran Sungai (Studi kasus Sub DAS Mata Allo)”.

Puji syukur alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nyalah sehingga penulis dapat Menyusun Proposal dengan judul **“Analisa Koefisien Fraktal Daerah Aliran Sungai (Studi kasus Sub DAS Mata Allo)”** Laporan proposal ini disusun sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk program strata satu pada jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar salam dan shalawat senantiasa tercurah kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW sebagai suri tauladan untuk seluruh umat manusia.

Penulis menyadari dalam penyusunan proposal ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Karena itu dengan segala ketulusan dan kerendahan hati,kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. ABD, RAKHIM NANDA, ST., MT., IPU sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar.
2. Bapak Ir. Muhammad Syafa’at S Kuba, ST., MT. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak Ir. M.Agusalim, S.T., M.T. sebagai Ketua Program Studi Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

4. Bapak Dr. Ir. H. Riswal K, S.T., MT., IPM., Asean Eng. sebagai pembimbing I dan Bapak Ir. M. Agusalm, S.T., M.T sebagai pembimbing II, yang banyak meluangkan waktu dalam membimbing kami.
5. Bapak dan Ibu dosen serta para staf pegawai di Fakultas Teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
6. Rekan Sepenelitian, Azizah Mufidah dan Siti Yunmi Handayani atas *support*, bantuan dan kerja samanya hingga proposal ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Kedua orang tua yaitu Ayahanda dan Ibunda yang tercinta, Kami mengucapkan terimakasih yang sebesar – besarnya atas segala limpahan kasih sayang, do'a dalam setiap pembelajaran perjalanan hidup serta pengorbanannya terutama dalam bentuk materi untuk sampai ketitik ini.
8. Saudara – saudaraku Mahasiswa Fakultas Teknik khususnya satu pembimbing dan angkatan MANUFAKTUR 2021 yang dengan dukungan dan dorongan dalam keadaan apapun.

Semoga semua pihak tersebut di atas mendapat pahala yang berlipat ganda di sisi Allah SWT dan proposal tugas akhir yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi penulis, rekan – rekan, masyarakat serta bangsa dan Negara. Amin.

“Billahi Fii Sabill Haq Fastabiqul Khaerat”.

Makassar, 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL DAN GRAFIK.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	2
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.1.1 Pemaparan 4 Penelitian Terdahulu.....	10
2.2 Konsep Dasar Daerah Aliran Sungai (DAS) Dan Sub DAS.....	14
2.2.1 Batas Wilayah DAS Mata Allo	15
2.2.2 Definisi dan Fungsi (DAS).....	16
2.2.3 Karakteristik DAS Mata Allo.....	18
2.3 Morfometri Sungai	21
2.3.1 Pola Aliran Sungai.....	21
2.3.2 Orde Sungai (<i>Stream Order</i>).....	22
2.3.3 Jaringan Sungai	25
2.3.4 Rasio Percabangan Sungai (R_B).....	28
2.3.5 Rasio Panjang Sungai (RL)	29

2.3.6 Kerapatan Jaringan Sungai	32
2.4 Teori Fraktal	35
2.4.1 Definisi Fraktal	38
2.4.2 Karakteristik Fraktal	40
2.4.3 Dimensi Fraktal	41
2.4.4 Koefisien Fraktal dan Aplikasinya	43
2.5 Metodologi Analisa Koefisien Fraktal	48
2.5.1 Metode Pengukuran Koefisien Fraktal	49
1. ArcMap	50
2. Pengumpulan Data Geospasial	50
3. Pemodelan Jaringan Sungai dan Batas DAS	51
4. Box Counting	51
5. Horton	55
6. Eksponen Hurst	56
BAB III METODE PENELITIAN	61
3.1 Desain Penelitian	61
3.2 Lokasi Penelitian	62
3.3 Jenis Penelitian dan Sumber Data	63
3.3.1 Data Sekunder	63
3.4 Alat Dan Bahan Penelitian	63
1. Alat	63
2. Bahan	67
3.5 Teknik Analisis Data	68
3.5.1 Analisis Statistik	69
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	72
4.1 Pemodelan Jaringan Sungai dan Batas DAS	72

4.2 Perhitungan kotak (Metode Box Counting)	74
4.3 Rasio Percabangan (Rb) dan Rasio Panjang (RL) Sub DAS Mata Allo	82
4.4 Fraktal Hurst Eksponen	84
BAB V PENUTUP.....	90
5.1 Kesimpulan.....	90
5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA.....	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konsep Daerah Aliran Sungai (DAS)	14
Gambar 2.2 Tipe Pola Aliran Sungai	22
Gambar 2.3 Penentuan Orde Sungai Beberapa Ahli	23
Gambar 2.4 Pola-pola jaringan sungai (drainage network pattern)	26
Gambar 2.5 Pendefinisian jaringan sungai berdasarkan beberapa jenis data.....	31
Gambar 2.6 Klasifikasi Kerapatan Jaringan Sungai	33
Gambar 2.7 Pengaruh kerapatan jaringan sungai terhadap hidrograf	34
Gambar 2.8 Tipikal keserupaan bentuk (self similarity)	48
Gambar 2.9 Pembagian kotak berdasarkan Box Counting Dimension	52
Gambar 2.10 Proses Analisis R/S Untuk Estimasi Eksponen Hurst	59
Gambar 3.1 Peta Sub DAS Mata Allo	62
Gambar 3.2 Bagan alir Penelitian	71
Gambar 4.1 Tools penentuan jaringan Sungai	72
Gambar 4.2 Tools penentuan batas DAS	73
Gambar 4.3 Peta Sub DAS Mata Allo	73
Gambar 4.4 Pembagian kotak menggunakan fitur fishnet pada ArcGis untuk metode box counting.....	74
Gambar 4.5 box counting ukuran 1/8.....	76
Gambar 4.6 box counting ukuran 1/16.....	77
Gambar 4.7 box counting ukuran 1/32.....	78
Gambar 4.8 box counting ukuran 1/64.....	79
Gambar 4.9 box counting ukuran 1/128.....	80

DAFTAR TABEL DAN GRAFIK

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	8
Tabel 2.2 Kategori diensi fraktal	42
Grafik 4.1 hubungan antara ukuran kotak (r) dan jumlah kotak (N)	81
Tabel 4.1 Hasil perhitungan Box Counting	81
Tabel 4.2 Klasifikasi indeks percabangan sungai	82
Tabel 4.3 Hasil Nilai Rasio Percabangan (Rb) Sub DAS Mata Allo	83
Tabel 4.4 Hasil Nilai Rasio Panjang (Rl) Sub DAS Mata Allo.....	84
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan analisis $\Gamma_{N,K}$	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu wilayah daratan yang meliputi sungai dan anak sungai. Fungsi daerah aliran sungai adalah menyediakan, menyimpan dan mengalirkan air hujan secara alami ke danau atau laut. Batas daerah aliran sungai adalah garis pemisah topografi (2004). Menurut Rahayu et al., 2009, DAS adalah suatu daerah tertentu yang bentuk dan cirinya berhubungan dengan suatu sungai dan anak-anak sungainya. Sub DAS adalah bagian dari daerah aliran sungai, tempat air hujan diterima kemudian dialirkan melalui anak-anak sungai ke sungai utama. Fungsi sungai dan anak-anak sungai yaitu menyimpan, menampung, serta membuang air hujan dan sumber air lainnya (Cecep Risnandar., 2020).

Sub DAS Mata Allo sendiri merupakan bagian hulu dari DAS Saddang yang berada di Kecamatan Baraka, Kabupaten Enrekang, Sulawesi Selatan (Mangka et al., 2023). Karakteristik morfometrinya menunjukkan pola aliran yang kompleks dengan banyak percabangan dan kelokan. Oleh karena itu, diperlukan metode khusus yang mampu menggambarkan kompleksitas tersebut, salah satunya melalui analisis fraktal (Uca et al., 2021).

Analisis fraktal merupakan metode matematis untuk mengukur tingkat kerumitan pola, termasuk aliran sungai, dalam berbagai skala. Pendekatan ini dinilai lebih akurat dibanding metode konvensional yang cenderung menganggap sungai bersifat linier (Martínez et al., 2022). Namun, penerapannya pada studi Sub

DAS di Indonesia masih terbatas, karena sebagian besar penelitian sebelumnya masih menggunakan pendekatan sederhana (Tunas et al., 2016).

Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan menerapkan analisis fraktal pada Sub DAS Mata Allo. Fokus utama diarahkan pada penghitungan dimensi fraktal menggunakan metode box-counting yang kemudian dimodifikasi untuk meningkatkan akurasi hasil (Meng et al., 2020). Dengan demikian, diharapkan penelitian ini mampu memberikan gambaran yang lebih baik mengenai kompleksitas pola aliran sungai, sekaligus berkontribusi pada pengembangan metode analisis fraktal dalam studi geografi dan hidrologi.

Maka dari itu, penelitian bertujuan untuk menjelaskan hukum daya fraktal melalui beberapa simulasi pada objek fraktal dan memodifikasi algoritma penghitungan kotak dimensi (menggunakan metode box-counting) untuk memperkirakan karakteristik pola aliran sub-DAS Mata Allo. Dan kami sebagai penulis akan melakukan penelitian dengan judul **“Analisa Koefisien Fraktal Daerah Aliran Sungai Studi Kasus Sub-DAS Mata Allo”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Berapa nilai koefisien dimensi fraktal pada Sub DAS Mata Allo?
2. Bagaimana karakteristik fraktal pada Sub DAS Mata Allo?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian kami yaitu:

1. Untuk mengetahui nilai koefisien pada Sub DAS Mata Allo
2. Untuk mengetahui karakteristik fraktal pada Sub DAS Mata Allo

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang cara perhitungan nilai koefisien dimensi fraktal pada Sub DAS Mata Allo
2. Memberikan informasi tentang karakteristik fraktal pada Sub DAS Mata Allo

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dapat berjalan secara efektif dan mencapai sasaran yang ingin dicapai, maka Adapun batasan masalah yang akan di bahas. Adapun Batasan masalah sebagai berikut:

1. Analisa koefisien fraktal menggunakan metode perhitungan Box Counting.
2. Penelitian hanya bertujuan untuk mengetahui tingkat Kerumitan DAS.
3. Penelitian berfokus pada DAS Mata Allo

1.6 Sistematika Penulisan

Berdasarkan dari hasil uraian latar belakang, rumusan masalah dan tujuan penelitian yang akan hendak dicapai dalam penelitian, jadi sistematika yaitu:

BAB I PENDAHULUAN: BAB yang didalamnya menguraikan tentang latar belakang masalah, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJUAN PUSTAKA: BAB ini terdiri kajian pustaka yang mengulas tentang pandangan umum serta landasan teori yang memuat teori-teori yang digunakan dalam lingkup tugas akhir ini.

BAB III METODE PENELITIAN: Dalam BAB ini membahas tentang bagaimana perencanaan penelitian, lokasi data penelitian, metode penelitian, data yang digunakan, serta bagaimana kesimpulan penelitian nantinya.

BAB IV ANALISIS DATA: Setelah data terkumpul maka dilakukan pengolahan data. Dalam bab inilah akan dijelaskan tentang pengolahan serta analisis data penelitian ini.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN: Akhir dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan dan saran yang nantinya diharapkan dapat menjadi masukan yang dapat digunakan dan dapat menjadi referensi pada penelitian serupa nantinya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merujuk pada studi-studi sebelumnya yang memiliki kesamaan objek atau relevansi topik dengan penelitian yang sedang dilakukan. Kajian terhadap penelitian-penelitian ini memberikan peneliti pandangan komparatif, referensi pendekatan, serta pemahaman teoritis dan metodologis yang dapat memperkuat penelitian saat ini. Dalam penelitian ini, penulis mengangkat tema Analisa Koefisien Fraktal Daerah Aliran Sungai (Studi Kasus Sub DAS Mata Allo), sehingga merujuk pada sepuluh penelitian terdahulu yang berkaitan, khususnya dalam kajian fraktal, morfometri DAS, serta penerapan metode box-counting dan grafik log-log dalam analisis bentuk sungai.

Penelitian-penelitian terdahulu memiliki fokus yang sama, yaitu menganalisis karakteristik fisik Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan menggunakan pendekatan fraktal dan analisis spasial. Beberapa penelitian menerapkan metode perhitungan dimensi fraktal untuk menghitung tingkat kerumitan jaringan sungai. Studi yang dilakukan oleh Xianmeng Meng dkk. (2020), Francisco Martinez dkk. (2022), dan Michel Lim dkk. (2023) merupakan contoh penelitian yang menggunakan metode box-counting dan log-log plot untuk memperoleh nilai dimensi fraktal yang merepresentasikan struktur geometri DAS secara kuantitatif.

Dari sisi metode, hampir seluruh penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif yang dikombinasikan dengan analisis spasial berbasis citra satelit atau data Digital Elevation Model (DEM). Penelitian oleh Michel Lim dkk. (2023),

Rendra dkk. (2020), dan Uca dkk. (2021), misalnya memanfaatkan data spasial untuk menghitung parameter morfometri dan dimensi fraktal guna memperoleh informasi yang lebih akurat mengenai bentuk dan batas wilayah DAS. Secara umum, hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa dimensi fraktal memiliki keterkaitan dengan tingkat kerumitan morfologi aliran sungai dan dapat dijadikan sebagai indikator dalam menilai potensi banjir, efisiensi hidrologi, serta kondisi geomorfologi suatu DAS. Sebagai penunjang, pe'nulis menyusun tabel pemetaan yang memuat rincian dari sepuluh penelitian terdahulu tersebut.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Teori/Konsep	Metodologi	Hasil Penelitian
1	Uca et al. (2021)	<i>Karakteristik Morfometri Sub DAS Saddang dan Mata Allo</i>	Analisis morfometri dua sub DAS	Kuantitatif, GIS	Memberikan gambaran rinci kondisi morfometrik Sub DAS Mata Allo sebagai studi pendahuluan yang kuat

2	Meng, X. et al. (2020)	<i>The linkage between box-counting and geomorphic fractal dimensions in the fractal structure of river networks</i>	Hubungan antara dimensi fraktal dan struktur sungai	Box-Counting, Geomorfik	Membuktikan keterkaitan dimensi fraktal dengan struktur geomorfik aliran sungai alami
3	Michel Lim et al. (2023)	<i>Estimation of Citarum Watershed Boundary's Length Based on Fractal's Power Law</i>	Pengukuran panjang DAS dengan pendekatan fraktal	Modified Box-Counting	Memvalidasi penggunaan box-counting dalam estimasi bentuk spasial batas DAS
4	Martinez et al. (2022)	<i>Organization Patterns of Complex River Networks in Chile</i>	Pola jaringan sungai yang kompleks dan self-similar	Analisis Fraktal Morfologi	Menunjukkan bahwa struktur sungai secara alami mengikuti

					pola fraktal dengan dimensi khas
5	Satria et al. (2013)	<i>Analisis Fraktal Frekuensi Kegempaan di Daerah Pantai Barat Sumatera</i>	Dimensi fraktal pada data seismik	Fractal Analysis	Menunjukkan bahwa fraktal dapat digunakan untuk memahami distribusi spasial kejadian alam

2.1.1 Pemaparan 4 Penelitian Terdahulu

1. Hasil Penelitian Uca, dkk. (2021)

Penelitian yang dilakukan oleh Uca, dkk. (2021) dengan judul “*Karakteristik Morfometri Sub DAS Saddang dan Mata Allo*” merupakan kajian yang menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik morfometri dari dua Sub DAS, yakni Sub DAS Saddang dan Sub DAS Mata Allo. Melalui analisis morfometri yang meliputi parameter panjang, luas, bentuk, kerapatan aliran, hingga gradien sungai, penelitian ini berhasil memberikan gambaran rinci mengenai kondisi fisik dan bentuk geometri dari

kedua Sub DAS tersebut. Hasil penelitian ini penting karena dapat dijadikan studi pendahuluan dalam memahami kondisi geomorfologi dan karakteristik hidrologi wilayah Sub DAS Mata Allo sebelum dilakukan penelitian lebih lanjut dengan pendekatan fraktal. Dengan demikian, penelitian ini memberikan landasan yang kuat untuk mengkaji kompleksitas jaringan sungai dan potensi penerapannya dalam analisis hidrologi yang lebih mendalam (Uca et al., 2021).

2. Hasil Penelitian Meng, X. et al. (2020)

Penelitian yang dilakukan oleh Xianmeng Meng, Pengju Zhang, Jing Li, Chuanming Ma, dan Dengfeng Liu (2020) dengan judul *“The linkage between box-counting and geomorphic fractal dimensions in the fractal structure of river networks”* membahas keterkaitan antara dimensi fraktal geomorfik dan dimensi fraktal yang diperoleh melalui metode *box-counting*. Dalam penelitian ini, digunakan dua pendekatan perbandingan yang umum dipakai, yaitu dimensi fraktal geomorfik (D_g) yang diperoleh dari rasio bifurkasi dan rasio panjang aliran, serta dimensi fraktal spasial (D_r) yang diperoleh melalui metode *box-counting*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut persimpangan (*junction angle*) sungai memiliki peranan signifikan dalam memengaruhi hubungan antara kedua dimensi fraktal tersebut. Dalam kondisi sudut persimpangan yang konstan, ditemukan adanya hubungan positif yang bersifat non-linear, di mana nilai D_g secara konsisten lebih tinggi dibandingkan D_r . Selain itu, ketika nilai D_g tetap, peningkatan sudut persimpangan cenderung menurunkan nilai D_r . Temuan ini memberikan pemahaman baru tentang bagaimana pendekatan geomorfik dan spasial dapat saling melengkapi dalam menganalisis struktur

fraktal jaringan sungai, sekaligus memperluas penerapan metode fraktal dalam studi geomorfologi hidrologi (Meng et al., 2020).

3. Hasil Penelitian Michel Lim, dkk. (2023)

Penelitian yang dilakukan oleh Michel Lim, dkk. (2023) berjudul “*Estimation of Citarum Watershed Boundary's Length Based on Fractal's Power Law*” berfokus pada penerapan metode fraktal dalam mengestimasi panjang batas Daerah Aliran Sungai (DAS). Metode yang digunakan adalah *Modified Box-Counting* dengan pendekatan hukum pangkat fraktal (*Fractal's Power Law*). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknik fraktal dapat digunakan secara efektif untuk mengukur panjang batas DAS, yang pada umumnya memiliki bentuk spasial yang kompleks dan tidak teratur. Dengan memvalidasi penggunaan *box-counting* dalam mengestimasi batas spasial DAS, penelitian ini memberikan kontribusi metodologis yang penting, khususnya dalam bidang hidrologi dan geomorfologi. Temuan tersebut memperkuat pandangan bahwa metode fraktal mampu menggambarkan sifat alami DAS yang cenderung *self-similar* dan kompleks (Lim et al., 2023).

4. Hasil Penelitian Martinez, dkk. (2022)

Penelitian yang dilakukan oleh Francisco Martinez, Hugo Manriquez, Alex Ojeda, dan Gonzalo Olea (2022) dengan judul “*Organization Patterns of Complex River Networks in Chile: A Fractal Morphology*” meneliti pola organisasi jaringan sungai di wilayah Chile dengan pendekatan analisis morfologi fraktal. Penelitian ini menemukan bahwa jaringan sungai di wilayah tersebut memperlihatkan sifat *self-similar* dan memiliki dimensi fraktal khas

yang menunjukkan pola keteraturan meskipun terbentuk secara alami. Dengan menggunakan metode analisis fraktal, penelitian ini membuktikan bahwa sungai tidak hanya mengikuti pola hidrologi yang sederhana, tetapi juga membentuk struktur yang kompleks dan hierarkis. Temuan ini memperkuat teori bahwa jaringan sungai dapat dipahami melalui pendekatan fraktal karena sifatnya yang berulang dalam skala berbeda. Kontribusi utama penelitian ini adalah memperlihatkan bagaimana pendekatan fraktal dapat digunakan untuk menjelaskan pola alami jaringan sungai dalam konteks geomorfologi (Martinez et al., 2022).

5. Hasil Penelitian Satria, dkk. (2013)

Penelitian yang dilakukan oleh Satria, dkk. (2013) dengan judul “*Analisis Fraktal Frekuensi Kegempaan di Daerah Pantai Barat Sumatera*” merupakan kajian yang mengaplikasikan analisis fraktal dalam bidang geofisika, khususnya pada data seismik. Penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi spasial kejadian gempa bumi di wilayah pantai barat Sumatera memiliki sifat fraktal. Melalui analisis fraktal, ditemukan bahwa pola kejadian gempa bumi tidak acak sepenuhnya, melainkan mengikuti keteraturan tertentu yang dapat dijelaskan melalui dimensi fraktal. Hasil ini membuktikan bahwa konsep fraktal tidak hanya terbatas pada studi geomorfologi dan hidrologi, tetapi juga dapat diterapkan dalam memahami fenomena geofisika. Dengan demikian, penelitian ini memperluas cakupan penerapan fraktal sebagai alat analisis dalam ilmu kebumihan, sekaligus memberikan wawasan mengenai kompleksitas pola kejadian alam (Satria et al., 2013).

2.2 Konsep Dasar Daerah Aliran Sungai (DAS) Dan Sub DAS

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan suatu wilayah yang terbentuk oleh punggung-punggungan gunung, di mana air hujan yang jatuh di area tersebut akan ditampung oleh punggung gunung yang kemudian mengalir melalui sungai-sungai kecil menuju sungai utama (Asdak, 1995). DAS meliputi area daratan yang terintegrasi dengan sungai serta anak-anak sungainya, yang berfungsi untuk menampung, menyimpan, dan mengalirkan air hujan secara alami menuju danau atau laut. Batas daratnya ditentukan oleh pemisah topografi, sementara batas lautnya menjangkau daerah perairan yang masih terpengaruh oleh aktivitas di darat, (PP No 37 tentang Pengelolaan DAS, Pasal 1).



Gambar 2.1 Konsep Daerah Aliran Sungai (DAS)

(Sumber: Uca et al., 2022")

Daerah aliran sungai (Watershed) juga disebut Catchment Area pada skala yang lebih kecil, dan merupakan area daratan yang terbatas oleh punggung bukit atau batas topografi lainnya dengan tujuan untuk menangkap, menyimpan, dan mengalirkan air hujan yang jatuh ke permukaan, mengarah ke saluran sungai, anak

sungai, hingga mencapai sungai utama dan akhirnya berakhir di danau atau laut (Uca et al., 2022).

Sub DAS berfungsi sebagai area tangkapan air hujan yang secara langsung berhubungan dengan alam (Riskihadi et al., 2014). Idealnya, setiap DAS harus memiliki tingkat erosi tanah yang terkendali, produktivitas serta kapasitas lahan yang terjaga, hasil air yang maksimal agar kerusakan lahan dapat diminimalkan dan kesejahteraan masyarakat dapat terpelihara. Namun, seiring waktu, terdapat perubahan yang berdampak negatif, menghasilkan penurunan kapasitas yang jika diabaikan dapat menyebabkan kerusakan, jika tidak dikelola sesuai prinsip konservasi. Perubahan yang terjadi pada vegetasi, tanah, dan air hujan tidak dapat dipisahkan dari berbagai tindakan manusia. Pada akhirnya, semua aktivitas manusia ini bisa menciptakan penggunaan lahan yang baik, meliputi lahan vegetasi permanen (area konservasi) serta vegetasi non-permanen (pemukiman, pertanian, pertambangan, perikanan, dan lain-lain). Setiap jenis penggunaan lahan memiliki hasil yang beragam tergantung pada kemampuan lahan tersebut dalam menampung air hujan. Jumlah air yang ada di tanah dipengaruhi oleh seberapa banyak curah hujan, tingkat resapan air, dan kemampuan tanah dalam menyimpan air (Perkasa, Halik, & Wiyono, 2022).

2.2.1 Batas Wilayah DAS Mata Allo

Sub DAS Mata Allo merupakan bagian dari Daerah Aliran Sungai Saddang yang berada di Kabupaten Enrekang. Penentuan batas sub DAS didasarkan pada punggung topografi yang memisahkan aliran air ke arah hilir tertentu. Menurut BAPPEDA Enrekang (2020), batas Sub DAS Mata Allo dapat diidentifikasi melalui peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1:25.000 dari BIG (2019), dengan memperhatikan elevasi, arah aliran, dan pola percabangan sungai.

Tabel 2. 2 Ringkasan Batas Wilayah Mata Allo

Tema	Penjelasan Singkat	Sumber Referensi
Cakupan DAS Saddang	DAS Saddang dan Mata Allo berada di Enrekang, Tana Toraja, Toraja Utara, Polewali Mandar	Rian (2012)
Cakupan Sub-DAS Mata Allo	Luas sekitar 15.915 ha, terletak di Kecamatan Baraka, Enrekang	Uca, Lamada, Mandra & Jassin (2022)
Batas Sub-DAS	Berdasarkan punggung topografi dan cabang sungai	Uca, Lamada, Nyompa & Haris (2022)
Sumber Data	Peta RBI BIG (2019), BAPPEDA Enrekang (2020), DEM	Mangka & Husma (2023)

Sumber : Rian. Daerah Aliran Sungai. *J. Anal.* 32 (2012)

2.2.2 Definisi dan Fungsi (DAS)

DAS yaitu suatu daerah tertentu yang bentuk dan sifat alamnya sedemikian rupa, sehingga merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya yang melalui daerah tersebut dalam fungsinya untuk menampung air yang berasal dari air hujan dan sumber-sumber air lainnya yang penyimpanannya dan pengalirannya dihimpun dan ditata berdasarkan hukum-hukum alam sekelilingnya demi keseimbangan daerah tersebut. Daerah sekitar sungai meliputi punggung bukit atau gunung merupakan tempat sumber air dan semua curahan air hujan yang mengalir ke sungai, sampai daerah dataran dan muara sungai (Mangka, A. & Husma A., 124-132 2023).

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan kesatuan ekosistem alam yang utuh dari hulu sampai hilir. Daerah Aliran Sungai (DAS) didefinisikan sebagai suatu

wilayah yang dibatasi oleh garis pemisah topografi yang menerima air hujan, mengumpulkan, menyimpan air hujan, dan mengalirkan ke Sungai kemudian ke danau atau lautan. Sebagai pengatur pengelolaan sumber daya air, DAS dapat berperan sebagai pengendali banjir alami pada musim hujan dan mengurangi kekeringan pada musim kemarau (Kamus Weber, Sugiharto, 2001).

Definisi DAS berdasarkan fungsi DAS dibagi pada beberapa batasan, yaitu pertama DAS hulu didasarkan pada fungsi perlindungan dan fungsi ini dikelola untuk menjaga kondisi lingkungan DAS agar tidak mengalami degradasi. Fungsi perlindungan dapat diwujudkan dari persyaratan tutupan vegetasi DAS, kualitas air, kapasitas tampungan air (Drainase), curah hujan dan aspek lainnya. Kedua DAS antara (tengah) didasarkan pada penggunaan air sungai untuk memberikan pengelolaan yang efektif bagi manfaat sosial dan ekonomi, dapat dinyatakan dalam hal konsumsi air, kapasitas distribusi air, dan tingkat air tanah, dan terkait dengan infrastruktur irigasi seperti pengelolaan air sungai, waduk dan danau. Ketiga DAS Hilir dikelola berdasarkan pemanfaatan fungsi air sungai melalui kuantitas dan kualitas air, kapasitas pengaliran air, tinggi curah hujan dan manfaat sosial dan ekonomi yang terkait. Kebutuhan pertanian, air bersih dan pengelolaan air limbah (SO Putri., 2019).

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan pengatur pengelolaan sumber daya air yang berperan sebagai pengendali banjir alami pada musim hujan dan mengurangi kekeringan pada musim kemarau. Mengingat peran dan fungsi DAS sangat penting bagi kehidupan manusia secara keseluruhan, maka pengelolaan DAS perlu dilakukan secara berkesinambungan dan menyeluruh. Salah satu tugas dalam

kerangka pengelolaan DAS adalah menganalisis karakteristik DAS dari wilayah DAS tersebut (Febriani & Ahyuni, 2023).

2.2.3 Karakteristik Sub DAS Mata Allo

Sub Daerah Aliran Sungai (DAS) Mata Allo terletak di Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia, dan merupakan bagian dari DAS Saddang. Karakteristik sub DAS ini mencakup berbagai aspek jenis tanah, geografi, hidrologi, penggunaan lahan, ekosistem, serta sosial ekonomi yang saling berinteraksi. Keberadaan sub DAS ini sangat penting bagi kehidupan masyarakat setempat dan juga berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem (Mangka & Husma, 2023).

Morfometri Sub DAS Mata Allo masuk dalam tipe evolusi meander sinous dicirikan dengan alur sungai yang sedikit berkelok. DAS Mata Allo terdiri dari 7 orde sungai dengan jumlah orde sebanyak 3036, Jumlah Panjang Aliran (Lu) mengalami penurunan tiap orde yang artinya memiliki tahap geomorfik muda, Rerata Panjang Aliran (Lsm) yang ideal, Rasio Panjang Aliran (RL) mengindikasikan adanya tahap geomorfik lanjut Frekuensi Aliran (Fs) yang sangat rendah, yang artinya akan menyebabkan aliran permukaan yang dihasilkan tinggi. Frekuensi aliran yang lebih rendah menunjukkan sedikit relief dan porositas tanah yang tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat frekuensi aliran yang rendah di wilayah DAS (Awad, 2020). Frekuensi aliran yang rendah memiliki geologi permeabel yang tinggi dan kondisi relief yang rendah (Reddy, 2004; Altin, 2011).

Densitas Drainase (Dd) Sub DAS Mata Allo masuk dalam kategori sedang, dimana alur sungai melewati batuan dengan resistensi yang lebih lunak sehingga

angkutan sedimen yang terangkut akan lebih besar. Tekstur Drainase (R_t) Sub DAS Mata Allo yang sangat halus, sehingga kapasitas infiltrasi DAS tersebut tinggi dan kemiringan DAS-nya yang juga tinggi (Maimunah, 2020). Selain itu, bencana banjir lebih kecil kemungkinannya di cekungan dengan kerapatan drainase dan frekuensi aliran rendah hingga sedang. (Taha, 2017)

Rasio Pembulatan (R_b) berkisar dari 2 – 5,50 bervariasi pada setiap orde, Berdasarkan klasifikasi indeks rasio pembulatan pada sungai Mata Allo untuk orde 1-2 (nilai R_b orde-1 4,56 dan orde-2 4,69) termasuk dalam kategori R_b 3 – 5, yaitu alur sungai mempunyai kenaikan dan penurunan muka air banjir tidak terlalu cepat atau tidak terlalu lambat. Rasio pembulatan untuk Orde 3-4 (nilai R_b orde-3 5,05 dan orde-4 5,50) termasuk kedalam kategori $R_b > 5$, yaitu alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat, demikian pula penurunannya akan berjalan dengan cepat. dan orde 4- 5 (nilai R_b 2,00) Rasio pembulatan termasuk dalam kategori $R_b < 3$, yaitu alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat, sedangkan penurunannya berjalan lambat.

Faktor Bentuk (R_f) yaitu memanjang dengan nilai faktor bentuk rendah, fluktuasi banjir yang rendah untuk waktu yang diperlukan oleh air sungai lama, Rasio Pemanjangan (R_e) sangat memanjang/lonjong dengan relief rendah dan tektonik yang cukup aktif, Rasio Pembulatan (R_c) membulat atau melonjong, dimana waktu yang diperlukan oleh air sungai semakin singkat sehingga fluktuasi banjir sungai tersebut semakin tinggi, Rasio Relief (R_h) relief rendah dan lereng landai. (Uca et al., 2021)

Hidrologi Sub DAS Mata Allo ditandai dengan curah hujan yang cukup tinggi, terutama selama musim hujan. Curah hujan yang bervariasi ini mempengaruhi debit sungai dan ketersediaan air untuk pertanian dan kebutuhan sehari-hari masyarakat. Selain itu, terdapat berbagai sumber air, seperti mata air dan sungai kecil, yang menjadi andalan bagi penduduk setempat. Namun curah hujan yang ekstrim dapat menyebabkan masalah seperti banjir dan kekeringan, yang berdampak pada kehidupan masyarakat (Uca et al., 2022).

Jenis tanah di wilayah Sub DAS Mata Allo didominasi oleh tanah Inceptisol dan Ultisol. Berdasarkan data dari Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (2018), Inceptisol banyak dijumpai pada bagian lereng tengah dengan tingkat kesuburan sedang, sedangkan Ultisol terdapat di bagian hulu dan memiliki kesuburan rendah. Jenis tanah ini berpengaruh terhadap infiltrasi, erodibilitas, serta kemampuan penyerapan air, yang kemudian berhubungan dengan respon hidrologi DAS. Menurut Hardjowigeno (2010), tanah Ultisol sangat peka terhadap erosi terutama pada wilayah berlereng curam, sehingga pengelolaan konservasi sangat diperlukan di wilayah Sub DAS Mata Allo.

Penggunaan lahan di Sub DAS Mata Allo didominasi oleh kegiatan pertanian, dimana masyarakat mengandalkan lahan untuk menanam berbagai jenis tanaman pangan dan hortikultura. Selain pertanian, terdapat juga kawasan hutan yang berfungsi sebagai penyangga ekosistem dan sumber daya alam. Namun alih fungsi lahan menjadi lahan pertanian dan pemukiman sering terjadi, yang dapat mengancam ekosistem dan keanekaragaman hayati di kawasan ini (Uca et al., 2022).

Sumber daya alam utama di Sub-DAS Mata Allo meliputi air, tanah, dan hasil hutan. menurut Enrekang Regency Disaster Report (2021), sekitar 57% wilayah Sub-DAS Mata Allo dimanfaatkan sebagai lahan pertanian. Hal ini menunjukkan bahwa sektor pertanian menjadi basis utama pemanfaatan ruang dan juga menopang perekonomian masyarakat di wilayah Kabupaten Enrekang. Potensi air di kawasan ini cukup tinggi karena berada di bagian hulu DAS Saddang yang memiliki banyak aliran sungai kecil seperti anak Sungai Mata Allo. Hal ini mendukung sistem irigasi alami untuk pertanian, khususnya tanaman pangan dan hortikultura yang menjadi komoditas unggulan Kabupaten Enrekang (BAPPEDA Enrekang, 2020 & Enrekang, R. K. RKPD-Pokok-2021-KAB.-ENREKANG.).

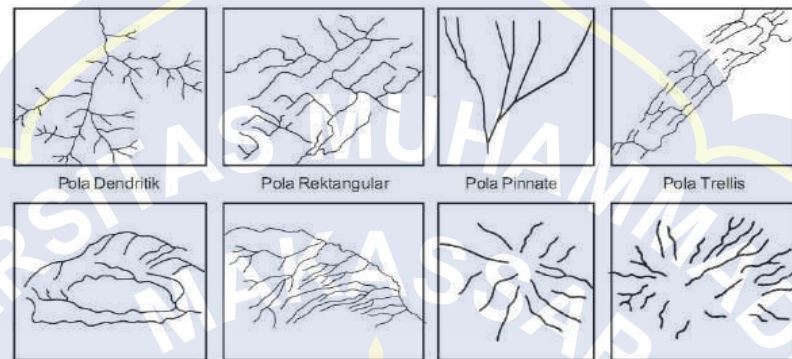
2.3 Morfometri Sungai

Morfometri Sungai yaitu ilmu yang mempelajari bentuk, ukuran, dan dimensi jaringan sungai serta karakteristik topografinya. Analisis morfometri sangat penting dalam penelitian Daerah Aliran Sungai (DAS) karena dapat memberikan informasi kuantitatif tentang struktur, proses hidrologi, erosi, sedimentasi, dan potensi banjir (Horton, 1945; Strahler, 1957).

2.3.1 Pola Aliran Sungai

Seiring berjalannya waktu, suatu jaringan sungai akan menciptakan pola aliran tertentu di antara saluran utama dan anak-anaknya, dan pembentukan pola ini sangat dipengaruhi oleh faktor geologinya. Pola aliran sungai dapat dikelompokkan berdasarkan bentuk dan teksturnya. Bentuk atau pola tersebut berkembang sebagai respons terhadap topografi dan struktur geologi di bawah permukaan. Saluran sungai berkembang saat aliran permukaan meningkat dan batuan dasar tidak tahan terhadap erosi (Tunas, I. G. (2017). Tipe pola aliran sungai antara alur utama dan

cabang-cabangnya dalam satu daerah dengan daerah lainnya sangat bervariasi, pola aliran yang umumnya dikenal seperti pada gambar di bawah.



Gambar 2.2 Tipe Pola Aliran Sungai
(Sumber: Sunday, November 20, 2016)

Perbedaan pola aliran sungai antara satu tempat dan lainnya sangat dipengaruhi oleh variasi kemiringan topografi, struktur, dan litologi batuan dasar.

2.3.2 Orde Sungai (*Stream Order*)

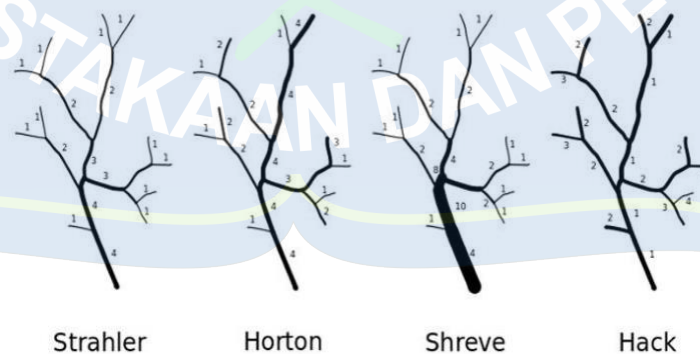
Ordo sungai, yang juga dikenal sebagai “ordo aliran”, adalah sistem klasifikasi yang menunjukkan posisi sungai atau jalur air dalam hierarki aliran sungai yang bercabang di suatu DAS, yang pada akhirnya mengarah ke sungai utama. Dengan kata lain, ordo sungai menggambarkan urutan percabangan atau tingkat percabangan dari sungai kecil ke sungai besar. Ordo sungai ini memberikan informasi penting tentang struktur dan kepadatan jaringan sungai di suatu DAS. Ordo sungai yang lebih tinggi menunjukkan lebih banyak sungai yang saling terhubung yang mengalirkan air ke sungai yang lebih besar. Selain itu, ordo sungai juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses hidrologi, termasuk pembentukan hidrograf (Tunas, I. G. (2017)).

Penting untuk dicatat bahwa semakin besar jumlah ordo sungai di suatu DAS, semakin panjang dan lebar jaringan sungai tersebut. Artinya, jumlah dan

panjang sungai pada setiap tingkat ordo sungai akan secara langsung mempengaruhi bentuk dan karakteristik hidrograf yang terbentuk, yang selanjutnya dapat memberikan gambaran perilaku aliran air di Daerah Aliran Sungai (DAS), seperti kecepatan aliran dan pola limpasan saat hujan (Tunas, I. G. (2017)

Penggolongan sungai berdasarkan ordo sungai sangat penting dalam memahami hierarki aliran sungai (Uca et al., 2022). Misalnya, sungai terkecil yang terletak di hulu atau bagian paling atas dari DAS, yang belum mengalami pertemuan dengan sungai lainnya, disebut sungai ordo pertama, menurut Kern 1994 Segmen sungai yang paling hulu (tidak memiliki anak sungai lagi di hulunya), didefinisikan sebagai segmen sungai dengan ordo 1.

Ketika dua sungai ordo pertama bertemu, maka akan membentuk sungai dengan ordo yang lebih tinggi, yaitu ordo kedua. Proses ini terus berlanjut, dan jika dua sungai dengan ordo yang sama bertemu, maka akan membentuk sungai dengan ordo yang satu tingkat lebih tinggi. Sebaliknya, ketika dua sungai dengan ordo yang berbeda bertemu, maka aliran yang terbentuk tidak akan menghasilkan ordo sungai yang lebih tinggi, tetapi akan mengikuti ordo sungai yang lebih besar dari kedua sungai yang bertemu.



Gambar 2.3 Penentuan Orde Sungai Beberapa Ahli
(Sumber: Uca et al., 2022)

Penggolongan ini tidak selalu berkaitan dengan ukuran fisik sungai, seperti ukuran, lebar atau sempitnya, atau bahkan kedalaman sungai. Oleh karena itu, meskipun dua sungai yang sangat berbeda ukurannya dapat menyatu, keduanya tetap mengikuti kaidah klasifikasi berdasarkan ordo sungai yang ada.

Menurut uca et al., 2022 Teknik pengurutan sungai yang digunakan oleh Stahler pada dasarnya merupakan modifikasi dari metode Horton (1945) yang telah dikembangkan sebelumnya. Pengkodean sungai yang di jelaskan Stahler (1952) memiliki prosedur atau langkah-langkah tertentu yang cukup sistematis, yaitu sebagai berikut:

1. Sungai ordo pertama

Merupakan sungai terkecil yang terletak di bagian hulu DAS, Tidak memiliki anak cabang Sungai dan Umumnya terbentuk dari aliran permukaan, rembesan mata air, atau limpasan hujan.

2. Pertemuan Dua Sungai dengan Orde Sama

Jika dua sungai dengan orde sama bertemu, maka aliran sungai yang terbentuk meningkat satu tingkat orde. Contoh: dua sungai orde pertama → menghasilkan sungai orde kedua.

3. Pertemuan dua aliran sungai dengan orde yang berbeda

Jika dua sungai dengan orde berbeda bertemu, maka aliran sungai yang terbentuk akan mengikuti orde tertinggi. Contoh: sungai orde pertama bertemu sungai orde kedua → hasilnya tetap sungai orde kedua.

4. Prinsip Hierarki Orde Sungai

Sistem ini bersifat bertingkat hingga mencapai sungai utama dan Sungai utama dalam DAS umumnya memiliki orde tertinggi dibandingkan percabangan yang lain.

5. Kegunaan Metode Strahler

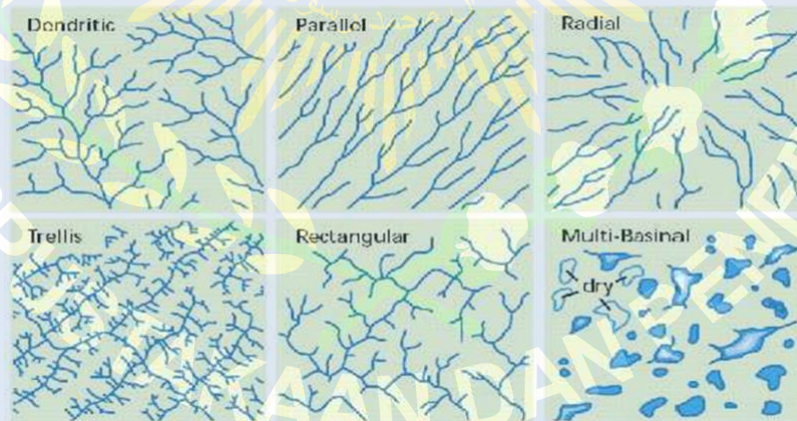
Untuk menganalisis struktur jaringan sungai dan Menentukan kompleksitas morfometri DAS adalah Dasar dalam perhitungan parameter hidrologi (misalnya panjang sungai, densitas drainase, dan koefisien fraktal).

2.3.3 Jaringan Sungai

Menurut (Tunas, I. G. (2017) Jaringan sungai (*drainage network*) merupakan salah satu elemen yang sangat penting dalam analisis morfometri Daerah Aliran Sungai (DAS), khususnya yang berkaitan dengan pemodelan hidrograf. Jaringan sungai yang ada di suatu DAS memiliki karakteristik yang sangat tergantung pada pola distribusi sungainya. Beberapa pola jaringan sungai umum yang ditemukan antara lain dendritik, paralel, radial, trellis, Rectangular, multibasinal, dan pola lainnya (Gambar 2.4). Pola-pola ini menunjukkan cara bagaimana sungai-sungai dan anak-anak sungai tersebut terhubung dan membentuk sistem aliran air dalam suatu DAS. Terbentuknya pola jaringan sungai dalam DAS dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik, termasuk kemiringan permukaan (kemiringan), jenis batuan (litologi), serta struktur geologi yang ada di daerah tersebut. Faktor-faktor ini memainkan peran penting dalam proses pembentukan dan pengaturan aliran sungai dalam DAS tersebut (Pareta et al., 2012).

Pola aliran dendritik, misalnya, sering kali diidentikkan dengan struktur jaringan saraf atau neuron, di mana satu sungai utama bercabang-cabang menjadi

banyak anak sungai yang membentuk berbagai urutan sungai, dari yang paling besar (orde 1) hingga yang lebih kecil (orde 2, 3, dan seterusnya). Dalam hal ini, hidrograf pada titik outlet sungai (tempat sungai bermuara) merupakan hasil akumulasi dari debit udara yang berasal dari seluruh anak sungai yang mengalir ke arah hilir. Pola aliran radial, di sisi lain, terbentuk pada daerah tangkapan air yang berbentuk seperti kipas atau lingkaran, di mana anak-anak sungainya mengalir ke satu titik pusat secara radial. Pola aliran paralel terjadi ketika dua atau lebih jalur aliran sub-DAS yang berada di bagian hulu bertemu dan mengalir sejajar di bagian hilirnya. Sementara itu, pola-pola aliran lain seperti trellis, Rectangular, dan multi-basinal, meskipun lebih jarang ditemui, juga ikut berperan dalam membentuk sistem jaringan sungai di DAS tertentu. Pola-pola tersebut masing-masing memiliki karakteristik khas yang mempengaruhi cara aliran air dan distribusi debit di dalam DAS tersebut (Tunas, I. G. (2017)).



Gambar 2.4 Pola-pola jaringan sungai (drainage network pattern)

(Sumber: FISRWG, 2001)

Jaringan sungai ini tidak hanya mempengaruhi morfologi permukaan tanah, tetapi juga berperan penting dalam mengendalikan besarnya debit aliran yang

dialirkan melalui sungai utama dan anak-anak sungainya. Debit aliran sungai tersebut dipengaruhi oleh struktur dan karakteristik dari jaringan sungai itu sendiri, yang juga berhubungan dengan bagaimana udara mengalir melalui sistem sungai dan bagaimana sistem tersebut berfungsi untuk mengalirkan air hujan dari daerah tangkapan ke hilir. Dalam hal ini, analisis kuantitatif terhadap jaringan sungai atau river network merupakan salah satu cara untuk memahami dinamika aliran udara pada suatu DAS. Pendekatan ini pertama kali diperkenalkan oleh Horton (1945) yang mengembangkan konsep pengordean sungai, yaitu pengelompokkan sungai-sungai berdasarkan ukuran dan cabangnya. Konsep ini membantu dalam memahami bagaimana struktur jaringan sungai mempengaruhi distribusi udara dan debit di seluruh wilayah DAS (Mauliddin, N. L., 2021).

Menurut hukum yang dikemukakan oleh Horton 1945, terdapat tiga parameter utama yang digunakan untuk menganalisis jaringan sungai secara kuantitatif, yaitu: Hukum nomor aliran, yang berhubungan dengan rasio percabangan sungai atau rasio bifurkasi (RB); Hukum panjang aliran, yang berhubungan dengan rasio panjang sungai atau rasio panjang (RL); dan Hukum wilayah aliran, yang berkaitan dengan rasio luas daerah tangkapan atau rasio wilayah (RA). Parameter ketiga ini membantu dalam menganalisis struktur dan distribusi aliran sungai di dalam DAS. Para peneliti terkait rasio ketiga dengan menggunakan dimensi fraktal, yang memberikan pemahaman lebih mendalam tentang bagaimana kompleksitas dan struktur spasial jaringan sungai dapat dianalisis menggunakan prinsip-prinsip matematika fraktal. Dimensi fraktal ini memungkinkan pemodelan yang lebih akurat terhadap sifat-sifat geometris dari

jaringan sungai dan perannya dalam distribusi aliran air di seluruh DAS (Rosso, r. & Bacchi, B. 381-387 1991).

Secara keseluruhan, pemahaman tentang pola-pola jaringan sungai dan karakteristik kuantitasnya sangat penting untuk merancang pemodelan hidrograf yang tepat, yang nantinya dapat digunakan untuk memprediksi aliran sungai, mengelola sumber daya air, serta merancang upaya mitigasi bencana banjir dan kekeringan yang mungkin terjadi di masa depan. Jaringan sungai (*drainage network*) merupakan elemen penting dari morfometri DAS dalam kaitannya dengan pemodelan hidrograf. Karakteristik jaringan sungai di suatu DAS bergantung kepada pola jaringannya seperti pola-pola pada (Gambar 2.4). Pola jaringan sungai dalam suatu DAS dipengaruhi oleh kemiringan, lithologi dan struktur batuan dalam proses pembentukannya (Nurfaika 1-34., 2015).

2.3.4 Rasio Percabangan Sungai (R_B)

Menurut (Tunas, I. G. (2017), rasio percabangan sungai adalah suatu nilai yang diperoleh dengan membagi jumlah total sungai pada suatu orde dengan jumlah total sungai pada orde yang lebih tinggi di atasnya. Rasio ini menggambarkan struktur atau pola percabangan sungai, yang memberikan informasi penting mengenai distribusi dan hubungan antar saluran air di suatu wilayah aliran sungai. Selain itu, Stenly dan Agus (2017, dalam Asfar dkk., 2019) mengajukan sebuah klasifikasi berdasarkan nilai rasio percabangan untuk menggambarkan kondisi hidrologi sungai. Menurut mereka, terdapat tiga kategori utama berdasarkan nilai rasio bifurkasi (R_b) pertama, nilai R_b kurang dari 3 (< 3), yang menunjukkan bahwa sungai memiliki karakteristik dengan muka air yang dapat naik dengan cepat tetapi

turun dengan lambat. Kedua, nilai R_b antara 3 dan 5 (3-5), di mana muka air sungai dapat naik dan turun dengan kecepatan yang relatif moderat, tidak terlalu cepat maupun terlalu lambat. Ketiga, nilai R_b lebih besar dari 5 (> 5), yang berarti muka air sungai dapat naik dan turun dengan cepat, menggambarkan sungai dengan aliran yang lebih dinamis dan responsif terhadap perubahan kondisi hidrologi. Dengan demikian, rasio percabangan ini memberikan gambaran mengenai perilaku aliran air di sungai dan dapat digunakan untuk menganalisis pola aliran serta dinamika perubahan muka air sungai dalam berbagai kondisi. Rasio bifurkasi sungai ini dapat dihitung menggunakan persamaan tertentu yang telah ditentukan oleh para ahli di bidang ini.

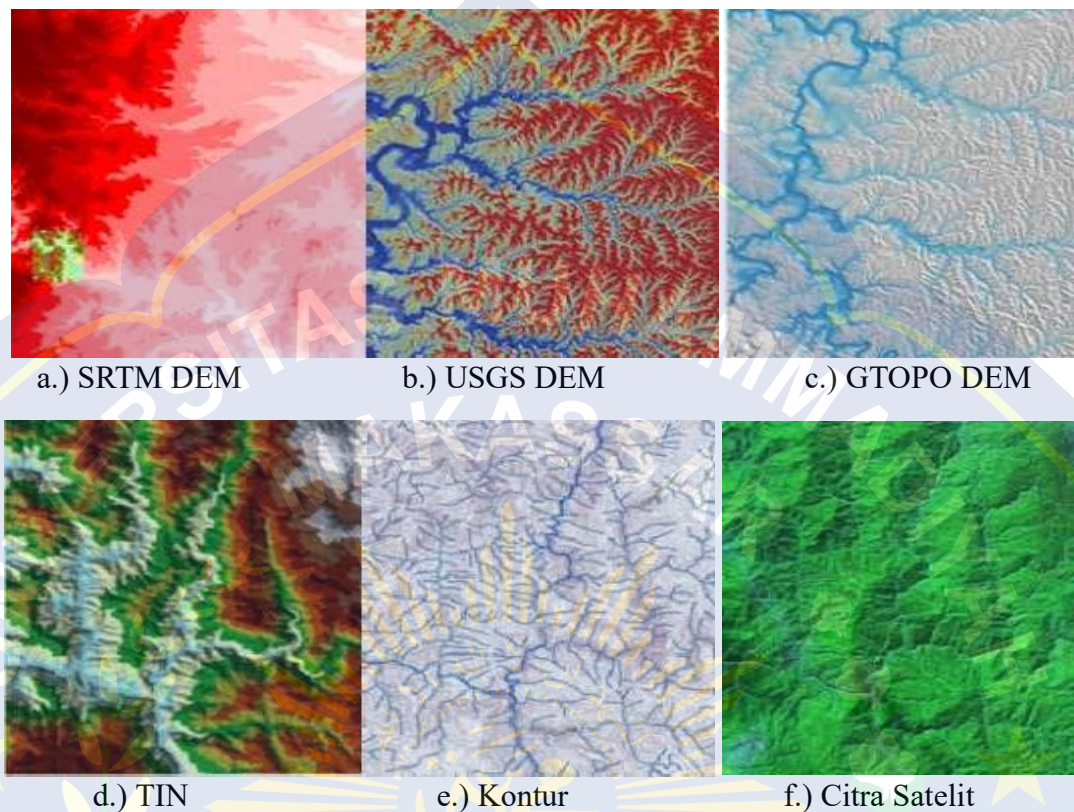
2.3.5 Rasio Panjang Sungai (RL)

Rasio panjang sungai, menurut Horton 1945, dalam Asfar dkk., (2019), diperoleh melalui pembagian antara panjang total sungai pada suatu orde tertentu dengan panjang total sungai pada orde yang lebih rendah di dasar laut. Rasio ini memberikan gambaran tentang hubungan antara sungai-sungai pada berbagai tingkatan orde dalam sebuah jaringan sungai. Pada prinsipnya, rasio panjang sungai ini digunakan untuk memahami struktur hierarki sungai dalam suatu daerah aliran sungai (DAS), serta untuk mengidentifikasi bagaimana sungai-sungai yang lebih besar (orde tinggi) berhubungan dengan sungai-sungai yang lebih kecil (orde rendah).

Vinutha dan Janardhana (2014, dalam Sukristiyanti., 2018) menyebutkan bahwa ada kecenderungan peningkatan nilai rasio panjang sungai seiring dengan meningkatnya orde sungai. Hal ini menunjukkan bahwa dalam DAS yang lebih

berkembang atau lebih maju secara geomorfik, sungai-sungai dengan orde yang lebih tinggi cenderung memiliki panjang yang lebih besar dibandingkan dengan sungai-sungai pada orde yang lebih rendah. Peningkatan rasio panjang sungai ini dapat dijadikan indikator tahap perkembangan geomorfik DAS tersebut, di mana sungai orde tinggi biasanya terbentuk pada tahap geomorfik yang lebih matang atau lebih lanjut .

Menurut (Tunas, I. G. (2017), Pendefinisian atau pemetaan jaringan sungai dalam sebuah DAS secara spasial dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa jenis data dan teknologi penginderaan jauh. Data yang biasa digunakan untuk mendefinisikan jaringan sungai mencakup peta Digital Elevation Model (DEM), peta medan, TIN (Triangulated Irregular Network), kontur, atau citra satelit (seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.5). Proses interpretasi spasial ini bertujuan untuk menggambarkan jaringan sungai secara lebih jelas dan akurat. Keakuran hasil interpretasi sangat tergantung pada resolusi peta atau citra yang digunakan. Peta atau citra dengan resolusi yang lebih tinggi cenderung menghasilkan interpretasi yang lebih detail dan akurat mengenai jaringan sungai, karena dapat menggambarkan fitur-fitur geografis dengan lebih presisi. Sebaliknya, peta atau citra dengan resolusi rendah dapat menghasilkan interpretasi yang kurang tepat, terutama dalam menggambarkan sungai-sungai kecil atau fitur geomorfik yang lebih halus.



Gambar 2.5 Pendefinisian jaringan sungai berdasarkan beberapa jenis data
(Sumber: ESRI, 2010)

- a) SRTM DEM (DEM Misi Topografi Radar Antar-Jemput)
- b) USGS DEM (DEM Survei Geologi Amerika Serikat)
- c) GTOPO DEM (DEM Topografi Global)

Selain itu, ada juga data yang berupa:

- d) TIN (Jaringan Tidak Beraturan Segitiga),
- e) Peta Kontur, dan
- f) Citra Satelit.

Penggunaan berbagai jenis data memungkinkan peneliti untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif tentang jaringan sungai dalam suatu DAS, baik dari sisi geomorfik maupun hidrologi, dengan tingkat akurasi yang

bervariasi tergantung pada kualitas data yang digunakan.

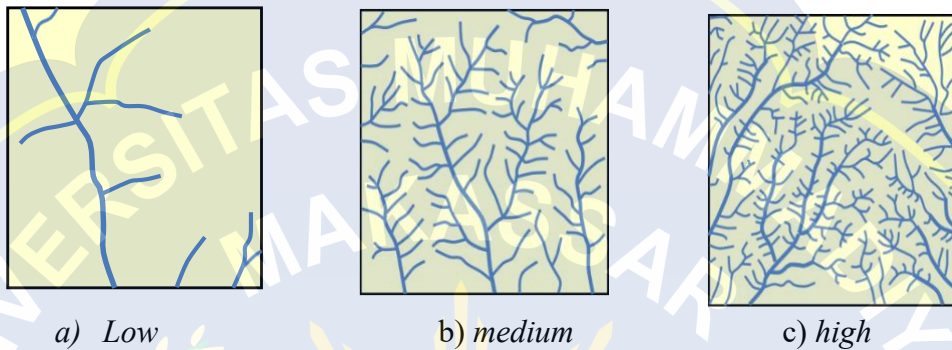
2.3.6 Kerapatan Jaringan Sungai

Kerapatan jaringan sungai adalah angka indeks yang menggambarkan jumlah anak sungai yang terdapat dalam suatu Daerah Aliran Sungai (DAS). Menurut Horton (1945), Strahler (1952), kerapatan sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim serta sifat fisik dari DAS itu sendiri. Indeks kerapatan jaringan sungai dihitung dengan cara membagi jumlah total panjang seluruh ruas sungai dalam suatu DAS (dalam satuan kilometer) dengan luas DAS tersebut (dalam satuan kilometer persegi). Gambar 2.6 memberikan gambaran mengenai tingkat distribusi sungai dalam suatu DAS dan kapasitas penyimpanan air permukaan dalam cekungan-cekungan air seperti danau, rawa, serta badan sungai yang mengalir (I Gede Tunas, 2017).

Secara umum, kerapatan jaringan sungai menggambarkan seberapa banyak air yang dapat dialirkan oleh badan sungai dalam suatu DAS. Semakin tinggi tingkat kerapatan jaringan sungai, semakin besar volume air yang dapat tertampung dalam sistem aliran sungai tersebut. Hal ini penting untuk memahami bagaimana suatu DAS berfungsi dalam mengalirkan dan menyimpan udara di permukaan, serta bagaimana potensi aliran udara dapat dipengaruhi oleh struktur jaringan sungainya (I Gede Tunas, 2017).

Berdasarkan nilai kerapatan jaringan sungai, DAS dapat dipecah ke dalam empat kelompok, yaitu: pertama, kerapatan rendah ($D < 2 \text{ km/km}^2$), kedua, kerapatan sedang ($2 \leq D < 2.5 \text{ km/km}^2$), ketiga, kerapatan tinggi, dan misalnya. Pembagian ini memberi pemahaman tentang bagaimana suatu DAS dengan kerapatan jaringan sungai yang tinggi berfungsi secara hidrologis dibandingkan dengan DAS yang memiliki kerapatan jaringan sungai yang lebih rendah. Kerapatan jaringan sungai yang tinggi biasanya menunjukkan adanya sungai yang

lebih banyak dan lebih padat, yang dapat menyimpan lebih banyak air dalam sistem sungai tersebut. Sebaliknya, DAS dengan kerapatan rendah cenderung memiliki sungai yang lebih jarang dan volume air yang dapat ditampung pun lebih terbatas (I Gede Tunas, 2017)



Gambar 2.6 Klasifikasi Kerapatan Jaringan Sungai

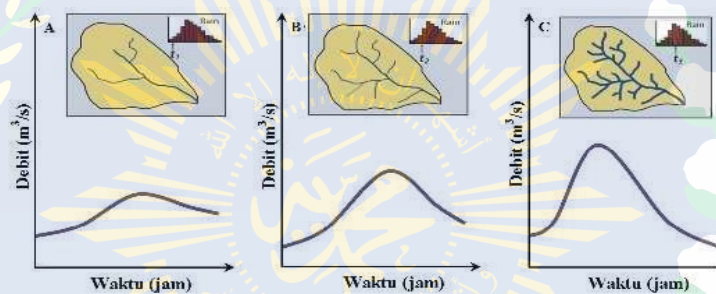
(Sumber: diadaptasi dari Ritter et al., 2011 & I Gede Tunas, 2017)

Pengklasifikasian ini sangat penting untuk memahami bagaimana jaringan sungai dalam suatu DAS dapat mempengaruhi proses hidrologi lainnya, seperti aliran permukaan, pengisian dan pengosongan cekungan air, serta respon DAS terhadap hujan atau curah hujan yang tinggi.

Menurut (Ratnayake 2004, Tunas dan kawan-kawan, 2017) DAS dengan topografi terjal, umumnya memiliki kerapatan jaringan sungai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan DAS yang memiliki topografi landai. Hal ini karena daerah dengan topografi terjal memiliki kemiringan yang lebih besar, yang memungkinkan terbentuknya lebih banyak sungai kecil atau anak sungai untuk mengalirkan air. Sebaliknya, DAS yang landai cenderung memiliki sungai yang lebih sedikit dan lebih luas, karena tidak ada dorongan yang cukup kuat untuk membentuk banyak anak sungai. DAS dengan kerapatan jaringan sungai yang tinggi juga sering kali memiliki waktu puncak (T_p) yang lebih singkat pada hidrografnya, serta puncak hidrograf yang lebih tajam (sharp peak debit). Ini menunjukkan bahwa DAS dengan

kerapatan tinggi lebih responsif terhadap hujan, karena air mengalir lebih cepat dan volume aliran puncak cenderung lebih besar. Sebaliknya, DAS dengan kerapatan rendah cenderung memiliki waktu puncak yang lebih panjang dan puncak hidrograf yang lebih landai, menunjukkan bahwa aliran air di DAS tersebut lebih lambat dan lebih luas. Oleh karena itu, kerapatan jaringan sungai (D) memainkan peran penting dalam menentukan karakteristik hidrograf suatu DAS, khususnya dalam kaitannya dengan waktu puncak (T_p) dan debit puncak (Q_p) yang ditunjukkan dalam Gambar

2.7



Gambar 2.7 Pengaruh kerapatan jaringan sungai terhadap hidrograf

(Sumber: Ratnayake, 2004, Tunas dan kawan-kawan, 2017)

Frekuensi sungai (F) adalah parameter lain yang menggambarkan sifat DAS. Frekuensi sungai dihitung dengan membandingkan jumlah ruas sungai (N) dengan luas DAS (A). Frekuensi sungai memberikan gambaran mengenai seberapa sering sungai muncul dalam suatu DAS dan bagaimana distribusinya. Konsep ini erat kaitannya dengan kerapatan jaringan sungai, karena keduanya menggambarkan bagaimana aliran udara dipengaruhi oleh jumlah dan distribusi sungai dalam DAS tersebut. Kerapatan jaringan sungai (D) dan frekuensi sungai (F) memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai bagaimana aliran air dialirkan dan ditransformasikan dalam DAS tersebut (I Gede Tunas, 2017).

Gambar 2.7 menggambarkan pengaruh kerapatan jaringan sungai terhadap hidrograf, yang diadaptasi dari Ratnayake (2004). Gambar ini menunjukkan bagaimana DAS dengan kerapatan tinggi menghasilkan hidrograf dengan waktu puncak yang lebih cepat dan puncak yang lebih tajam, sementara DAS dengan kerapatan rendah menghasilkan hidrograf yang lebih datar dan dengan waktu puncak yang lebih panjang. Secara teori, konsep yang dikemukakan oleh Horton dan Strahler mengenai pengorganisasian jaringan sungai sangat sesuai dengan prinsip-prinsip dalam teori fraktal. Dalam konteks ini, rasio bifurkasi (RB) dan rasio panjang sungai (RL) yang telah dijelaskan sebelumnya (I Gede Tunas, 2017).

2.4 Teori Fraktal

Secara sederhana, fraktal mengacu pada konsep yang menggambarkan struktur dengan batas-batas tertentu yang memiliki pola berulang, yang muncul baik pada skala besar maupun kecil. Fraktal digunakan untuk memodelkan berbagai proses fisik yang kompleks dan sistem dinamis yang melibatkan perubahan secara berulang. Prinsip dasar di balik fraktal adalah ide bahwa suatu proses yang sederhana, ketika diterapkan melalui serangkaian iterasi atau tujuh tanpa batas, dapat menghasilkan struktur yang jauh lebih kompleks. Dengan kata lain, meskipun proses awalnya mungkin sederhana, hasil akhirnya bisa sangat rumit dan sulit diprediksi. Inilah yang menjadi dasar fraktal meskipun tampak rumit, pada intinya proses yang mendasarinya tetaplah sederhana (Baur, S., Lenz, A & Nowak, 2005).

Fraktal tidak hanya menggambarkan bentuk yang tampak kompleks, tetapi juga berfungsi untuk mencari dan mengungkap pola-pola sederhana yang mungkin ada di balik proses-proses yang terlihat sangat rumit. Banyak fraktal yang

beroperasi berdasarkan prinsip “loop umpan balik” (*feedback loop*), di mana langkah-langkah sederhana diterapkan pada bagian kecil dari data, lalu hasilnya dimasukkan kembali ke dalam sistem untuk memproses lebih lanjut. Proses ini diulangi tanpa batas, dan setiap iterasi lebih mendalam mengungkapkan struktur yang lebih kompleks. Pada akhirnya, batas-batas dari proses ini membentuk pola atau struktur yang kita sebut sebagai fraktal (Science & Environment, 1997).

Salah satu ciri utama dari hampir semua fraktal adalah “*self-similarity*”, yaitu sifat bahwa sebagian dari fraktal tersebut akan serupa atau bahkan identik dengan keseluruhan fraktal itu sendiri, meskipun dengan skala yang lebih kecil. Ini berarti bahwa fraktal memiliki pola yang berulang pada berbagai tingkat skala. Misalnya, jika kita melihat fraktal dari jarak jauh, kita akan melihat pola yang lebih besar, dan jika kita memperbesar salah satu bagian dari fraktal tersebut, kita akan menemukan pola yang serupa atau identik dengan yang ada pada skala besar. Inilah yang memberi kesan bahwa fraktal tidak pernah benar-benar selesai atau terstruktur secara statistik, melainkan terus mengungkapkan detail dan pola baru saat kita memperbesar atau memperkecil skala pengamatan (Rodríguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. 1997).

Meskipun fraktal tampak sangat rumit dan sulit dipahami, mereka sebenarnya merupakan hasil dari proses yang sangat sederhana. Misalnya, dalam banyak kasus, pola fraktal dapat dihasilkan melalui fungsi matematika yang sederhana yang diulang berkali-kali. Dengan cara ini, fraktal memberi kita cara untuk memahami bagaimana sesuatu yang tampaknya sangat kompleks bisa berkembang dari sesuatu yang sangat dasar dan mudah dipahami. Fenomena ini

juga berkaitan erat dengan konsep dalam “*teori chaos*”, yang menyatakan bahwa hasil yang tampak kompleks dan tidak teratur tidak selalu disebabkan oleh proses yang kompleks. Sebaliknya, hasil tersebut mungkin berasal dari sistem yang sederhana yang dipengaruhi oleh berbagai faktor kecil yang mengarah pada ketidakteraturan atau kerumitan yang tampak. Misalnya, dalam beberapa perhitungan matematis, kesalahan pembulatan yang kecil bisa berakumulasi dan menyebabkan hasil yang sangat rumit, meskipun proses perhitungan yang mendasarinya sederhana (Torsekar, Karparis, Jones, Ahmad & Long, 2005).

Teori chaos ini menyoroti bahwa meskipun kita mungkin mengamati pola yang sangat rumit atau tidak teratur dalam suatu sistem, tidak berarti bahwa sistem tersebut harus dimulai dengan sesuatu yang rumit. Sebaliknya, kekacauan dapat muncul dari sistem yang sederhana, dan perubahan kecil dalam kondisi awal atau proses yang terjadi sepanjang waktu dapat menghasilkan hasil yang tampak sangat kompleks. Hal ini menjadi relevansi bagi fraktal, karena prinsip “*self-similarity*” dan kemampuan untuk menghasilkan pola yang sangat rumit dari proses yang sangat sederhana memiliki kesamaan dengan konsep kekacauan, di mana ketidakteraturan dan kompleksitas muncul dari kesederhanaan yang mendalam (Rodríguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. 1997).

Dalam konteks ini, “*dimensi fraktal*” digunakan untuk mengukur kompleksitas objek atau bentuk fraktal tersebut. Dimensi fraktal berbeda dari dimensi geometri biasa, karena dimensi ini mengukur tingkat kerumitan atau ketidakteraturan dalam objek yang tidak dapat diukur dengan dimensi biasa (seperti panjang, lebar, atau kedalaman). Dimensi ini memberi kita cara baru untuk

mengukur objek yang sebelumnya sulit dipahami atau bahkan tidak dapat diukur. Misalnya, jika kita mengukur permukaan yang tampak halus dengan menggunakan dimensi biasa, kita mungkin akan mengira sebagai objek dua dimensi, tetapi permukaan tersebut sebenarnya mungkin memiliki struktur fraktal yang membuatnya lebih kompleks dari yang terlihat pada pandangan pertama (Perman, D. E, 2010).

Dengan konsep fraktal, kini kita memiliki alat untuk mengukur dan memahami objek-objek yang nampaknya tidak teratur atau bahkan kacau, yang sebelumnya mungkin dianggap tidak mungkin untuk dijelaskan secara ilmiah. Teori fraktal membuka wawasan baru dalam banyak bidang, mulai dari matematika hingga geografi.

2.4.1 Definisi Fraktal

Fraktal dalam konteks matematika adalah salah satu kategori bentuk geometri yang memiliki struktur kompleks dan sering kali menunjukkan "dimensi fraksional" alih-alih dimensi bulat seperti yang kita temui pada objek-objek geometri biasa (misalnya garis, bidang, atau ruang). Fraktal adalah bentuk yang sering kali tampak tidak teratur atau acak, tetapi ternyata mengikuti pola tertentu yang dapat diidentifikasi pada berbagai tingkat skala. Istilah "fraktal" sendiri pertama kali dipopulerkan oleh matematikawan Benoît B. Mandelbrot pada tahun 1975. Kata "fraktal" berasal dari bahasa Latin *fractus*, yang berarti "terpecah" atau "retak", yang mencerminkan karakteristik bentuk-bentuk ini yang tampak terfragmentasi atau tidak beraturan. Pada dasarnya, fraktal menggambarkan objek

dengan pola bentuk yang tidak teratur namun memiliki keteraturan tertentu yang tersembunyi di dalamnya (Palma, D. I & Nadiasari, E. 2022).

Secara historis, penelitian pertama tentang fraktal dilakukan dengan mengamati garis pantai Inggris, yang menjadi objek pertama yang digunakan untuk meneliti konsep ini. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menggambarkan panjang garis pantai Inggris menggunakan metode pengukuran sederhana dengan alat pengukur seperti meteran. Dalam proses tersebut, ditemukan bahwa panjang garis pantai tergantung pada ukuran alat pengukur yang digunakan, dan semakin kecil ukuran alat pengukur yang digunakan, semakin besar panjang garis pantai yang dihasilkan. Penelitian ini kemudian mengungkapkan bahwa dimensi garis pantai Inggris ternyata bukanlah angka bulat, tetapi memiliki nilai sekitar 1,25. Ini adalah langkah awal menuju pengembangan teori fraktal, yang menunjukkan bahwa objek-objek alam seringkali memiliki dimensi yang tidak sesuai dengan konsep geometri tradisional yang menggunakan bilangan bulat (Siregar & Juniati, 2023).

Penelitian ini juga memperkenalkan konsep dimensi fraktal sebagai ukuran matematis dari keragaman dan kerapatan data geometri dalam sebuah objek atau citra. Dalam konteks panjang garis pantai, pendekatan yang digunakan adalah dengan menghitung jumlah segmen garis pantai berdasarkan berbagai ukuran alat pengukur, kemudian mengalikan jumlah segmen dengan ukuran segmen tersebut untuk mendapatkan estimasi panjang garis pantai. Konsep ini menunjukkan bahwa panjang objek yang tampak tidak teratur, seperti garis pantai, akan bergantung pada ukuran pengukuran yang digunakan, dan semakin kecil ukuran pengukuran,

semakin kompleks dan panjang objek tersebut terlihat. Dengan menggunakan ukuran yang lebih kecil, garis pantai Inggris terlihat lebih detail, panjangnya semakin besar, dan nilai dimensi fraktalnya semakin kecil. Temuan ini memperkenalkan ide dasar tentang dimensi fraktal dan bagaimana hubungan antara dimensi dan panjang objek dapat dijelaskan dengan hukum pangkat fraktal, meskipun penjelasan tentang hukum pangkat ini masih belum sepenuhnya dipahami pada masa itu (Mandelbrot, B. B. 1983).

Fraktal adalah pola yang sangat kompleks, yang dapat muncul dalam berbagai konteks, mulai dari bentuk alam, pola di dalam tumbuhan, hingga struktur dalam sistem sosial dan ekonomi. Salah satu sifat mendasar dari fraktal adalah *self-similarity*, yaitu kemampuan fraktal untuk menampilkan pola yang mirip pada berbagai tingkat Skala. Dengan kata lain, jika kita memperbesar atau memperkecil suatu bagian dari fraktal, kita akan menemukan pola yang hampir identik dengan keseluruhan bentuknya, meskipun pada skala yang berbeda. Fraktal terbentuk melalui pengulangan proses yang sangat sederhana yang dilakukan berulang kali dalam suatu lingkaran umpan balik yang tidak pernah berhenti, yang menghasilkan pola-pola yang sangat kompleks dan beragam (Lei & Kusumo, 1999).

2.4.2 Karakteristik Fraktal

Keserupadirian adalah salah satu karakteristik utama dari fraktal yang menjelaskan bagaimana suatu objek fraktal mempertahankan bentuk atau pola yang sama pada berbagai skala pengamatan. Fraktal memiliki tiga jenis keserupadirian yang berbeda, yang masing-masing menunjukkan tingkat kekuatan kesamaan bentuk pada berbagai skala. Menurut Rodríguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. 1997 selain *self-similarity*, fraktal juga memiliki sifat-sifat lain seperti *self-affinity*, *self-inverse*,

dan self-squaring. Sifat-sifat ini memungkinkan fraktal berperilaku unik dalam berbagai konteks, baik dalam geometri maupun dalam statistik. Berikut ini adalah tiga tingkat keserupaan diri (self-similarity) pada fraktal yang membedakan seberapa kuat keserupaan tersebut dapat diamati pada berbagai skala pengamatan :

- a. Serupa diri secara persis (Exact self-similarity). Ini adalah keserupadirian yang paling kuat. Fraktalnya terlihat sama persis pada berbagai skala.
- b. Serupa diri secara lemah (Quasi self-similarity). Ini adalah keserupadirian yang tidak terlalu ketat. Fraktalnya terlihat mirip (tapi tidak persis sama) pada skala yang berbeda. Fraktal jenis ini memuat salinan dirinya dalam bentuk yang terdistorsi maupun rusak.
- c. Serupa diri secara statistik (Statistical self-similarity). Ini adalah keserupadirian yang paling lemah. Fraktalnya memiliki ukuran numeris atau statistik yang terjaga pada skala yang berbeda. Kebanyakan definisi fraktal yang wajar secara trivial mengharuskan suatu bentuk keserupadirian statistik.

2.4.3 Dimensi Fraktal

Dalam ranah matematika, konsep dimensi secara umum merujuk pada jumlah minimum koordinat yang diperlukan untuk menentukan posisi setiap titik dalam suatu ruang atau objek. Dimensi tidak hanya menggambarkan ukuran ruang secara fisik, tetapi juga menyimpan berbagai informasi penting mengenai karakteristik dan sifat geometri dari suatu himpunan. Dalam geometri klasik atau geometri Euclidean, dimensi selalu dinyatakan dalam bilangan bulat, seperti dimensi dua untuk bidang datar dan dimensi tiga untuk ruang tiga dimensi. Hal ini

mencerminkan struktur yang teratur dan mudah dipahami secara visual (Wahyuningsih, S. & Hernadi, J. 2020).

Menurut (Xianmeng Meng et al. 2020) Dimensi fraktal adalah ukuran matematis yang digunakan untuk menggambarkan kompleksitas dan ketidakteraturan bentuk suatu objek, khususnya objek yang tidak memiliki bentuk geometris standar seperti garis lurus, bidang datar, atau volume. Berbeda dengan dimensi Euclidean yang selalu berupa bilangan bulat (misalnya dimensi 1 untuk garis, 2 untuk bidang, dan 3 untuk ruang), dimensi fraktal dapat berupa bilangan pecahan (non-integer), mencerminkan sejauh mana suatu objek "mengisi" ruangnya. Dimensi fraktal sangat berguna dalam menganalisis pola-pola alami dan struktur geometris yang kompleks, seperti garis pantai, jaringan sungai, atau pola cabang pohon.

Tabel 2. 3 Kategori dimensi fraktal

Df	Penjelasan
1.0 – 1.3	Objek hampir menyerupai garis lurus. Kompleksitas rendah, sedikit penyimpangan dari bentuk satu dimensi. Contohnya adalah garis pantai yang relatif lurus atau retakan awal pada material.
	Terdapat lebih banyak detail dan ketidakteraturan, tetapi belum terlalu kompleks.

1.3 – 1.6	Umumnya ditemui pada pola-pola alami seperti kontur sungai atau pola erosi.
1.6 – 2.0	Objek sangat kompleks, mendekati bentuk dua dimensi. Banyak ditemukan pada fenomena alam seperti sistem sungai, struktur awan, kontur pegunungan, atau distribusi vegetasi. Juga sering muncul dalam pola tekstur citra medis atau citra permukaan tanah.

Sumber: Spehar, B., Clifford, C. W. G., Newell, B. R., & Taylor, R. P. (2003)

2.4.4 Koefisien Fraktal dan Aplikasinya

Koefisien fraktal merupakan suatu nilai numerik yang menggambarkan tingkat kompleksitas dan keteraturan geometris dari suatu bentuk atau pola alami, termasuk jaringan sungai pada Daerah Aliran Sungai (DAS). Nilai ini umumnya dinyatakan dalam bentuk dimensi fraktal (D_f), yang berada di antara bilangan bulat dimensi Euclidean. Pada jaringan sungai, koefisien fraktal biasanya berada di antara 1 dan 2. Nilai mendekati 1 menunjukkan pola yang sederhana (mirip garis lurus), sedangkan nilai mendekati 2 menunjukkan pola yang semakin rumit dan menyebar pada permukaan bidang (Mandelbrot, 1983).

Dalam konteks hidrologi, nilai koefisien fraktal dapat digunakan untuk:

1. Mengukur kerumitan percabangan sungai, di mana semakin tinggi nilai fraktal menunjukkan percabangan yang semakin kompleks (Tarboton, 1996).

2. Menganalisis efisiensi sistem aliran air, karena DAS dengan nilai fraktal tinggi lebih efektif dalam mengalirkan air hujan menuju sungai utama (Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 1997).
3. Mengidentifikasi keteraturan statistik dari aliran sungai dan struktur DAS, sehingga dapat digunakan dalam perencanaan tata air dan mitigasi bencana banjir (Cheng et al., 2000).

Metode umum untuk menghitung koefisien fraktal meliputi:

- Box Counting menghitung jumlah grid yang menutupi pola sungai pada berbagai skala, menghasilkan estimasi dimensi fraktal geometris.
- Horton's Law / Ratio menganalisis hubungan jumlah dan panjang sungai antar ordo sungai.
- Hurst Exponent menilai sifat memori jangka panjang pada data aliran sungai atau curah hujan.

Fenomena alam yang terjadi di sekitar kita seringkali dapat dipahami dengan berbagai pendekatan ilmiah, meski terkadang sulit untuk dijelaskan sepenuhnya menggunakan berbagai disiplin ilmu yang tersedia. Beberapa fenomena tetap menjadi misteri yang belum dapat diselesaikan sepenuhnya. Namun, dalam banyak kasus, konsep fraktal memberikan pendekatan baru untuk memahami berbagai aspek kompleksitas yang ada di alam. Fraktal, sebagai konsep geometri, dapat diterapkan dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan, seperti hidrologi, kedokteran, pertanian, rekayasa, geosains, serta dalam bidang seni, musik, dan informasi teknologi. Aplikasi fraktal ini bahkan meluas ke hal-hal

seperti kompresi data dan sinyal, seismologi, kosmologi, dan masih banyak lagi (Rodríguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. 1997).

a) Koefisien Fraktal sebagai Indikator Kompleksitas

Koefisien fraktal merupakan ukuran yang digunakan untuk menggambarkan tingkat kompleksitas dari suatu objek fraktal. Secara khusus, koefisien ini memberikan gambaran tentang seberapa banyak detail yang terkandung dalam objek tersebut pada berbagai skala atau tingkat pengamatan. Dalam berbagai aplikasi, koefisien fraktal digunakan untuk menganalisis citra digital, pemodelan geometri alam, dan juga dalam bidang kedokteran, seperti dalam deteksi kanker payudara melalui analisis citra termal. Metode yang sering digunakan dalam analisis fraktal ini meliputi teknik seperti kotak pasir, penghitungan kotak, penutup bola, debu cantor, dan metode kemiripan.

b) Teori Fraktal dan Konsep Self-Similarity

Teori fraktal pertama kali berkembang dari konsep “self-similarity”, yang merujuk pada keserupaan bentuk antara bagian dan keseluruhan suatu objek. Artinya, suatu objek fraktal, meskipun diperbesar atau diperkecil, tetap menunjukkan struktur yang serupa pada berbagai tingkat skala pengamatan. Pada dasarnya geometri fraktal dapat dipahami sebagai hubungan antara ukuran total sistem (pecahan) dan ukuran terkecilnya (fraktal). Istilah fraktal pertama kali diperkenalkan oleh Benoît B. Mandelbrot pada tahun 1982 dalam karyanya yang mengemukakan bahwa objek-objek alam dapat dianggap sebagai fraktal, yakni hasil dari gaya yang bekerja pada berbagai tingkatan skala yang ada pada objek tersebut. Gaya ini menghasilkan iterasi atau pencampuran dari bentuk

dasar (fraktal seed) yang kemudian menyatu dalam satu objek yang utuh. Proses ini dikenal dengan istilah “self-similarity”, yang bersifat “scale invariant”, yang berarti bahwa meskipun diamati pada skala yang berbeda, bentuk geometrinya tetap sama dengan bentuk awal atau benih fraktalnya dalamnya.

Stacey (1988) dalam Bakri (2005) menyebut fraktal sebagai pola keteraturan yang tersembunyi dalam kekacauan atau *hidden pattern in chaos*. Pola keteraturan ini, menurut Mandelbrot, merupakan hasil kumulasi bagian-bagian objek yang diatur menurut urutan beberapa skala pengamatan. Hal ini selalu mengikuti hukum fungsi pangkat atau non-linier, yang menghasilkan objek fraktal yang memiliki dimensi berupa bilangan pecahan, yang dalam geometri fraktal dikenal dengan sebutan dimensi pecahan (Bakri, 2005). Fraktal geometri ini tidak hanya digunakan dalam ilmu alam tetapi juga dalam berbagai bidang lainnya, termasuk ilmu sosial, ekonomi, dan seni, menunjukkan betapa luasnya aplikasi konsep ini dalam memahami dunia.

c) Fraktal dalam Ilmu Hidrologi

Dalam bidang hidrologi, banyak penelitian yang telah menunjukkan bahwa sistem jaringan sungai memiliki sifat fraktal. Artinya, jaringan sungai dalam suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) yang lebih kecil, sebagai bagian dari sub-DAS, secara statistik memiliki struktur yang mirip dengan DAS yang lebih besar. Penemuan ini memberikan perspektif baru dalam memahami bagaimana struktur sungai dan aliran air berfungsi dalam skala yang lebih luas (Daya Sagar et al., 1998). Konsep fraktal dalam hidrologi ini dapat digunakan untuk menggambarkan bentuk geometri sungai melalui dimensi fraktal (D_f), yang

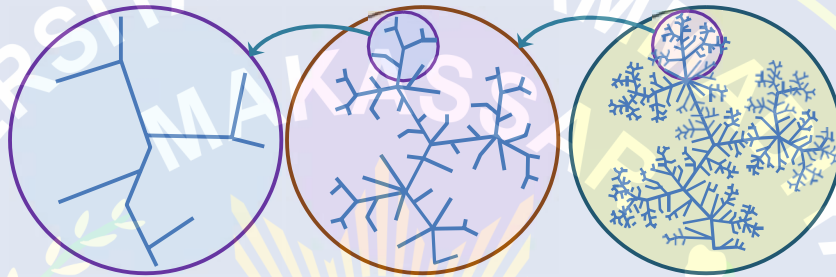
menyatakan perbandingan rasio percabangan sungai (RB) dan rasio panjang sungai (RL) yang dihasilkan dari orde sungai. Dimensi fraktal ini sering disebut sebagai Dimensi Hausdorff-Besicovitch.

Dimensi fraktal ini memiliki berbagai aplikasi dalam studi hidrologi, terutama dalam memodelkan respon hidrologi dari suatu DAS. Penelitian oleh Fiorentino dkk. (2002) dan Cudennec dkk. (2004) dalam Tian dkk. (2013) menunjukkan bahwa dimensi fraktal sangat berguna dalam memodelkan respon terhadap curah hujan dan aliran air pada suatu DAS. Dimensi fraktal dari sungai dapat dilihat dari dua aspek utama, yaitu organisasi jaringan hidrologi sungai pada berbagai skala dan lintasan air dalam jaringan hidrologi tersebut (Rodriguez-Iturbe et al., 1997 dalam Irianto, 2003).

Pendekatan lain dalam pengalihragaman hujan menjadi aliran adalah pemodelan hidrograf satuan sintetik (HSS) berdasarkan karakteristik fraktal Daerah Aliran Sungai (DAS). Karakteristik fraktal DAS merupakan bagian dari parameter morfometri secara khusus berkaitan langsung dengan karakteristik jaringan hidrologi sungai (DAS). Hal yang menarik dicermati dalam implementasi konsep fraktal ini adalah respon hidrologi DAS dapat dipresentasikan dengan sangat baik oleh karektersitik jaringan hidrologi sebagai bentuk sifat fraktal DAS (Irianto, 2003). Pemodelan HSS menggunakan karaketristk fraktal DAS khususnya berdasarkan pemodelan konseptual telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Rodriguez-Iturbe dan Valdes (1979) memperkenalkan HS GUH (Geomorphological Unit Hydrograph) (Himanshu et al., 2013 dan Swain et al., 2015).

d) Karakteristik Fraktal dalam Jaringan Hidrologi Sungai

Menurut (Tunas, I.G. 2017) Karakteristik fraktal pada jaringan hidrologi sungai menunjukkan kestabilan yang luar biasa meskipun diamati pada skala yang berbeda. Dengan kata lain, meskipun ukuran atau skala pengamatan berubah seperti gambar di bawah:



Gambar 2.8 Tipikal keserupaan bentuk (self similarity)

(Sumber: Daya Sagar et al.. 2001, Tunas dan kawan-kawan, 2017)

2.5 Metodologi Analisa Koefisien Fraktal

Penelitian ini menerapkan analisis koefisien fraktal untuk mengukur kompleksitas dan batas geometri struktur Daerah Aliran Sungai (DAS), khususnya pada Sub DAS Mata Allo. Dengan mengintegrasikan data geospasial seperti peta topografi ArcMap, citra satelit, dan Sistem Informasi Geografis (GIS), penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik jaringan sungai dan pola DAS di berbagai skala pengamatan (Permana, D.E, 2010).

Perhitungan dimensi fraktal menggunakan metode seperti boxcounting atau sand box memungkinkan analisis keteraturan, fragmentasi, dan hubungan spasial dalam sistem sungai. Semakin tinggi dimensi fraktal, semakin kompleks pola aliran dan batas DAS, yang dapat memberikan informasi penting terkait hidrologi, distribusi curah hujan, serta karakteristik studi topografi wilayah. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa analisis fraktal dapat menjadi alat yang efektif dalam

memahami pola geometri DAS serta bagaimana elemen-elemen di dalamnya berinteraksi. Temuan ini berkontribusi dalam perencanaan sumber daya udara, pengelolaan bencana alam, serta pemodelan hidrologi yang lebih akurat dan berkelanjutan. Selain itu, penerapan teori fraktal juga membuka peluang dalam berbagai disiplin ilmu lain, termasuk perencanaan pembangunan dan mitigasi risiko lingkungan (Ratri, Purnomo & Riwansia, 2014).

2.5.1 Metode Pengukuran Koefisien Fraktal

Penelitian ini menerapkan metode boxcounting untuk mengukur koefisien fraktal pada Sub DAS Mata Allo, yang bertujuan untuk menganalisis kompleksitas geometri batas DAS serta struktur jaringan sungainya. Metode ini memungkinkan karakterisasi bentuk objek dengan tingkat kompleksitas tinggi, termasuk pola alami yang tidak beraturan, seperti jaringan sungai dan batas DAS. Dengan membagi objek menjadi grid berukuran variatif dan menghitung jumlah kotak yang diperlukan untuk menutupi objek tersebut, diperoleh dimensi fraktal yang mencerminkan tingkat keteraturan atau fragmentasi bentuk DAS dan jaringan sungainya. Semakin tinggi nilai dimensi fraktal, semakin kompleks dan tidak teraturnya struktur tersebut, sedangkan nilai yang lebih rendah menunjukkan pola yang lebih sederhana. Dari analisis ini memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai interaksi antara batas DAS dan jaringan sungainya, serta bagaimana pola spasialnya terbentuk pada berbagai skala. Temuan ini dapat dimanfaatkan untuk memahami karakteristik topografi wilayah Sub DAS Mata Allo secara lebih komprehensif, yang berpotensi mendukung studi hidrologi dan pengelolaan sumber daya udara di daerah tersebut (Zhou, M., et al.(2008).

1. ArcMap

ArcMap adalah perangkat lunak utama dalam banyak proses Sistem Informasi Geografis (SIG) dan pemetaan berbasis komputer yang memiliki kemampuan utama untuk visualisasi data spasial, pembuatan database geospasial baru, pemilihan (*query*), pengeditan, desain peta, serta analisis dan penyajian hasil dalam laporan kegiatan. Beberapa fitur yang disediakan oleh ArcMap meliputi eksplorasi data (*explore*), analisis sig (*analisis*), penyesuaian hasil, penyajian data, dan dukungan untuk pemrograman (Priambodo, Nur, Sandri, Ahmad & Septiandiani, 2023).

2. Pengumpulan Data Geospasial

Pengumpulan data geospasial dalam penelitian ini menggunakan aplikasi ArcMap sebagai alat utama dalam digitalisasi dan analisis spasial. Data yang diperoleh dari berbagai sumber, seperti citra satelit, foto udara, dan peta topografi, dikoreksi serta direferensikan dalam sistem koordinat yang sesuai untuk memastikan akurasi spasial (ESRI, 2020). Dengan pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG), analisis hidrologi dapat dilakukan secara lebih efisien, termasuk ekstraksi parameter hidrologi seperti luas daerah aliran sungai (DAS), panjang sungai utama, serta kemiringan lahan. Selain itu, analisis spasial yang dilakukan memungkinkan identifikasi pola aliran, daerah tangkapan hujan, serta klasifikasi kemiringan dan tata guna lahan yang berpengaruh terhadap infiltrasi dan limpasan permukaan. Peta digital yang dihasilkan dari proses ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam perencanaan pengelolaan sumber daya air, perhitungan debit Andalan,

serta pemodelan hidrologi guna memancarkan potensi udara permukaan secara lebih akurat dan terintegrasi (Priambodo et al, 2023).

3. Pemodelan Jaringan Sungai dan Batas DAS

Pemanfaatan perangkat lunak ArcMap dalam analisis geospasial jaringan sungai dan batas DAS telah memungkinkan pemetaan yang lebih akurat dan efisien terhadap wilayah Sub DAS Mata Allo. Dengan mengintegrasikan berbagai data geospasial, seperti citra satelit, foto udara, dan peta topografi, analisis spasial dapat dilakukan secara mendalam untuk memahami karakteristik topografi dan hidrologi daerah yang diteliti (Amirudin A & Handayani R. 2021).

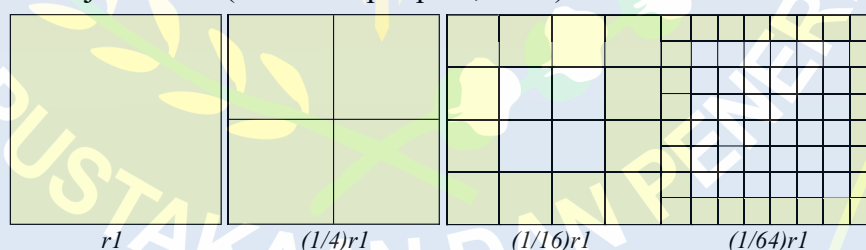
Dari pemodelan ini memberikan gambaran yang jelas mengenai pola aliran sungai, distribusi udara, serta hubungan spasial antara elemen-elemen dalam DAS. Selain itu, penggunaan teknologi SIG memungkinkan eksplorasi data dalam berbagai skala, sehingga perubahan dalam sistem sungai dapat dianalisis dengan lebih komprehensif. Dengan demikian, analisis ini mendukung perencanaan dan pengelolaan sumber daya udara yang lebih efektif berbasis data spasial yang akurat (Amirudin et al. 2021).

4. Box Counting

Metode box-counting atau penghitungan kotak adalah salah satu teknik utama yang digunakan untuk mengukur dimensi fraktal dari objek yang memiliki struktur atau bentuk yang sangat kompleks dan tidak teratur. Metode ini memungkinkan peneliti untuk menyalakan dan menghitung dimensi objek-objek yang tidak dapat dijelaskan dengan model geometri tradisional, seperti garis pantai, jaringan sungai, atau bentuk-bentuk alam lainnya. Box-counting sangat efektif

dalam mempelajari objek dengan bentuk yang tidak simetris dan tidak dapat diprediksi secara mudah karena metode ini tidak bergantung pada keteraturan bentuk objek yang dianalisis (I Gede Tunas, 2017). Misalnya, jaringan sungai yang memiliki banyak cabang kecil dan besar yang saling berhubungan sangat cocok dianalisis menggunakan metode ini.

Teknik box-counting bekerja dengan cara sistematis menutupi objek dengan kotak-kotak (atau kisi-kisi) pada berbagai ukuran dan kemudian menghitung jumlah kotak yang diperlukan untuk menutupi seluruh objek yang dimaksud. Dengan cara ini, dimensi fraktal dari objek tersebut dapat dihitung berdasarkan hubungan antara ukuran kotak yang digunakan dan jumlah kotak yang diperlukan. Hal ini memungkinkan peneliti untuk mengukur kompleksitas objek berdasarkan jumlah kotak yang dibutuhkan untuk menutupi objek tersebut pada skala yang berbeda. Box-counting memberikan gambaran tentang bagaimana objek terfragmentasi atau terpecah-pecah pada berbagai tingkat skala, yang merupakan ciri khas dari objek fraktal (Lim & Napitupulu, 2023).



Gambar 2.9 Pembagian kotak berdasarkan Box Counting Dimension

(Sumber: Daya Sagar et al.. 2001, Tunas dan kawan-kawan, 2017)

Metode ini banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk dalam analisis citra, geologi, biosains, dan hidrologi, di mana objek-objek yang dianalisis cenderung memiliki bentuk yang tidak beraturan atau berstruktur kompleks. Salah

satu penerapan dari metode ini adalah dalam penghitungan dimensi fraktal pada jaringan sungai, di mana jaringan sungai diukur untuk memahami seberapa kompleks atau tidak teraturnya distribusi cabang-cabang sungai dan bagaimana struktur tersebut dapat mempengaruhi aliran udara serta distribusi sedimen (Tunas, I. G. 2017).

Dalam konteks penghitungan kotak, metode ini dapat diterapkan dengan menggunakan perangkat lunak seperti FracLac untuk melakukan penghitungan dan analisis dimensi fraktal. FracLac memungkinkan pengguna untuk mengukur beberapa jenis dimensi fraktal (DF), termasuk dimensi penghitungan kotak (DB) dan fitur lacunarity, yang memberikan informasi lebih lanjut tentang seberapa "kosong" atau "berongga" bagian-bagian tertentu dari objek. Lacunarity ini sering kali digunakan untuk menggambarkan sejauh mana suatu objek memiliki pola yang tersebar atau berstruktur cacat, yang seringkali ditemukan pada fenomena alam (Zakaria, A. F, 2016).

Dimensi fraktal (DF) yang dihitung menggunakan metode box-counting berfungsi sebagai ukuran kompleksitas atau ketidakteraturan dari objek. Ini digunakan untuk menggambarkan bagaimana objek tersebut mengisi ruang pada berbagai skala, dengan semakin banyak kotak yang diperlukan pada skala yang lebih kecil untuk menutupi seluruh objek. Prosedur dasar dari penghitungan kotak adalah dengan meletakkan kotak-kotak berukuran menurun secara berurutan di atas gambar atau objek yang dianalisis, lalu menghitung jumlah kotak yang diperlukan untuk menutupi bagian penting dari objek tersebut. Langkah ini dilakukan secara berulang dengan ukuran kotak yang semakin kecil, hingga mencapai ukuran

minimum yang relevan (Zakaria, A. F, 2016).

Untuk lebih jelasnya, misalnya dalam penelitian jaringan sungai, kotak-kotak persegi dengan ukuran tertentu (misalnya 1.000.000 meter) ditempatkan di atas jaringan sungai yang sedang dianalisis. Setelah itu, kotak ini dibagi menjadi empat bagian, dan langkah ini diulang terus-menerus, dengan ukuran kotak yang semakin kecil pada setiap langkah, hingga mencapai ukuran yang sangat kecil mendekati nol. Setiap kali kotak dibagi, jumlah kotak yang diperlukan untuk menutupi jaringan sungai terhitung. Data ini akan memberikan hubungan antara ukuran kotak (r) dan jumlah kotak (N), yang kemudian dapat diterjemahkan dalam bentuk grafik setelah mengkonversi nilai-nilai tersebut ke dalam logaritma (Tunas, I. G. 2017).

Hubungan antara ukuran kotak (r) dan jumlah kotak (N) dapat dijelaskan dengan persamaan matematis yang dikenal dengan hukum pangkat fraktal:

$$N(r) = \frac{1}{r^D} \quad (1)$$

Dimana:

D = dimensi fraktal

$N(r)$ = jumlah kotak yang menutupi objek

r = ukuran kotak

Dengan menggunakan persamaan ini, dimensi fraktal (D) dapat dihitung dengan ukuran hubungan antara jumlah kotak dan ukuran kotak pada berbagai skala.

Persamaan ini kemudian dikonversi ke bentuk algoritma untuk mempermudah perhitungan dan analisis lebih lanjut. Setelah data algoritma diperoleh, dimensi fraktal dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{Log}(N(r)) = D \log\left(\frac{1}{r}\right), \quad (2)$$

$$D = \frac{\log N(r)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (3)$$

Di dapatkan bentuk algoritma untuk memperoleh nilai gradien $D(\alpha)$. Nilai α merupakan hasil pengukuran D dalam bentuk grafik, maka :

$$\alpha = \frac{n(\sum_{k=1}^n xy) - (\sum_{k=1}^n x)(\sum_{k=1}^n y)}{n(\sum_{k=1}^n x^2) - (\sum_{k=1}^n x)^2} \quad (4)$$

5. Horton

Metode Horton digunakan untuk menganalisis pola percabangan sungai dan menghitung dimensi fraktal suatu daerah aliran sungai (DAS) Konsep utama (Horton, R. E. 1945):

a. Rasio Bifurkasi/Percabangan (Rb)

Mengukur perbandingan jumlah sungai pada ordo tertentu dengan ordo berikutnya:

$$Rb = \frac{Nu}{Nu+1} \quad (5)$$

Dimana:

Rb = Rasio Percabangan

Nu = Jumlah total segmen aliran orde ke- U

$Nu + 1$ = Jumlah segmen dari urutan yang lebih tinggi

b. Rasio Panjang (RL)

Mengukur rasio panjang rata-rata sungai antara ordo berturut-turut:

$$RL = \frac{Lu}{Lu-1} \quad (6)$$

Dimana:

RL = Rasio Panjang sungai

Lu = Jumlah total panjang sungai orde ke- U (Km)

$Lu - 1$ = Jumlah total panjang sungai orde ke- $U - 1$ (Km)

c. Dimensi Fraktal (D_f)

Dimensi fraktal dihitung menggunakan hubungan logaritmik:

$$D_f = \frac{\log R_b}{\log R_L} \quad (7)$$

D_f = Dimensi Fraktal

$\log R_b$ = Nilai rata-rata rasio percabangan

$\log R_L$ = Nilai rata-rata Rasio panjang sungai

Nilai D_f menunjukkan tingkat kerumitan percabangan sungai, dengan nilai lebih tinggi menunjukkan struktur yang lebih kompleks dan bercabang.

6. Eksponen Hurst

Menurut Metode Eksponen Hurst yang pertama kali diperkenalkan oleh H. E. Hurst pada tahun 1951, telah terbukti efektif untuk menganalisis data runtu waktu (Mandelbrot, 1982). Nilai Eksponen Hurst berada dalam rentang antara 0 hingga 1, yang digunakan untuk menentukan dimensi fraktal dari suatu data runtu waktu. Dimensi fraktal ini nantinya berfungsi sebagai indikator untuk menguji kemungkinan prediktabilitas pola dinamika data. Penelitian ini menggunakan dimensi fraktal untuk mengetahui apakah data curah hujan di Sub DAS Mata Allo dapat diprediksi (Bărbulescu & Maftei, 2010).

$$\left(\frac{R(n)}{s(n)}\right) = Cn^H \quad (8)$$

Dimana:

R : panjang jangkauan data

S : standar deviasi

n : panjang rentang data dimana $n = \{N/2, N/4, \dots\}$ dengan N jumlah total data c : konstanta

H : nilai eksponen Hurst

Melalui persamaan (2.3) untuk mendapatkan nilai eksponen Hurst (H) diperoleh dengan cara mengplot nilai log (R/S) terhadap masing-masing nilai log (n). Kemiringan garis regresi dari kurva linier ini diaproksimasi sebagai nilai H sehingga nilai ini akan berada pada jarak antara 0 dan 1.

Kale dan Butar (2011) mengatakan bahwa analisis R/S yang digunakan pada data runtun waktu untuk mengestimasi nilai Eksponen Hurst. Jika data runtun waktu berdistribusi normal maka nilai estimasi Eksponen Hurst juga berdistribusi normal. Prosedur estimasi melibatkan tiga langkah dasar yaitu :

- I. Menghitung total kumulatif pada setiap titik waktu (Kale dan Butar, 2011)

$$\Gamma_{N,k} = \sum^k (F_i - \mu_N) , \text{ untuk } 0 < k \leq N \quad (9)$$

Dengan:

F_i = nilai runtun waktu pada waktu ke- i

μ_N = rata-rata data

N = jumlah data

Selisih antara kumulatif maksimum dan kumulatif minimum,

dinotasikan dengan R ,

$$R = Maks(\Gamma_{N,k}) - Min(\Gamma_{N,k}) \quad (10)$$

Dengan:

$Maks(\Gamma_{N,k})$ = nilai maksimum pada $(\Gamma_{N,k})$

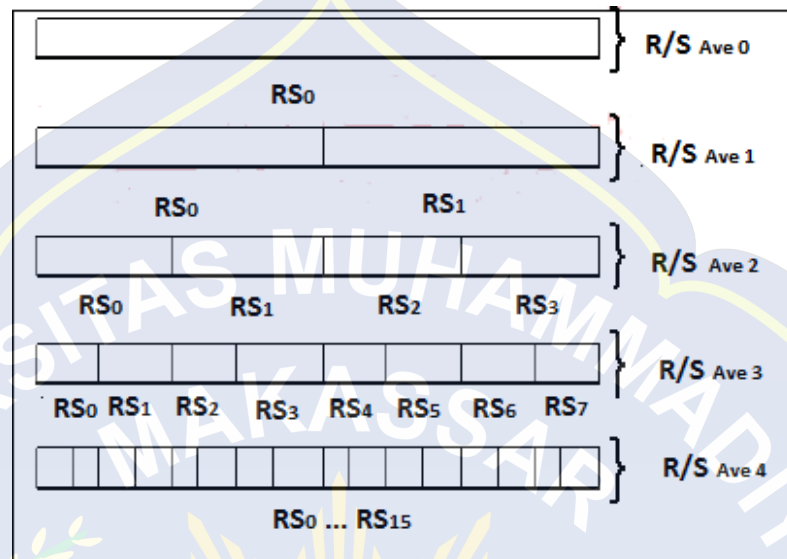
$Min(\Gamma_{N,k})$ = nilai minimum pada $(\Gamma_{N,k})$

Kemudian menghitung standar deviasi, sebagai berikut (Kale dan Butar, 2011):

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_N)^2} \quad (11)$$

Terakhir menghitung nilai $\frac{R}{s}$

Selanjutnya menghitung nilai (R/S) untuk $N = \frac{N}{2}$. Nilai R/S dihitung sesuai dengan langkah pertama untuk dua segmen. Kemudian menghitung nilai rata-rata R/S . Kita akan memulai prosedur untuk interval berturut-turut lebih kecil selama kumpulan data membagi setiap segmen menjadi dua dan menghitung nilai R/S



Gambar 2.8 Proses Analisis R/S Untuk Estimasi Eksponen Hurst

(Sumber: Anjung Fiqri Zakaria, 2016)

untuk setiap segmen. Langkah selanjutnya perhitungan R/S rata-rata.

Perhitungan dapat terlihat pada Gambar di bawah ini.

- II. Nilai Eksponen Hurst diestimasi dengan memplot nilai-nilai $\log(R/S)$ dengan $\log(N)$. Kemiringan garis regresi dari kurva linier ini diaproksimasi sebagai nilai Eksponen Hurst seperti persamaan berikut (Vàcha, 2007):

$$\log\left(\frac{R}{S}\right) = \log((C) + H \log(N)) \quad (12)$$

Dengan:

$c =$ konstanta

H = Eksponen Hurst

Menurut Barbulescu (2007), berdasarkan nilai eksponen Hurst suatu data runtut waktu dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- $H = 0,5$ menunjukkan data bersifat acak.
- $0 < H < 0.5$ menunjukkan data bersifat anti-persistence, artinya nilai data yang

meningkat pada suatu waktu cenderung diikuti penurunan pada waktu berikutnya, dan sebaliknya.

- c. $0.5 < H < 1$ menunjukkan data bersifat persistence, yaitu perubahan nilai data pada suatu waktu cenderung diikuti oleh perubahan serupa pada waktu berikutnya.

Eksponen Hurst dengan dimensi fraktal dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut (Voss, dkk, 1985):

$$D_f = 2 - H \quad (13)$$

Dimana:

D_f = dimensi fraktal

H = nilai eksponen Hurst

Hubungan antara nilai Eksponen Hurst dan dimensi fraktal dirumuskan dengan persamaan Voss et al., 1985. Berdasarkan rumusan, jika dimensi fraktal suatu data runut waktu bernilai 1,5, berarti perubahan nilai data bersifat acak dan tidak dapat diprediksi. Jika D_f berada pada rentang 1 hingga 1,5, maka proses dinamika data dapat diprediksi, dengan mendekati 1, semakin mudah diprediksi. Jika D_f berada pada rentang 1,5 hingga 2, proses perubahan data bersifat anti-persistence, yang berarti penurunan nilai data pada suatu waktu cenderung diikuti peningkatan pada waktu berikutnya, dan sebaliknya (Kae, M., 2010).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain deskriptif yang bertujuan untuk menganalisis koefisien fraktal pada Sub DAS Mata Allo. Pendekatan kuantitatif dipilih karena memungkinkan pengumpulan dan analisis data numerik yang dapat menggambarkan secara objektif kompleksitas geometri dari batas wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) dan jaringan sungai. Desain deskriptif dalam penelitian ini digunakan untuk memberikan gambaran yang jelas dan rinci tentang karakteristik struktural serta tingkat fragmentasi wilayah Sub DAS Mata Allo.

Fokus utama penelitian ini adalah untuk mengukur dan menggambarkan tingkat kerumitan dari sistem DAS, baik itu dalam hal batas wilayah aliran sungai maupun jaringan sungai yang ada. Metode yang digunakan untuk pengukuran ini adalah perhitungan dimensi fraktal, yang dapat mengidentifikasi bagaimana bentuk geometri dan struktur DAS tersebut berhubungan dengan sifat-sifat fraktal, seperti tingkat ketidakaturan dan fragmentasi bentuk. Dengan menggunakan pendekatan ini, dimensi fraktal akan memberikan informasi yang lebih mendalam mengenai tingkat kerumitan dan struktur alam yang ada, yang biasanya tidak terlihat dengan pengamatan kasat mata.

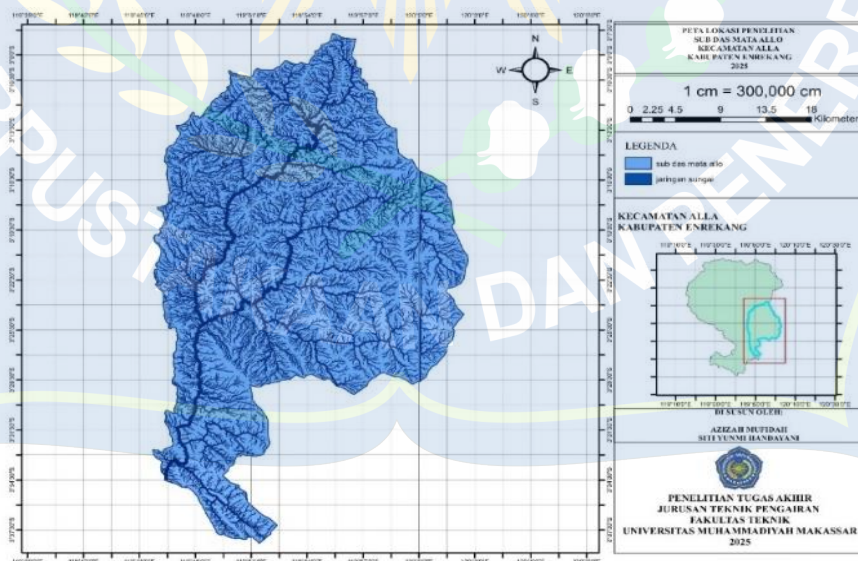
Tujuan dari pengukuran dimensi fraktal ini adalah untuk menggambarkan dan mengukur sejauh mana wilayah tersebut mengalami fragmentasi dan kerumitan dalam aspek topografi. Fragmentasi yang dimaksud

mencakup bagaimana batas DAS terbagi-bagi menjadi sub-bagian yang lebih kecil dan bagaimana struktur sungai terdistribusi dalam area yang lebih luas. Analisis ini memberikan gambaran yang jelas mengenai bagaimana pola aliran sungai dan distribusi ruang di dalam DAS berhubungan dengan potensi risiko yang ada, seperti banjir, erosi, atau bencana alam lainnya yang mungkin terjadi di wilayah tersebut.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Sub Daerah Aliran Sungai (DAS) Mata Allo yang merupakan sub DAS Saddang.

Secara administratif Sub DAS Mata Allo terletak di dua kabupaten yaitu Kabupaten Tana Toraja dan Kabupaten Enrekang Sulawesi Selatan. Lokasi ini dipilih karena memiliki jaringan sungai yang cukup kompleks, yang memungkinkan untuk mengaplikasikan dan mengukur koefisien fraktal. Data mengenai Sub DAS Mata Allo diperoleh melalui peta topografi, citra satelit, dan perangkat GIS (Geographic Information System).



Gambar 3.1 Peta Sub DAS Mata Allo

3.3 Jenis Penelitian dan Sumber Data

Pada penelitian ini jenis penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif, yaitu dengan cara pengukuran objektif dengan mengumpulkan data dan analisis terhadap objek atau data yang telah terkumpul. Penelitian ini menggunakan satu jenis data yaitu data sekunder.

3.3.1 Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini mencakup informasi pendukung yang sangat penting untuk memahami karakteristik fisik dan hidrologi wilayah Sub DAS Mata Allo.

Data sekunder ini diperoleh dari berbagai sumber website resmi di antaranya yaitu :

1. Website ina-geoportal
2. Website Indonesia Geospasial
3. Website Lapak Gis

Beberapa contoh data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini antara lain peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), yang memberikan gambaran mengenai tata guna lahan dan ruang perencanaan di wilayah Sub DAS Mata Allo, serta pola aliran sungai yang menunjukkan arah dan distribusi jaringan sungai di kawasan tersebut.

3.4 Alat Dan Bahan Penelitian

1. Alat

a. Perangkat Lunak ArcMap

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Perangkat Lunak ArcMap, yang merupakan bagian dari ArcGIS, sebuah perangkat lunak berbasis Geographic

Information System (GIS) yang dikembangkan oleh ESRI (Environmental Systems Research Institute). ArcMap digunakan untuk pemetaan, pengolahan, dan analisis data geospasial terkait dengan batas Daerah Aliran Sungai (DAS) dan jaringan sungai di Sub DAS Mata Allo.

Beberapa fitur utama ArcMap yang dimanfaatkan dalam penelitian ini meliputi:

- Digitasi dan Analisis Raster Untuk mengolah citra satelit dan mengekstrak informasi terkait tutupan lahan, sebaran sungai, serta perubahan topografi.
- Georeferensi dan Overlay Data Untuk mengintegrasikan berbagai sumber data, seperti citra satelit dan peta topografi, sehingga menghasilkan peta yang lebih akurat dan komprehensif.
- Analisis Spasial Untuk mengidentifikasi hubungan antara elemen geospasial dalam DAS, termasuk pola distribusi sungai dan perubahan lingkungan.
- Fitur fishnet untuk membuat grid pada metode box counting.
- Fitur intersec untuk memotong garis sesuai dengan pola peta (garis yang tidak menutupi peta)

b. Perangkat Lunak Pengolah Data

Microsoft Excel adalah perangkat lunak pengolah data yang digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis dimensi fraktal dari data yang diperoleh menggunakan metode Box Counting, Horton, dan Eksponen Hurst. Excel menyediakan berbagai fitur analisis data dan visualisasi grafis yang sangat berguna untuk menghitung dan memplot hubungan antara variabel-variabel yang relevan, memungkinkan analisis spasial yang mendalam.

1. Metode Penghitungan Kotak di Microsoft Excel

Dalam metode Box Counting, Microsoft Excel digunakan untuk menghitung jumlah kotak yang diperlukan untuk menutupi objek geospasial pada berbagai ukuran grid, kemudian digunakan untuk menghitung koefisien dimensi fraktal. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan Data Grid: Data grid dihasilkan dari digitalisasi jaringan sungai atau batas DAS. Ukuran grid yang berbeda ditentukan untuk menghitung jumlah kotak (N) yang menutupi objek pada setiap skala ukuran (r).
- b. Menghitung Jumlah Kotak: Setiap ukuran grid (r) dicatat, dan jumlah kotak (N) dihitung menggunakan fitur COUNTIF atau secara manual dengan menghitung sel yang terisi. Data ini dimasukkan ke dalam kolom Excel.
- c. Plotting Log-log: Nilai log dari ukuran grid (r) dan jumlah kotak (N) dihitung dan dimasukkan ke dalam Excel. Grafik scatter plot dibuat untuk menampilkan hubungan $\log(N)$ vs. $\log(r)$.
- d. Menghitung Dimensi Fraktal: Excel digunakan untuk melakukan analisis regresi linier terhadap grafik log-log untuk mendapatkan koefisien kemiringan (slope), yang merupakan nilai dimensi fraktal (D).

2. Metode Horton di Microsoft Excel

Untuk menganalisis jaringan sungai menggunakan Metode Horton, Microsoft Excel dapat digunakan untuk menghitung rasio bifurkasi, rasio panjang, dan rasio area. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- a. Input Data Jaringan Sungai: Data jaringan sungai yang sudah diperoleh dari hasil digitalisasi dimasukkan ke dalam Excel. Setiap cabang sungai diidentifikasi berdasarkan ordo Horton.

b. Menghitung Rasio Bifurkasi (R_b): Rasio bifurkasi dihitung dengan membandingkan jumlah sungai pada ordo tertentu dengan jumlah sungai pada ordo sebelumnya.

c. Menghitung Rasio Panjang (R_l): Rasio panjang dihitung dengan membandingkan panjang total sungai pada setiap ordo dengan panjang pada ordo sebelumnya

d. Analisis Data: Semua hasil dihitung menggunakan rumus sederhana di Excel dan bisa divisualisasikan dalam grafik untuk mempermudah interpretasi.

3. Metode Eksponen Hurst di Microsoft Excel

Untuk menghitung Eksponen Hurst, Microsoft Excel digunakan untuk membuat profil longitudinal sungai atau elevasi DAS, yang kemudian dianalisis menggunakan metode Rescaled Range (R/S Analysis). Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

a. Membuat Profil Longitudinal Sungai: Menggunakan data elevasi yang telah dikumpulkan, membuat grafik profil longitudinal sungai di Excel menggunakan fitur Scatter Plot atau Line Graph.

b. Menghitung Rescaled Range (R/S): Hitung jarak terdistribusi (R) dan deviasi standar (S) untuk interval tertentu. Nilai R/S kemudian dihitung untuk setiap interval data, dan hasilnya dimasukkan ke dalam tabel Excel.

c. Plotting Log-log: Buat grafik log-log untuk memplot nilai $\log(R/S)$ terhadap $\log(n)$, dimana n adalah jumlah titik dalam interval waktu atau ruang.

d. Menentukan Eksponen Hurst: Dengan menggunakan fitur Trendline di Excel, persamaan linier dari grafik log-log yang diperoleh. Kemiringan grafik yang

dihasilkan akan memberikan nilai eksponen Hurst yang menunjukkan tingkat keacakan atau keteraturan data.

2. Bahan

a. Data Geospasial

1. Peta Topografi dan Peta Batas DAS adalah Peta ini menyajikan informasi penting seperti kontur tanah, elevasi, dan kemiringan wilayah. Peta topografi sangat berperan dalam menganalisis karakteristik morfologi wilayah DAS, sedangkan peta batas DAS digunakan untuk mengetahui pembagian wilayah aliran sungai secara spasial. Kedua jenis peta ini menjadi dasar dalam memvisualisasikan serta memahami dinamika aliran udara, struktur jaringan sungai, dan hubungan antar elemen di dalam DAS.
2. Citra satelit dan foto udara, setelah diolah ke dalam sistem informasi geospasial (GIS), digunakan untuk memperoleh gambaran yang lebih detail dan akurat tentang jaringan sungai dan batas DAS. Citra ini menjadi dasar analisis dalam pola aliran, tutupan lahan, serta struktur geometri sungai, yang penting dalam perhitungan dimensi fraktal.

b. Grid Digital

Grid digital merupakan alat bantu penting dalam metode Box Counting. Grid ini diaplikasikan pada citra atau peta untuk menghitung jumlah kotak (grid) yang menutupi objek (seperti batas DAS). Variasi ukuran grid memungkinkan perhitungan dimensi fraktal yang menggambarkan tingkat kerumitan dan fragmentasi dari bentuk geometri DAS.

c. Dokumentasi dan Laporan

Semua proses dan data yang diperoleh akan didokumentasikan secara sistematis, mulai dari pengumpulan, pemrosesan, hingga analisis dan interpretasi data. Laporan hasil penelitian akan menyajikan temuan-temuan penting tentang koefisien fraktal, kompleksitas geometri DAS, serta aplikasinya dalam perencanaan dan pengelolaan wilayah Sub DAS Mata Allo.

3.5 Teknik Analisis Data

Analisis Data Geospasial dan Fraktal yang dimana Data dianalisis menggunakan perangkat lunak GIS seperti ArcGIS dan Microsoft Excel. Prosesnya meliputi pemetaan wilayah DAS, identifikasi batas sungai, dan penghitungan parameter geometri. Teknik utama yang digunakan yaitu:

- a. Metode Box Counting Wilayah dibagi ke dalam grid kotak berukuran bervariasi. Setiap ukuran grid digunakan untuk menutupi objek, dan jumlah kotak yang menutupi dicatat. Hasil ini digunakan untuk menghitung dimensi fraktal dengan memplot hubungan $\log(N)$ terhadap $\log(r)$ di Excel.
- b. Perhitungan Koefisien Fraktal dimana Dimensi fraktal dihitung dari hasil plot log-log, yang menunjukkan kompleksitas bentuk batas DAS. Semakin tinggi nilai dimensi fraktal, semakin kompleks dan tidak teraturanya struktur geometrinya. Nilai ini membantu memahami perilaku aliran udara serta potensi fragmentasi dan kerentanan wilayah DAS terhadap perubahan lingkungan.
- c. Analisis Statistik menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan visualisasi grafik log-log di Microsoft Excel untuk menganalisis hasil perhitungan dimensi fraktal. Grafik ini memberikan wawasan tentang konsistensi pola bentuk DAS pada

berbagai skala. Nilai dimensi fraktal yang tinggi menunjukkan tingkat keteraturan rendah dan kemungkinan risiko tinggi seperti banjir atau erosi.

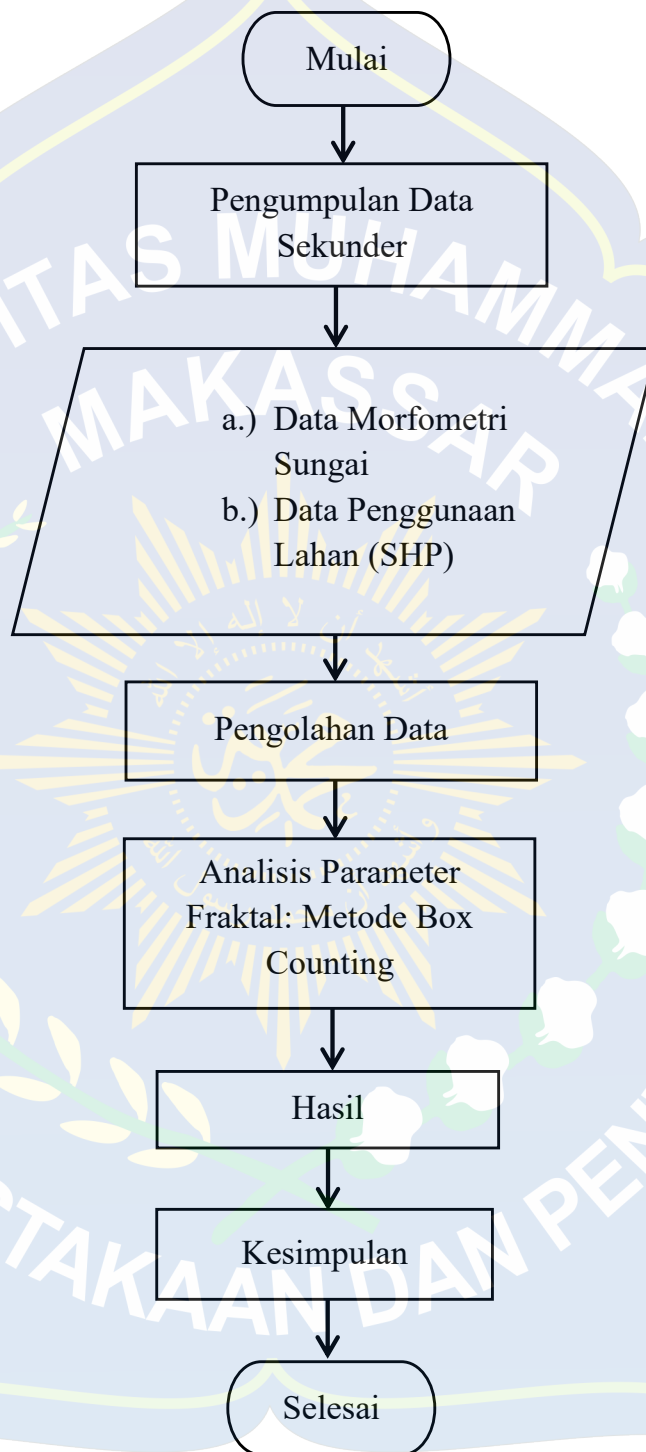
3.5.1 Analisis Statistik

Dalam penelitian ini, untuk menganalisis koefisien fraktal dan mengukur kompleksitas struktur Daerah Aliran Sungai (DAS), data yang diperoleh dari perhitungan dimensi fraktal akan dianalisis secara mendalam menggunakan teknik analisis statistik deskriptif. Salah satu pendekatan yang akan diterapkan adalah analisis grafik log-log, yang bertujuan untuk menggambarkan hubungan matematis antara jumlah kotak yang digunakan untuk menutupi objek (dalam hal ini, batas DAS dan jaringan sungai) dengan ukuran kotak pada metode Box Counting. Proses ini meliputi pengolahan data yang menunjukkan bagaimana perubahan ukuran kotak mempengaruhi jumlah kotak yang diperlukan untuk menutupi keseluruhan area objek yang dianalisis.

Melalui grafik log-log tersebut, peneliti dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai tingkat kompleksitas dan fragmentasi dari batas wilayah DAS serta struktur jaringan sungainya. Grafik ini memungkinkan untuk memvisualisasikan bagaimana objek fraktal, seperti DAS, menunjukkan pola yang konsisten atau tidak teratur pada berbagai skala, serta seberapa banyak detail yang dapat diamati pada setiap Skala yang digunakan dalam analisis. Hasilnya, analisis ini akan memberikan gambaran yang lebih jelas tentang bagaimana batas DAS terbentuk, seberapa terfragmentasi bentuknya, dan bagaimana jaringan sungainya saling terhubung.

Lebih lanjut, analisis statistik deskriptif ini juga memberikan informasi yang

sangat berguna untuk memahami karakteristik topografi dan hidrologi wilayah tersebut. Misalnya, semakin tinggi nilai dimensi fraktal yang diperoleh, semakin kompleks dan terfragmentasi struktur geometri DAS yang teramati, yang dapat mengindikasikan potensi risiko seperti erosi atau banjir. Dengan demikian, analisis statistik ini tidak hanya memberikan informasi tentang aspek geometri wilayah, tetapi juga memiliki aplikasi praktis dalam perencanaan pengelolaan sumber daya alam dan mitigasi bencana alam.



Gambar 3, 1 Bagan alir Penelitian

BAB IV

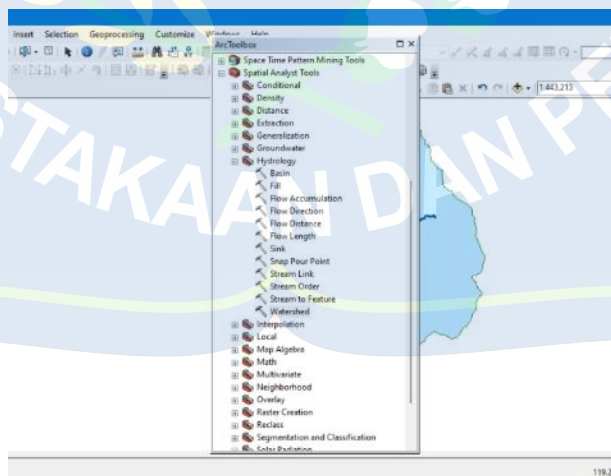
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Jaringan Sungai dan Batas DAS

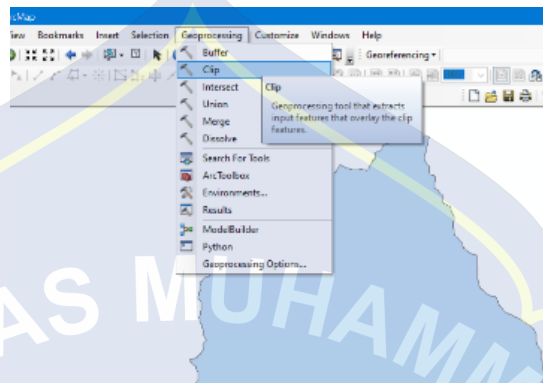
Dalam penelitian ini, pemodelan dilakukan dengan memanfaatkan data shapefile (shp) yang diperoleh dari sumber-sumber geospasial yang terpercaya. Data ini mencakup informasi mengenai jaringan sungai, batas DAS, serta elemen-elemen lain yang relevan dalam konteks hidrologi dan geomorfologi.

Pengolahan dan analisis ini dilakukan menggunakan perangkat lunak sistem informasi geografis (GIS) dalam hal ini ArcGIS untuk menetapkan batas DAS dan sub DAS, serta jaringan sungai. Proses ini melibatkan beberapa tahapan, mulai dari pengunduhan data shp, pemrosesan data, hingga pembuatan peta yang menggambarkan jaringan sungai dan batas DAS.

Untuk menentukan batas-batas DAS dan sub DAS serta jaringan sungai dilakukan menggunakan fitur *clip* untuk batas DAS dan fitur *ArchToolbox* pada *Spasial Analyst Tool* → *Hydrology* untuk jaringan sungai.



Gambar 4.1 Tools penentuan jaringan Sungai



Gambar 4. 2Tools penentuan batas DAS

Berdasarkan hasil pengolahan data ini maka di dapatkan file shp baru untuk peta sub DAS Mata Allo yang di jadikan sebagai bahan penelitain seperti pada gambar berikut Peta yang dihasilkan dari pemodelan ini tidak hanya memberikan

Peta yang dihasilkan dari pemodelan ini tidak hanya memberikan gambaran gambaran visual mengenai konfigurasi fisik dari jaringan sungai dan batas DAS,



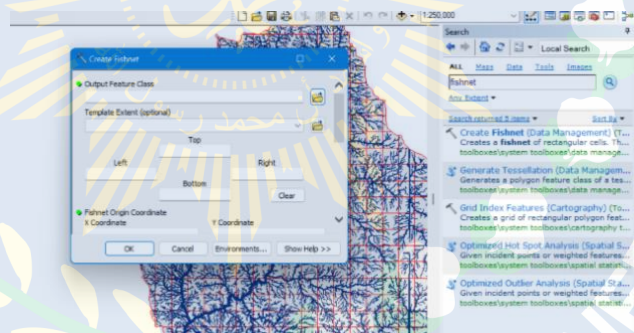
Gambar 4.3 Peta Sub DAS Mata Allo

tetapi juga menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut mengenai koefisien fractal yang dapat menggambarkan kompleksitas dan ketidakaturan bentuk jaringan Sungai.

4.2 Perhitungan kotak (Metode Box Counting)

Salah satu metode yang sering digunakan untuk menentukan dimensi suatu himpunan adalah teknik box counting, yang didasarkan pada definisi dimensi yang dikembangkan oleh Kolmogorov (Mandelbrot, 1982). Prinsip dasar dari metode ini adalah menempatkan grid berbentuk kotak dengan ukuran tertentu di atas objek yang sedang dianalisis.

Pada penghitungan dimensi fraktal ini terlebih dahulu diambil citra objek yang akan ditentukan dimensinya. Gambar 4.3 adalah gambaran objek yang akan diberikan bagian kotak (persegi) dengan berbagai kotak yang berbeda-beda ukuran.



Gambar 4.2 Pembagian kotak menggunakan fitur fishnet pada ArcGis untuk metode box counting

Setelah proses pengambilan objek selesai, kemudian dilakukan penghitungan nilai dimensi fraktal menggunakan metode Box Counting, dengan pembagian citra objek menjadi kotak-kotak kecil ditentukan dengan ukuran 8, 16, 32, 64, 128 yang dilambangkan dengan r , ukuran kelipatan yang beraturan tersebut diambil agar didapatkan hasil yang linear. Karena jika terlalu banyak skala dapat menghasilkan noise, sedangkan terlalu sedikit skala dapat mengurangi

keakuratan estimasi. Selain itu, memberikan kemudahan dalam pembagian matriks citra digital dan menghindari kesalahan pembulatan (Peitgen, H.-O., Jürgens, H., & Saupe, D 2004).

Setelah itu dihitung berapa jumlah kotak terisi berdasarkan ukuran kotak-kotak yang masing-masing dilambangkan dengan N . Dari nilai N tersebut kemudian digunakan untuk analisis regresi linier log-log untuk memperoleh nilai kemiringan yang merepresentasikan dimensi fraktal objek.



Gambar 4.3 box counting ukuran 1/8



Gambar 4.4 box counting ukuran 1/16



Gambar 4.5 box counting ukuran 1/32



Gambar 4.6 box counting ukuran 1/64



Gambar 4.7 box counting ukuran 1/128

Berdasarkan ke lima gambar DAS di atas yang dipetakan ke dalam grid dapat di jelaskan bahwa ukuran kotak dikurangi secara bertahap, dan jumlah kotak yang menutupi sungai. ukuran kotak **8×8, 16×16, 32×32, 64×64, dan 128×128** dipilih karena mengikuti prinsip pembagian bertingkat (*pangkat dua*) yang menghasilkan pembagian citra lebih konsisten dan regresi log–log yang stabil.

Ukuran acak seperti 3×4 tidak digunakan karena berpotensi menghasilkan nilai yang tidak linear, menyulitkan konsistensi skala, serta mengurangi akurasi perhitungan dimensi fraktal (Falconer, 2003; Mandelbrot, 1983).

Tabel 4. 1 Hasil perhitungan Box Counting

ukuran kotak (m) r	jumlah kotak N (r)	LOG (1/r)	LOG N
$\frac{1}{8}$	6697	-0.90309	3.8258803
$\frac{1}{16}$	1741	-1.20412	3.24079877
$\frac{1}{32}$	462	-1.50515	2.66464198
$\frac{1}{64}$	126	-1.80618	2.10037055
$\frac{1}{128}$	35	-2.10721	1.54406804
jumlah	9016	-7.52575	13.3757596

Hubungan antara ukuran kotak (r) dan jumlah kotak (N) selanjutnya dituangkan dalam bentuk grafik setelah nilainya dikonversi kedalam logaritma, memberikan hubungan linier dengan koefisien determinasi.



Grafik 4.1 hubungan antara ukuran kotak (r) dan jumlah kotak (N)

4.3 Rasio Percabangan (Rb) dan Rasio Panjang (RL) Sub DAS Mata Allo

Rasio Percabangan (Rb) adalah jumlah alur sungai untuk setiap orde (Nu) yang di bagi dengan alur sungai dari orde yang lebih tinggi berikutnya (Nu+1). Nilai Rb yang tinggi mengindikasikan bahwa daerah tersebut memiliki pelapisan batuan dengan lereng yang terjal dan jarak antara lembah yppang sempit dibatasi oleh dinding yang terjal pula (Strahler, 1964) atau dalam artian kontrol geologi dominan. Sebaliknya nilai Rb yang rendah mengindikasikan kontrol geologi yang tidak dominan.

Jumlah alur sungai suatu orde dapat ditentukan dari angka indeks percabangan sungai (bifurcation ratio), dengan persamaan berikut:

$$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1}$$

Dimana:

Rb = Rasio Percabangan

Nu = Jumlah total segmen aliran orde ke- U

Nu + 1 = Jumlah segmen dari urutan yang lebih tinggi

Tabel 4. 2 Klasifikasi indeks percabangan sungai

Indeks Tingkat Percabangan Sungai	Uraian
Rb < 3	alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat, sedangkan penurunannya berjalan lambat
Rb 3 - 5	alur sungai mempunyai kenaikan dan penurunan muka air banjir tidak terlalu cepat atau tidak terlalu lambat
Rb > 5	alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat, demikian pula penurunannya akan berjalan dengan cepat

Sumber : (Rahayu dkk, 2009 dalam Talakua S.M., 2009)

Data yang di dapatkan dari Sub Das Mata Allo memiliki rasio berkisar antara 1 – 2.23. Berdasarkan klasifikasi indeks rasio pembulatan pada Sub Das Mata Allo orde 1-3 (nilai Rb orde-1 1.69, orde -2 1.89, orde-3 1.89) termasuk dalam kategori Rb <3, yaitu alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat tetapi penurunannya berjalan lambat.

Rasio pembulatan pada Sub Das Mata Allo orde 4 - 5 (nilai Rb orde-4 2.09, orde-5 2.04) termasuk dalam kategori Rb <3, yaitu alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat tetapi penurunannya berjalan lambat.

Rasio pembulatan pada Sub Das Mata Allo orde 6 (nilai Rb 0.99) termasuk dalam kategori Rb <3, yaitu alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat tetapi penurunannya berjalan lambat.

Rasio pembulatan pada Sub Das Mata Allo orde 7 (nilai Rb orde-7 2.23) termasuk dalam kategori Rb <3, yaitu alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat tetapi penurunannya berjalan lambat.

Tabel 4.3 Hasil Nilai Rasio Percabangan (Rb) Sub DAS Mata Allo

orde	jumlah orde	Rb
1	164925	1.69139968
2	97508	1.890202768
3	51586	1.899686982
4	27155	2.090132389
5	12992	2.74730387
6	4729	0.99788985
7	4739	2.232218559
8	2123	-
jumlah =		11.316
rata-rata =		1.886

Rasio panjang sungai menurut Horton (1945), dalam (Asfar dkk., 2019) adalah nilai perolehan dari hasil pembagian antara panjang total suatu orde sungai dengan panjang total suatu orde sungai yang lebih rendah di bawahnya. Vinutha dan Janardhana (2014, dalam (Sukristiyanti dkk., 2017) menyebutkan adanya kecenderungan kenaikan nilai rasio panjang sungai dari orde sungai rendah ke

tinggi mengindikasikan adanya tahap geomorfik lanjut pada DAS terkait. Rasio panjang sungai dapat dihitung menggunakan berikut:

$$RL = \frac{Lu}{Lu - 1}$$

Dimana:

Rb = Rasio Panjang sungai

Lu = Jumlah total panjang sungai orde ke- U (Km)

Lu - 1 = Jumlah total panjang sungai orde ke- U -1 (Km)

Tabel 4.4 Hasil Nilai Rasio Panjang (RL) Sub DAS Mata Allo

orde	panjang aliran	Rl
1	2577.18	
2	1341.33	0.520466355
3	659.29	0.491522631
4	340.90	0.517071972
5	154.04	0.451880881
6	61.19	0.397259296
7	59.19	0.967335
8	24.10	0.407209703
jumlah =		3.7527745838
rata-rata =		0.557589356

Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 diatas maka di peroleh nilai koefisien fraktal untuk Metode Horton's Coefficient yaitu 1,83.

4.4 Fraktal Hurst Eksponen

Nilai Ekponen Hurst dihitung dengan cara melihat tingkat kebergantungan nilai rasio perbandingan panjang jangkauan suatu data (R) terhadap nilai standar deviasi data pada rentang tersebut (S) yang dievaluasi untuk masing-masing nilai

rentang (n). Kemiringan garis regresi dari kurva linear ini diaproksimasi sebagai nilai H sehingga nilai ini akan berada pada rentang antara 0 dan 1.

Kale dan Butar (2011) mengatakan bahwa analisis R/S yang digunakan pada data runtun waktu untuk mengestimasi nilai Eksponen Hurst. Jika data runtun waktu berdistribusi normal maka nilai estimasi Eksponen Hurst juga berdistribusi normal. Prosedur estimasi melibatkan tiga langkah dasar yaitu :

Berdasarkan tabel hasil penelitian yang didapatkan dari metode box counting maka dapat dilakukan perhitungan eksponen hurst berikut :

Menghitung total kumulatif pada setiap titik waktu (Kale and Butar, 2011)

$$\Gamma_{N,k} = \sum_{i=1}^k (F_i - \mu_N), \text{ untuk } 0 < k \leq$$

F_i = nilai runtun waktu pada waktu ke-i

μ_N = rata-rata data

N = jumlah data

Selisih antara maksimum kumulatif dan minimum kumulatif, dinotasikan dengan R, (Kale and Butar, 2011)

Diketahui :

$f_i = 66797, 1741, 462, 126, 35.$

$\mu_N = 1812.2$

Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan analisis $\Gamma_{N,K}$

k	f_i	$(f_i - \mu_N)$	$\Gamma_{N,K}$	$(f_i - \mu_N)^2$
8	6697	4885	4885	23861271
16	1741	-71	4814	5069.44

k	f_i	$(f_i - \mu_N)$	$\Gamma_{N,K}$	$f_i - \mu_N)^2$
32	462	-1350	3463.4	1823040
64	126	-1686	1777.2	2843270
128	35	-1777	0	31691091
Rata- rata				7922772

Dari tabel di atas maka di peroleh :

$$R = \max(\Gamma_{N,K}) - \min(\Gamma_{N,K})$$

$$R = 4885 - 0 = 4885$$

$$S = \sqrt{\frac{f_i - \mu_N)^2}{N - 1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{7922772}{5 - 1}} = 1407.371$$

$$\frac{R}{S} = \frac{4885}{1407.371} = 3.470$$

$$H = \frac{\log(3.470)}{\log(5)} = 0.773$$

Dimana:

R : panjang jangkauan data

S : standar deviasi

N : panjang rentan data

H : Nilai eksponen hurst

Hubungan antara nilai eksponen Hurst dengan dimensi fraktal dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut (Voss, dkk, 1985):

$$D = 2 - H$$

Berdasarkan rumus di atas maka di dapatkan nilai Df (Dimensi Fraktal) berikut:

$$Df = 2 - 0.773 = 1.22$$

4.5 Pembahasan hasil Perhitungan

1. Box Counting

Berdasarkan hasil analisa kotak dalam berbagai ukuran (8, 16, 32, 64, 128) yang ditimpahkan di atas peta Sub DAS Mata Allo maka diperoleh nilai koefisien fraktal 1,89 dapat dilihat pada grafik hubungan antara ukuran kotak (r) dan jumlah kotak (N) nilai tersebut termasuk dalam kategori irregular shape karena berada pada rentang 1.6 – 2 seperti pada Tabel 2.2 kategori tersebut memiliki karakteristik pola aliran sungai yang sangat tidak teratur atau sangat kompleks.

Dimensi fraktal jaringan sungai pada Sub DAS Mata Allo memperlihatkan kemiripan dengan hasil studi yang dilakukan oleh Rodrigues dan Iturbe 1977 (I Gede Tunas 2017) yang menyatakan bahwa dimensi fraktal jaringan sungai berada pada kisaran 1-2. Hal ini menguatkan dan memverifikasi hasil studi tentang dimensi fraktal sungai utama adalah berada di antara nilai-nilai tersebut. Adapun angka di belakang koma, berkaitan dengan faktor bifurkasi (percabangan sungai). Semakin besar angka belakang koma, maka bentuk percabangan akan semakin rumit (kompleks) dan sebaliknya (Chow, 1964).

2. Horton's Coefficient Ratio

Faktor bentuk DAS dapat juga diinterpretasi dari dimensi fraktal berdasarkan hubungan Rasio Panjang Sungai (R_l) dan rasio percabangan Sungai (R_b). Dimensi fraktal bentuk DAS berada pada batasan 1 – 2. Bila dimensi

fraktal mendekati 2 maka bentuk DAS semakin tidak teratur (irregular shape) dan sebaliknya DAS memiliki bentuk teratur bila dimensi fraktal mendekati 1.

Hasil analisis terhadap Sub DAS Mata Allo menggunakan persamaan tersebut diperoleh dimensi fraktal seperti pada Tabel 4.3 yaitu 1,83 Hal ini menunjukkan bahwa dimensi fraktal bentuk DAS tidak teratur (irregular shape).

3. Hurst Exponen

Berdasarkan hasil perhitungan nilai Hurst Exponen 1,22 maka dapat diartikan bahwa proses perubahan nilai dimensi fraktal suatu data runut waktu berada pada rentang 1 - 1,5 maka proses dinamika perubahan datanya menjadi mungkin untuk diramalkan. Semakin dekat nilai dimensi fraktal ini ke nilai 1 maka semakin mungkin untuk diramalkan. Nilai dimensi fraktal pada rentang ini menunjukkan bahwa data runut waktu tersebut bersifat *persistence*, artinya arah perubahan nilai data pada waktu tertentu akan cenderung diikuti oleh data berikutnya. Jika dimensi fraktal berada pada rentang antara 1.5 dan 2 maka dapat disimpulkan bahwa proses pergerakan nilai data bersifat *anti-persistence*, artinya penurunan nilai data pada waktu tertentu akan cenderung diikuti peningkatan nilai pada waktu berikutnya dan sebaliknya (Zakaria, A. F, 2016).

Analisis karakteristik fraktal pada Sub DAS Mata Allo menunjukkan bahwa dimensi fraktal jaringan sungai yang hitung menggunakan Metode Horton's Coefficient Ratio dan Box Counting Dimension, Metode Horton's Coefficient Ratio dan Hurst Exponen memberikan hasil yang hampir sama dengan rentang antara 1- 2. Tidak (belum) ditemukan referensi yang menunjukkan bahwa salah satu dari 3 metode tersebut memiliki akurasi yang lebih baik dari metode yang

lain. Namun demikian, ketiga metode tersebut telah digunakan secara luas oleh para peneliti untuk menganalisis karakteristik fraktal DAS seperti yang dilakukan oleh Tarboton et al. (dalam Rodriguez et al., 1997), Balkhanov et al. (2004), Khanbabaie et al. (2013), yang memperoleh dimensi fraktal jaringan sungai umumnya berkisar antara 1- 2. Hasil penelitian ini juga memverifikasi hasil penelitian sebelumnya bahwa jaringan hidrologi sungai memiliki karakteristik (dimensi) fraktal yang stabil pada berbagai dimensi ruang dan waktu (Irianto, 2003) khususnya pada DAS-DAS di Indonesia (Tunas, I. G. (2017).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka di dapatkan beberapa point kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisa koefisien fraktal pada Sub DAS Mata Allo dengan metode box counting diperoleh nilai 1.89, metode Horton's Coefficient Rasio 1.83, dan metode Hurst Eksponen 1.22.
2. Berdasarkan hasil di atas maka karakteristik pola aliran Sub DAS Mata Allo termasuk kategori rumit dan kompleks.

5.2 Saran

Pada penelitian ini membahas tentang dimensi fraktal Sub DAS Mata Allo dengan menggunakan metode box-counting, horton's coefficient rasio, dan hurst eskponen. Untuk penelitian selanjutnya disarankan menggunakan perhitungan metode lain karena masih terdapat banyak error yang terjadi, kerana adanya ketidak telitian menghitung jumlah kotak metode box counting agar dapat perhitungan secara tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, A., Bertarina, B., & Kastamto, K. (2022). Analisis Karakteristik Aliran Sungai Pada Sungai Cimadur, Provinsi Banten Dengan Menggunakan Hec-Ras. *JICE (Journal Infrastructural Civ. Eng.)*, 3, 31.
- Amiruddin, A., Asta, A., & Handayani, R. (2021). Penentuan Batas DAS Tojo Berbasis GIS Menggunakan Perangkat HEC HMS 4.4 dan QGIS 3.16. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 5, 273–282.
- Arnest, S. W., Marani, V., & Aywa, S. (2024). Nonstandard Analysis of the Koch Snowflake Fractal Curve: Insights into Self-Similarity and Scaling Properties, 8, 155–161.
- Bărbulescu, A., Serban, C., & Maftai, C. (2010). Evaluation of Hurst exponent for precipitation time series. *International Conference on Computing – Proceedings*, 1, 590–595.
- Baur, S., Lenz, A., & Nowak, D. (2005). *Fraktale: Theorie und Visualisierung*.
- Cecep, R. (2020). Daerah Aliran Sungai. *Jurnal Bumi*.
- Enrekang, R. K. (2021). *RKPD-Pokok-2021-Kabupaten Enrekang*.
- Falconer, K. (2003). *Fractal geometry: Mathematical foundations and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Febriani, N., & Ahyuni, A. (2023). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 2010–2020 Terhadap Debit Banjir di Daerah Aliran Sungai (DAS) Sikilang Kabupaten Pasaman Barat. *El-Jughrafiyah*, 3, 46.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)

Kale, M. (2010). Fractal Analysis of Time Series and Distribution Properties of Hurst Exponent. *Journal of Mathematical Sciences and Mathematics Education*, 5, 8–19.

Kamus Weber, Sugiharto, D. I. D., & Sungai, A. (2001). *Monitoring Air Akuarium*.

Keram, A., et al. (2021). Tree mortality and regeneration of Euphrates poplar riparian forests along the Tarim River, Northwest China. *Forest Ecosystems*, 8.

Krisnayanti, D. S., Ananda, Y., Bunganaen, W., & Klau, R. R. (2024). Identifikasi Sub DAS Rawan Banjir dengan Metode Cendana (Studi Kasus: DAS Aesesa pada Wilayah Sungai Flores). *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 29, 213–222.

Lei, X., & Kusunose, K. (1999). Fractal structure and characteristic scale in the distributions of earthquake epicentres, active faults and rivers in Japan. *Geophysical Journal International*, 139(3), 754–762. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00977.x>

Lim, M., Kartiwa, A., & Napitupulu, H. (2023). Estimation of Citarum Watershed Boundary's Length Based on Fractal's Power Law by the Modified Box-Counting Dimension Algorithm. *Mathematics*, 11(2), 384. <https://doi.org/10.3390/math11020384>

- Mandelbrot, B. B. (1983). *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman.
- Mangka, A., & Husma, A. (2023). Pola Penggunaan Lahan di Sub DAS Mata Allo Hulu DAS Saddang, Kab. Enrekang dalam Rangka Mempertahankan Bahan Organik Tanah. *Agrotek Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian*, 7, 124–132.
- Mauliddiyah, N. L. (2021). Simulasi Komputasi Pola Aliran Pada Pertemuan Sungai Mata Allo dan Sungai Saddang. *Prosiding Seminar Nasional*, 6.
- Martinez, F., Manriquez, H., Ojeda, A., & Olea, G. (2022). Organization Patterns of Complex River Networks in Chile: A Fractal Morphology. *Mathematics*, 10, 1–23.
- Martinez, F., Ojeda, A., & Manríquez, H. (2022). Application of Fractal Theory to Describe the Morphological Complexity of Large Stream Networks in Chile. *Water Resources*, 49, 301–310.
- Meng, X., Zhang, P., Li, J., Ma, C., & Liu, D. (2020). The linkage between box-counting and geomorphic fractal dimensions in the fractal structure of river networks: The junction angle. *Hydrology Research*, 51, 1397–1408.
- Nurfaika. (2015). Analisis Karakteristik Morfometri Daerah Aliran Sungai Melalui Pemanfaatan Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografi (Studi Kasus di DAS Limboto Provinsi Gorontalo). *Seminar Nasional PIT IGI XVIII*, 1–34.
- Palma, D. I., & Nadiasari, E. (2022). Tinjauan Filsafat Matematika Geometri Fraktal dan Implikasinya dalam Pembelajaran Matematika. *Prisma*:

Prosiding Seminar Nasional Matematika, 5, 14–20.

Permana, D. E. (2010). Analisa Fraktal. *Skripsi, FTUI*.

Perkasa, W. B. A., Halik, G., & Wiyono, R. U. A. (2022). Evaluasi Kinerja Sub DAS Asem Kabupaten Lumajang. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 5, 140.

Priambodo, A., Nur, A. A., Sandri, D., Ahmada, N. H., & Septiandiani, F. (2023). Pelatihan Penggunaan Software ArcGIS dan Avenza Maps dalam Pengelolaan Data Spasial dan Peta Digital bagi Perangkat Desa di Kabupaten Purbalingga. *Abdimas Galuh*, 5(1), 497.
<https://doi.org/10.25157/ag.v5i1.9824>

Raja Shekar, P., & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. *Watershed Ecology and Environment*, 6, 13–25.

Ratri, A. A., Purnomo, K. D., & Riwansia, R. R. (2014). Aplikasi Dimensi Fraktal pada Bidang Biosains. *Prosiding Seminar Nasional*, 299–307.

Rendra, P. P. R., Sukiyah, E., & Sulaksana, N. (2020). Karakteristik Morfometri DAS Cipeles Menggunakan Pendekatan Sistem Informasi Geografis. *Bulletin of Scientific Contributions Geology*, 18, 81–98.

Rian. (2012). Daerah Aliran Sungai. *Jurnal Analisis*, 32.

Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (1997). *Chance and Self-Organization*. Cambridge University Press.

Rosso, R., & Bacchi, B. (1991). Fractal Relation of Mainstream Length to

- Catchment Area in River Networks. *Water Resources Research*, 27(3), 381–387.
- Rusdin, A. (2016). *Jurnal Geografi. Jurnal Geografi*, 14, 47–48.
- Satria, Sampurno, J., & Putra, Y. S. (2013). Analisis Fraktal Frekuensi Kegempaan di Daerah Pantai Barat Sumatera. *Prisma Fisika*, 1, 128–131.
- Science, C., & Environment, F. (1997). Fractal analysis of flow of the river Warta. *Flow Science Journal*, 200, 280–294.
- Sekawati, L. (2012). Teknik Penggambaran Bentuk dan Citra Alamiah Berbasis Dimensi Fraktal, 54.
- Siagian, H. J. S. T., Haluk, H., Mayzarah, E. M., & Tandirerung, R. (2023). Hubungan Antara Analisis Pola Aliran Air dengan Struktur Geologi: Studi Pada Kampung Klaka dan Sekitarnya, Distrik Maudus, Kabupaten Sorong, Provinsi Papua Barat. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 6, 38–42.
- Siregar, T. N., & Juniati, D. (2023). Implementasi Dimensi Fraktal Box Counting dan K-Means dalam Klasifikasi Jenis Penyakit Mata Berdasarkan Citra Fundus Retina. *Jurnal Riset dan Aplikasi Matematika*, 7, 206–223.
- SO Putri. (2019). Kajian Pustaka DAS. *Daerah Aliran Sungai (DAS)*.
- Sukristiyanti, S. (2018). Analisis Morfometri DAS di Daerah Rentan Gerakan Tanah. *Seminar Nasional Geomatika*, 2, 307.
- Sunardi, & Yudianto, E. (2015). Perhitungan Dimensi Fraktal Boxpori Sebagai Inovasi Resapan.

Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1988). The fractal nature of river networks. *Water Resources Research*, 24(8), 1317–1322.

Torsekar, V., Kasparis, T., Jones, W. L., Ahmad, K., & Long, D. G. (2005). Oceanic rain identification using multi-fractal analysis of QuikSCAT sigma-0. *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2005*, 2656–2663.

Tunas, I. G., Anwar, N., & Lasminto, U. (2016). Fractal Characteristic Analysis of Watershed as Variable of Synthetic, 706–718.
<https://doi.org/10.2174/1874149501610010706>

Uca, Lamada, M. S., Mandra, M. A., & Jassin, A. M. I. Z. (2022). Morfometri, Perubahan Penggunaan Lahan, Zonasi & Pemodelan Banjir. *Daerah Aliran Sungai (DAS) Saddang & Mata Allo Kabupaten Enrekang, Sulawesi Selatan*.

Uca, Lamada, M., Nyompa, S., & Haris, N. A. (2022). Morphometry and Topographic Wetness Index Analysis for flood inundation mapping in Mata Allo watershed (South Sulawesi, Indonesia). *Forum Geografi*, 21, 133–145.

Uca, M. S., et al. (2021). Karakteristik Morfometri Sub DAS Saddang dan Mata Allo Provinsi Sulawesi Selatan. *Indonesian Journal of Fundamental Science*, 7, 52–66.

Wahyuningsih, S., & Hernadi, J. (2020). Sistem Fungsi Iterasi dan Dimensi Fraktal Pada Himpunan Serupa Diri. *Euclid*, 7, 108.

Wang, J., Qin, Z., Shi, Y., & Yao, J. (2021). Multifractal Analysis of River Networks under the Background of Urbanization in the Yellow River Basin,

China.

Wirayuda, M. H. (2022). Analisis Karakteristik Sub DAS Ci Jolang Terkait Muka Air Banjir Berdasarkan Parameter Morfometri Berbasis Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Sumberdaya Bumi Berkelanjutan*, 1, 401–407.

Zakaria, A. F. (2016). Penerapan Metode Eksponen Hurst dan Box Counting pada Kasus Curah Hujan.

Zhang, A., Swanson, F., Tullos, D., & Jones, J. (2017). An Analysis of Applying Fractal Dimension to Stream Networks.

Zhou, M., Tian, F., & Hu, H. (2008). Uncertainty of the box-counting method for estimating the fractal dimension of river networks. *IAHS-AISH Publication*, 137–143.



**MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
UPT PERPUSTAKAAN DAN PENERBITAN**

Alamat kantor: Jl. Sultan Alauddin No. 259 Makassar 90221 Tlp. (0411) 866972, 881593, Fax. (0411) 865588

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

SURAT KETERANGAN BEBAS PLAGIAT

UPT Perpustakaan dan Penerbitan Universitas Muhammadiyah Makassar,
Menerangkan bahwa mahasiswa yang tersebut namanya di bawah ini:

Nama : Azizah/Siti Yunmi
Nim : 10581110682/105811107021
Program Studi : Teknik Sipil Pengairan
Dengan nilai:

No	Bab	Nilai	Ambang Batas
1	Bab 1	6 %	10 %
2	Bab 2	20 %	25 %
3	Bab 3	9 %	15 %
4	Bab 4	9 %	10 %
5	Bab 5	0 %	5 %

Dinyatakan telah lulus cek plagiat yang diadakan oleh UPT- Perpustakaan dan Penerbitan Universitas Muhammadiyah Makassar Menggunakan Aplikasi Turnitin.

Demikian surat keterangan ini diberikan kepada yang bersangkutan untuk dipergunakan
seperlunya.

Makassar, 3 Juni 2025
Mengetahui

Kepala UPT- Perpustakaan dan Penerbitan,



Jl. Sultan Alauddin no 259 makassar 90222
Telepon (0411)866972,881 593,fax (0411)865 588
Website: www.library.unismuh.ac.id
E-mail : perpustakaan@unismuh.ac.id