

## ANALISIS DEBIT ANDALAN DAN KEBIJAKAN PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI BENGKULU UNTUK KETERSEDIAAN AIR BAKU DI KOTA BENGKULU

*(Analysis of Dependable Discharge and Management Policy of Bengkulu Watershed for Raw Water Availability in Bengkulu City)*

Idham Khalik<sup>1,\*</sup>, Asep Sapei<sup>2</sup>, Sigid Hariyadi<sup>3</sup>, Elisa Anggraeni<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dosen pada Program Studi Kesehatan Masyarakat, STIKES Tri Mandiri Sakti, Jalan Hibrida Raya, Bengkulu, Indonesia, Email: [khalik.tms@gmail.com](mailto:khalik.tms@gmail.com)

<sup>2</sup>Profesor pada Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Darmaga, Bogor, Indonesia

<sup>3</sup>Dosen pada Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Ilmu Perikanan dan Kelautan, IPB University, Darmaga, Bogor, Indonesia

<sup>4</sup>Dosen pada Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Darmaga, Bogor, Indonesia

\*Email: [khalik.tms@gmail.com](mailto:khalik.tms@gmail.com)

Diterima: 24 Juni 2025, Direvisi : 29 Juli 2025, Disetujui : 19 September 2025

### ABSTRACT

*Watersheds must be managed as a unified area from upstream to downstream, by considering various geophysical and socio-economic aspects. Changes in watershed morphology are one of the important factors that can affect the hydrological system and affect the water availability of a region. The study aimed to analyse the dependable discharge of the Bengkulu River and develop policies for sustainable management of the Bengkulu Watershed. The methods used to analyze the reliable discharge are the Weibull distribution flow duration curve (with 90% probability) and Interpretive Structural Modelling (ISM). Results showed that, from 1990 to 2020, land use in the Bengkulu Watershed changed in the form of a 34,58 km<sup>2</sup> (7,30%) decrease in Secondary Dryland Forest area, and a 10,54 km<sup>2</sup> (2,22%) increase in mining area. The dependable discharge of Bengkulu River (with 90% probability) is 10.93 m<sup>3</sup>/s or approximately 344.69 million m<sup>3</sup>. Furthermore, the Bengkulu River's flow regime coefficient fluctuates considerably and has shows an increasing trend in recent years. This indicates that the watershed is experiencing degradation due to changes in land cover and global climate changes. Some policy recommendations that need to be implemented include integrating spatial planning and watershed management plans across local governments and to guide natural resource management, reforestating or planting trees to maintain vegetated areas, and planting forests and crops through agroforestry.*

**Keywords:** *dependable discharge; hydrology; Interpretive Structural Modelling/ISM; flow regime coefficient; land use*

## ABSTRAK

Daerah Aliran Sungai (DAS) harus dikelola sebagai satu kesatuan wilayah dari hulu ke hilir dengan mempertimbangkan berbagai aspek geofisik dan sosial ekonomi. Perubahan morfologi DAS merupakan salah satu faktor penting yang dapat memengaruhi sistem hidrologi dan dapat berpengaruh terhadap ketersediaan air suatu wilayah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis debit andalan Sungai Bengkulu dan menyusun kebijakan pengelolaan DAS Bengkulu secara berkelanjutan. Metode yang digunakan untuk analisis debit andalan adalah kurva durasi aliran distribusi Weibull (probabilitas 90%) dan pemodelan struktural interpretatif (ISM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari tahun 1990 hingga 2020, telah terjadi perubahan penggunaan lahan DAS Bengkulu berupa penurunan luas Hutan Lahan Kering Sekunder sebesar 34,58 km<sup>2</sup> (7,30%) dan peningkatan luas areal pertambangan sekitar 10,54 km<sup>2</sup> (2,22%). Debit andalan Sungai Bengkulu (probabilitas 90%) adalah 10,93 m<sup>3</sup>/dtk atau sekitar 344,69 juta m<sup>3</sup>. Selain itu, koefisien rezim aliran Sungai Bengkulu cukup fluktuatif dan menunjukkan tren yang meningkat pada beberapa tahun terakhir. Hal ini mengindikasikan bahwa DAS tersebut mengalami degradasi akibat perubahan tutupan lahan dan perubahan iklim global. Beberapa rekomendasi kebijakan yang perlu dilakukan yaitu: integrasi rencana tata ruang dan rencana pengelolaan DAS lintas pemda dan lintas sektor sebagai acuan pengelolaan SDA; melakukan reboisasi atau penghijauan lingkungan untuk mempertahankan kawasan bervegetasi; melakukan penanaman hutan dan tanaman dalam bentuk agroforestry.

**Kata kunci: debit andalan; hidrologi; *Interpretive Structural Modelling/ISM*; koefisien rezim aliran; penggunaan lahan**

### I. PENDAHULUAN

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan suatu kesatuan wilayah daratan beserta sungai dan anak-anak sungainya yang secara alami berfungsi untuk menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan menuju ke danau atau ke laut (Asdak, 2010). DAS mempunyai peran penting bagi keberlanjutan ekosistem dan berfungsi juga penyediaan sumberdaya air (Chen *et al.*, 2021). Pengelolaan DAS yang berkelanjutan menjadi kunci untuk menjaga keseimbangan antara pemenuhan kebutuhan manusia dan kelestarian lingkungan sehingga harus dilakukan dari hulu hingga hilir dengan

mempertimbangkan interaksi berbagai aspek geo-fisik dan sosial-ekonomi.

Namun beberapa dekade terakhir terjadi perubahan penggunaan lahan secara masif dan tidak terkendali di wilayah DAS telah menyebabkan berbagai dampak negatif banjir, tanah longsor, kekeringan, erosi dan kehilangan unsur hara, kehilangan keanekaragaman hayati (Gao, Chen, Luo, & Wang, 2020; Rápalo *et al.*, 2021). Perubahan fungsi lahan hutan menjadi permukiman, perkebunan, pertanian, dan pertambangan pada wilayah DAS dapat berpengaruh terhadap debit aliran sungai (Aghsaei *et al.*, 2020; Ullah, Jiang, & Wang, 2018).

Debit aliran sungai diperlukan untuk menggambarkan ketersediaan air sungai pada periode tertentu. Dalam konteks perencanaan sumber daya air, analisis debit andalan dapat digunakan untuk menggambarkan debit minimum tertentu pada suatu sungai yang kejadiannya dihubungkan dengan probabilitas atau periode ulang tertentu (Triatmodjo, 2022; Zelelew & Melesse, 2018). Debit ini merupakan debit minimum pada tingkat peluang tertentu yang dapat digunakan untuk menentukan atau menduga keandalan sumber air atau sungai dalam menyediakan air baku. Selain itu, analisis debit andalan diperlukan untuk memastikan tidak terjadi kekurangan pasokan air terutama pada musim kering serta untuk menyusun strategi konservasi air secara berkelanjutan (Kayitesi, Guzha, & Mariethoz, 2022).

Proses terjadinya hujan, aliran permukaan dan debit sungai memberikan informasi yang penting bagi pengambil kebijakan dalam perencanaan pengelolaan DAS (Zelelew & Melesse, 2018). Pengelolaan DAS memerlukan perencanaan penggunaan lahan yang efektif dan berkelanjutan (Dhaouadi, Kefi, Tarkhani, Stambouli, & Chkirbene, 2020). Ketersediaan air sungai yang ditunjukkan dari debit sungai menjadi informasi awal dalam penyediaan air bersih. Sebagaimana diketahui air bersih merupakan sumberdaya yang terbatas dan saat ini terus menghadapi ancaman baik kualitas maupun kuantitasnya (Alcamo, 2019; Muis, 2019; Seelen, Flaim, Jennings, & De Senerpont Domis, 2019).

Salah satu sumber air baku Kota Bengkulu berasal dari Sungai Bengkulu di

DAS Bengkulu. Namun, penelitian sebelumnya kawasan DAS ini telah menunjukkan degradasi tutupan lahan akibat terjadinya alih fungsi lahan dan adanya aktivitas yang ekstraktif pada bagian hulu seperti permukiman, industri, pertanian, peternakan, pertambangan (Arnop, Budiyanto, & Rustama, 2019; Satmaidi, Muthia, & Wulandari, 2018; Supriyono, Citra, Sulisty, & Barchia, 2017). Kondisi ini berpotensi mengganggu kestabilan debit aliran sungai, mempercepat aliran permukaan dan menurunnnya kapasitas penyimpanan air alami DAS sehingga dapat menjadi ancaman bagi keberlanjutan sumberdaya air di wilayah tersebut. Perubahan morfologi DAS, degradasi lahan, serta dinamika curah hujan menjadikan estimasi dan analisis debit andalan semakin penting sebagai dasar teknis perencanaan pasokan air dan rujukan dalam penyusunan kebijakan pengelolaan DAS (Ranjan & Singh, 2022; Simonovic, 2020). Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis debit andalan Sungai Bengkulu dan menyusun kebijakan pengelolaan DAS Bengkulu secara berkelanjutan.

## II. BAHAN DAN METODE

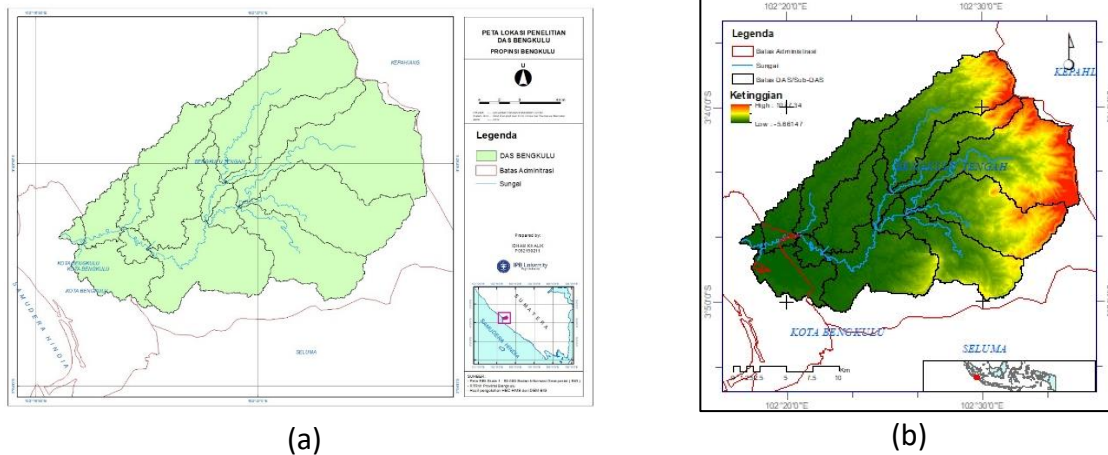
### A. Waktu dan Lokasi

Penelitian dilaksanakan pada bulan April 2021 hingga Agustus 2021. Lokasi penelitian di DAS Bengkulu pada koordinat 102°14'39" - 102°35'00" BT dan 3°37'6"- 3°50'33" LS yang meliputi wilayah Kota Bengkulu dan Kabupaten Bengkulu Tengah, Provinsi Bengkulu. Wilayah DAS tersebut memiliki sungai utama yang secara geografis potensial untuk dijadikan

sebagai sumber air baku di Kota Bengkulu (Gambar 1). DAS Bengkulu memiliki luas 473,65 km<sup>2</sup> dengan panjang sungai utama mencapai 53,30 km.

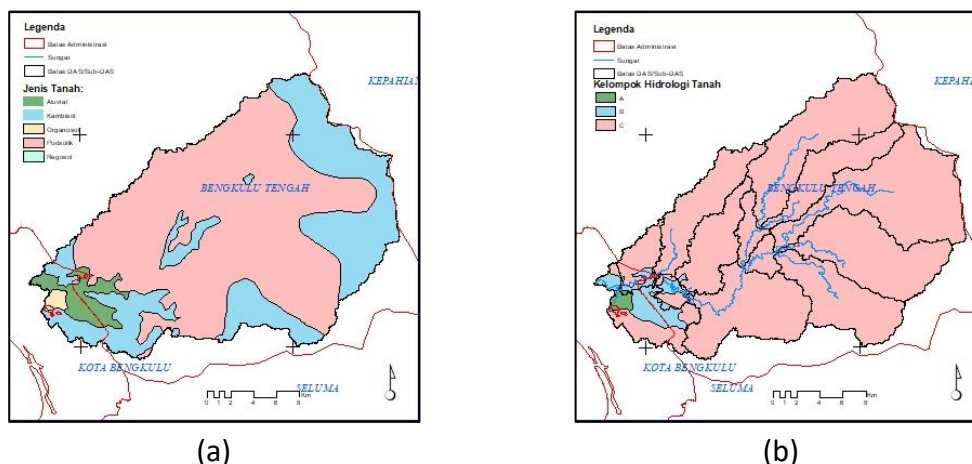
Topografi wilayah DAS Bengkulu dapat diklasifikasi menjadi tiga yaitu: daerah dengan ketinggian antara 0-100 meter di atas permukaan laut (mdpl) dan diklasifikasikan sebagai daerah dataran rendah; daerah dengan ketinggian 100-1.000 mdpl yang berada di wilayah timur yang merupakan lereng pegunungan Bukit Barisan dan diklasifikasikan sebagai daerah bukit; dan daerah dengan ketinggian lebih dari 1.000 mdpl yang juga berada di wilayah timur sampai ke puncak pegunungan Bukit Barisan yang umumnya daerah kegiatan vulkanis dan tektonis. Gambar 1 menunjukkan kondisi topografi

DAS Bengkulu. Selanjutnya klasifikasi jenis tanah pada lokasi penelitian meliputi aluvial, kambisol, organosol, podsolik, dan regosol. Jenis tanah yang mendominasi DAS Bengkulu adalah podsolik mencapai 298,50 km<sup>2</sup> (63,02%). Klasifikasi tanah berdasarkan kelompok hidrologi tanah meliputi yaitu: kelompok A (potensi air larian paling kecil, termasuk tanah pasir dalam dengan unsur debu dan liat); B (potensi air larian kecil, tanah berpasir lebih dangkal dari A, tekstur halus sampai sedang); dan C (potensi air larian sedang, tanah dangkal dan cukup liat; tekstur sedang sampai halus). Sebagian besar luas wilayah DAS termasuk dalam kelompok C terutama pada bagian hulu DAS sedangkan pada bagian hilir umumnya termasuk dalam kelompok B dan A (Gambar 2).



Gambar (Figure) 1. Peta lokasi penelitian (a) dan Peta topografi DAS Bengkulu (b) (Research location map (a) and Topographic map of Bengkulu watershed (b))

Sumber (Source): BPDASHL Ketahun-Bengkulu 2023



Gambar (Figure) 2. Deliniasi Jenis Tanah (a) dan Kelompok Hidrologi Tanah (b) (Deliniation of Soil Types (a) Soil Hydrology Group (b))

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

## B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain peta administrasi, peta rencana tata ruang, peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), peta penggunaan lahan, peta jenis tanah, peta *digital elevation model* (DEM). Selain itu data curah hujan harian berasal dari empat pos pengamatan

hujan yaitu Bajak, Baturaja, Serumbung, dan Tanjung Jaya-Surabaya, serta data debit harian hasil pengukuran Pos Duga Air Bengkulu Hilir (rincian disajikan pada Tabel 1). Peralatan yang digunakan pada penelitian ini berupa alat tulis, seperangkat komputer dengan *software ArcGIS 10.8*, *HEC-HMS 4.7*, *Exsimpro* dengan lisensi PSL-IPB University dan *Microsoft Office*.

Tabel (Table) 1. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian (Materials used in the study)

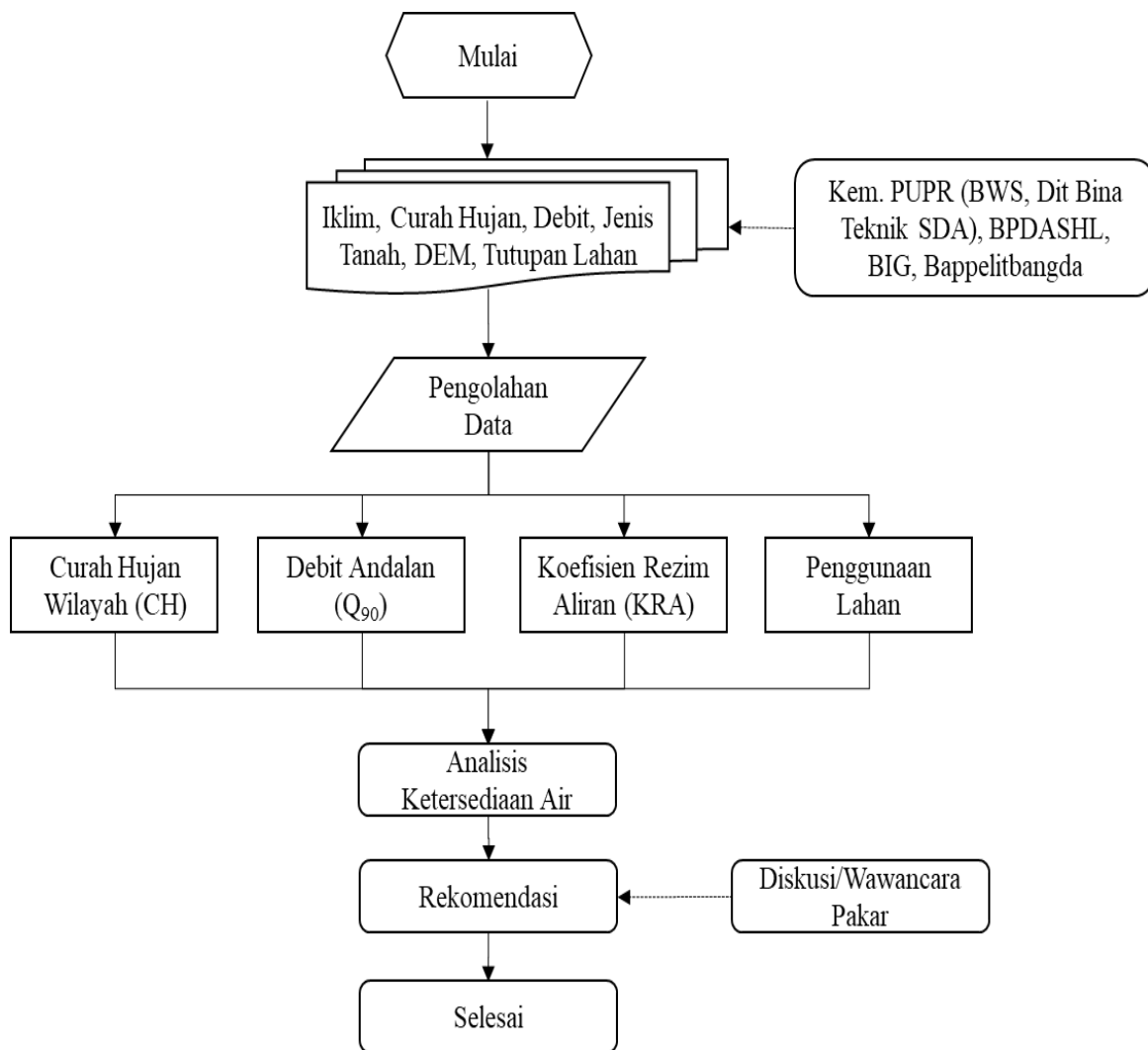
No	Bahan	Sumber
1	Peta digital penggunaan lahan DAS Tahun 1990, 2000, 2020 Skala 1:250.000	BPDAS-HL Ketahun-Bengkulu; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan
2	Peta digital jenis tanah DAS Skala 1:250.000	BPDASHL Ketahun-Bengkulu; Rencana Tata ruang Wilayah (RTRW) Provinsi Bengkulu 2012-2032
3	Data curah hujan harian Tahun 1990-2019	Direktorat Bina Teknik SDA, Kementerian PUPR
4	Data debit sungai harian Tahun 1990-2019	Direktorat Bina Teknik SDA, Kementerian PUPR
5	Data Iklim dan Klimatologi Tahun 1990-2019	Direktorat Bina Teknik SDA, Kementerian PUPR; Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Bengkulu
6	Peta <i>Digital Elevation Model</i> (DEM)	Badan Informasi Geospasial (BIG): <a href="https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/demnas">https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/demnas</a>
7	Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1: 50.000	Badan Informasi Geospasial (BIG)
8	Peta administrasi dan RTRW Provinsi Bengkulu 2012-2032	Bappelitbangda Provinsi Bengkulu

### C. Metode Penelitian

#### 1. Tahapan dan prosedur penelitian

Tahapan pelaksanaan penelitian diawali dengan pengumpulan dan pengolahan data biofisik DAS kemudian dilanjutkan dengan diskusi dengan pakar. Data biofisik DAS dikumpulkan dari berbagai instansi dan dinas terkait. Pengolahan data meliputi deliniasi batas DAS, analisis curah hujan wilayah, debit sungai, koefisien rezim aliran, perubahan penggunaan lahan dan

analisis ketersediaan air. Pada bagian akhir dilakukan diskusi dan wawancara dilakukan terhadap 7 orang pakar terdiri atas akademisi, pemerintah (BPDAS Ketahun dan DLHK Provinsi Bengkulu), DPRD, Tokoh Masyarakat dan PDAM. Wawancara pakar bertujuan untuk mengidentifikasi permasalahan dan menyusun rekomendasi kebijakan pengelolaan DAS Bengkulu. Kerangka tahapan penelitian disajikan pada Gambar 3.



Gambar (Figure) 3. Diagram alir penelitian (Research flowchart)

## 2. Analisis penggunaan lahan

Analisis penggunaan lahan diawali dengan penentuan batas DAS. Dalam studi ini, data yang digunakan dalam proses deliniasi batas DAS adalah data raster DEMNAS. Pengolahan data DEM meliputi: penggabungan mosaik raster DEM (*mosaic to raster*), membuat proyeksi sistem koordinat (*project raster*) menjadi UTM (*Universal Transverse Mercator*) pada zona 48S dan pemotongan wilayah kajian (*clip*). Proses deliniasi batas DAS dilakukan dengan menggunakan *software* HEC-HMS 4.7 dengan tahapan sebagai berikut (Al Amin, Toyfur, Fransiska, & Marlina, 2020): 1) pembuatan dan pengaturan *Basin Model*, 2) pembuatan *Terrain Model*, dan 3) pemrosesan GIS. Data batas DAS yang berasal dari BPDAS-HL digunakan sebagai orientasi batas DAS Bengkulu. Selanjutnya dilakukan analisis penggunaan lahan dan perubahannya menggunakan *ArcGIS 10.8*. Luasan perubahan penggunaan lahan dihitung masing-masing tipe penggunaan lahan pada periode tertentu. Hasil analisis ini untuk memberikan gambaran mengenai kondisi biofisik DAS. Kemudian dianalisis secara deskriptif dengan mengklasifikasi penggunaan lahan dan membandingkan luas pola perubahan penggunaan lahan yang terjadi pada wilayah DAS menggunakan Rumus 1 berikut.

$$\text{Perubahan luas (\%)} = \frac{\text{LU akhir}_i - \text{LU awal}_i}{\text{LU awal}_i} \quad (1)$$

Keterangan (*Remarks*):

LU = Luas penggunaan lahan (ha)

I = Tipe penggunaan lahan.

## 3. Analisis curah hujan wilayah

Dalam penelitian ini analisis curah hujan wilayah menggunakan metode *polygon Thiessen*. Metode ini memperhitungkan bobot dari masing-masing stasiun yang mewakili luasan di sekitarnya. Analisis ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran sumber air masukan yang ada dalam wilayah DAS. Penentuan curah hujan pada wilayah DAS ditentukan menggunakan metode *Polygon Thiessen*. Metode ini dapat memberikan hasil yang lebih teliti untuk menentukan curah hujan suatu wilayah berdasarkan data dari masing-masing pos hujan yang terdekat (Arun. Kumar, Singh, Jena, Chatterjee, & Mishra, 2015). Batas wilayah pos hujan ditentukan dengan membuat garis batas tegak lurus di antara dua pos hujan yang berdekatan, kemudian di-*overlay* dengan batas DAS. Luas wilayah perpotongan batas DAS dengan poligon yang terbentuk dari batas pos hujan menjadi pengali dengan curah hujan pada wilayah tersebut. Perhitungan rata-rata curah hujan wilayah dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut (Mananoma, Ratu, & Moningka, 2024).

$$d = \frac{A_1 \cdot d_1 + A_2 \cdot d_2 + A_3 \cdot d_3 + \dots + A_n \cdot d_n}{A} = \frac{\sum A_n \cdot d_n}{A} \quad (2)$$

Keterangan (*Remarks*):

D = rata-rata curah hujan wilayah

A = Luas wilayah (Km<sup>2</sup>),

d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub>,...d<sub>n</sub> = curah hujan pada masing-masing pos hujan 1, 2, 3,...n

A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>,...A<sub>n</sub> = Luas daerah pengaruh pos hujan 1, 2, 3,...n.

#### 4. Koefisien rezim aliran

Perhitungan Koefisien Rezim Aliran (KRA) dilakukan dengan membandingkan nilai debit maksimum ( $Q_{maks}$ ) dengan nilai debit minimum ( $Q_{min}$ ) pada suatu DAS. Semakin tinggi nilai rasio antara debit maksimum dan minimum menunjukkan bahwa semakin tidak meratanya debit aliran yang terjadi sepanjang tahun (Asdak, 2010). Debit yang tidak merata memberikan informasi bahwa daya resap lahan yang tidak mampu menahan dan menyimpan air pada DAS tersebut. Berdasarkan Permenhut No. P.61/Menhut-II/2014 tentang Monitoring dan Evaluasi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, KRA dapat dihitung dengan Rumus 3. Berdasarkan rasio debit maksimum dan minimum tersebut dapat dilakukan klasifikasi KRA dengan kriteria berikut: (i)  $KRA \leq 20$  (Sangat Rendah); (ii)  $20 < KRA \leq 50$  (Rendah); (iii)  $50 < KRA \leq 80$  (Sedang); (iv)  $80 < KRA \leq 110$  (Tinggi); dan (v)  $KRA > 110$  (Sangat Tinggi).

$$KRA = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} \quad (3)$$

Keterangan (*Remarks*):

KRA = Koefisien Rezim Aliran  
 $Q_{max}$  = Debit maksimum ( $m^3/s$ )  
 $Q_{min}$  = Debit minimum ( $m^3/s$ )

#### 5. Debit andalan

Penentuan debit andalan sungai mengacu pada SNI Nomor 6738:2015 tentang Perhitungan Debit Andalan Sungai dengan Kurva Durasi Debit. Data yang digunakan adalah debit Sungai Bengkulu Pos Duga Air Bengkulu Hilir periode 2008-2020, dengan interval debit bulanan. Data awal yang dikumpulkan berupa data debit harian

kemudian dijadikan debit rata-rata bulanan. Selanjutnya keseluruhan data debit tersebut diurutkan dari terbesar hingga terkecil dan dibuat kurva durasi debit dengan probabilitas 90% ( $Q_{90}$ ). Kurva durasi debit merupakan kurva frekuensi kumulatif yang menunjukkan persentase pada waktu tertentu dimana debit disamai atau dilampaui selama periode tertentu. Kurva debit probabilitas 90% artinya debit yang terjadi sama atau melampaui 9 dari 10 kejadian. Perhitungan probabilitas debit menggunakan Rumus 4.

$$(P(X \geq x) = \frac{m}{n+1} * 100\%) \quad (4)$$

Keterangan (*Remarks*):

$(P(X \geq x))$  = Probabilitas terjadinya variabel X (debit)  $\geq x$  ( $m^3/detik$ )

$n$  = Jumlah data

$m$  = Peringkat data atau nomor urut dari 1 s/d jumlah data ( $n$ ), setelah data debit bulanan diurut dari terbesar ke terkecil

$X$  = Seri data debit

$x$  = Debit andalan probabilitas

Apabila hasil perhitungan debit andalan berdasarkan probabilitas 90% tidak sesuai dengan yang diinginkan maka dapat dilakukan interpolasi.

#### 6. Analisis ketersediaan air

Analisis ketersediaan air Sungai Bengkulu dilakukan berdasarkan perhitungan debit andalan. Analisis ini menggambarkan volume aliran air yang dapat digunakan sebagai air baku untuk memenuhi kapasitas PDAM di Kota Bengkulu. Probabilitas debit andalan yang digunakan adalah 90% karena penggunaan air sungai untuk air baku. Selanjutnya berdasarkan debit andalan, dilakukan perhitungan total volume

aliran air sungai yang kemudian dikonversi menjadi volume tahunan.

#### 7. Identifikasi elemen kunci kendala dan permasalahan pengelolaan DAS

Metode analisis yang digunakan adalah *Interpretive Structural Model (ISM)*. Menurut Kumar and Singh (2019) teknik ISM mampu menginterpretasikan struktur berupa hubungan antar elemen dari suatu sistem yang didasarkan atas hubungan kontekstual tertentu. Metode ini memungkinkan untuk menyusun hierarki, menentukan faktor pendorong (*driver power*) dan tingkat ketergantungan (*dependence*) antar elemen serta mengklasifikasi elemen suatu program sehingga dapat digunakan dalam perumusan kebijakan dan perencanaan strategis. Lebih lanjut dinyatakan bahwa metode ISM memungkinkan dapat mengubah model atau elemen sistem yang tidak jelas dan sulit diartikulasikan menjadi model yang lebih jelas dan terdefinisi dengan baik. Berdasarkan sub-elemen yang telah teridentifikasi dapat disusun hubungan kontekstual antar-sub elemen dengan perbandingan berpasangan dan terakhir dapat diketahui sub-elemen kendala atau permasalahan kunci dalam pengelolaan DAS. ISM dapat digunakan sebagai alat perumusan kebijakan manajemen, menganalisis dan memecahkan masalah yang kompleks dan abstrak. ISM memungkinkan pengambilan keputusan menjadi lebih efektif, lancar, dan efisien. Hasil yang didapat dari wawancara dengan para pakar diperoleh elemen kunci permasalahan dan kendala pengelolaan

DAS. Berikut secara ringkas deskripsi tahapan teknik ISM adalah:

- a. Identifikasi elemen; elemen sistem diidentifikasi dan didaftar, yang diperoleh melalui penelitian, *brainstorming*, dan sebagainya.
- b. Hubungan kontekstual; sebuah hubungan kontekstual antar elemen dibangun, tergantung pada tujuan pemodelan.
- c. Matriks interaksi tunggal terstruktur (*structural self-interaction matrix/SSIM*) dengan menggunakan simbol V, A, X, dan O.
- d. Matriks Reachability (*Reachability Matrix/RM*) dengan mengubah simbol-simbol SSIM ke dalam sebuah matriks biner (1 dan 0).
- e. Tingkat partisipasi dilakukan untuk mengklasifikasi elemen-elemen dalam level-level yang berbeda dari struktur ISM.
- f. Matriks Conical; pengelompokan elemen-elemen dalam level yang sama.
- g. Di-graph, konsep yang berasal dari *directional graph (di-graph)*, sebuah grafik dari elemen-elemen yang saling berhubungan secara langsung, dan level hirarki.
- h. *Interpretive Structural Modeling*; ISM dibangkitkan dengan memindahkan seluruh jumlah elemen dengan deskripsi elemen aktual.

Hasil olahan didapatkan nilai *driver-power (DP)* dan nilai *dependence (D)* untuk menentukan klasifikasi sub elemen. Secara garis besar klasifikasi sub elemen digolongkan dalam 4

(empat) sektor (Shamsuzzoha & Piya, 2020), yaitu:

- a. Kuadran *autonomus: weak driver-weak dependence variabel*. Sub-elemen ini pada umumnya tidak berkaitan dengan sistem dan mungkin mempunyai hubungan sedikit, meskipun hubungan tersebut bisa saja kuat.
- b. Kuadran *dependent; weak driver-strongly dependence variabel*. Sub-elemen ini adalah sub elemen yang tindakan bebas.
- c. Kuadran *linkage; strong driver-strongly dependent variabel*. Sub-elemen yang termasuk dalam sektor ini harus dikaji secara hati-hati, sebab hubungan antara sub-elemen tidak stabil. Setiap tindakan pada sub-elemen memberikan dampak terhadap sub-elemen lainnya dan pengaruh umpan baliknya dapat memperbesar dampak.
- d. Kuadran *independent: Strong driver-weak dependent variables*.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Penggunaan lahan DAS

Faktor lain yang memengaruhi sistem hidrologi pada suatu DAS adalah tutupan lahan yang berfungsi untuk menyimpan, menahan dan mengalir air yang jatuh di atasnya. Lahan yang memiliki vegetasi dapat mengubah sifat fisika dan kimia tanah sehingga dapat memengaruhi besar-kecilnya aliran air permukaan (Asdak, 2010). Penggunaan lahan tahun 1990 sampai dengan 2020 meliputi: Hutan Lahan

Kering Sekunder, Belukar, Perkebunan, Pemukiman, Tanah Terbuka, Badan Air, Pertanian Lahan Kering, Pertanian Lahan Kering Campur, Sawah, Hutan Rawa Sekunder, Belukar Rawa, dan Pertambangan (Tabel 2).

Penggunaan lahan DAS Bengkulu terbesar berupa Pertanian Lahan Kering Campur. Penggunaan lahan tersebut merupakan salah satu karakteristik berupa perkebunan yang umumnya dikelola oleh masyarakat dan pada beberapa lokasi dikelola oleh perusahaan perkebunan swasta dengan beberapa komoditas unggulan berupa kelapa sawit dan karet (Wiryo, Senoaji, & Hidayat, 2013). Pada tahun 2020 penggunaan lahan jenis ini mencapai luas 403,94 km<sup>2</sup> (85,28%). Penggunaan lahan lainnya yang cukup luas adalah berupa perkebunan/kebun dan permukiman masing-masing seluas 19,68 km<sup>2</sup> (4,15%) dan 15,40 km<sup>2</sup> (3,25%). Hasil analisis menunjukkan pada periode tersebut masih terjadi penambahan luas perkebunan. Pembukaan perkebunan biasanya dilakukan oleh perusahaan swasta dengan komoditas kelapa sawit, karet, kopi dan lain-lain. Berdasarkan data (BPS, 2020), pada tahun 2019 terdapat seluas 208.627,11 ha perkebunan kelapa sawit yang tersebar pada seluruh kabupaten/kota di Provinsi Bengkulu. Jumlah tersebut telah meningkat dari hanya sekitar 81.082 ha pada tahun 2013. Sedangkan penggunaan lahan berupa permukiman sebagai konsekuensi penambahan penduduk juga terus mengalami terutama pada bagian tengah dan hilir DAS (Gambar 4 dan Gambar 5).

Tabel (Table) 2. Penggunaan lahan DAS Bengkulu periode 1990 s.d 2020 (*Land use of Bengkulu Watershed from 1990 to 2020*)

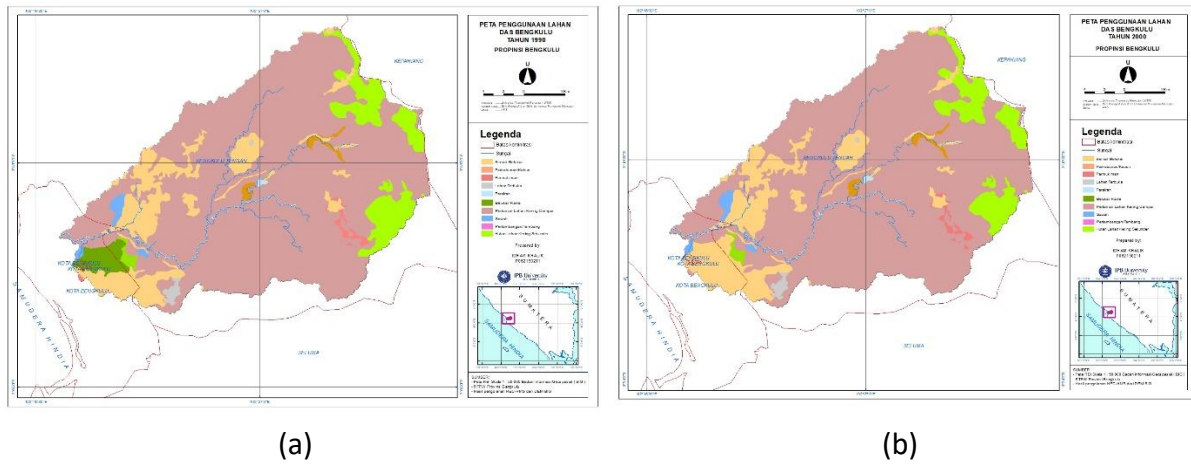
No	Penggunaan Lahan	1990		2000		2020		Perubahan (1990-2020)	
		Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
1	Hutan Lahan Kering Sekunder	34,58	7,30	30,84	6,51	0,00	0,00	-34,58	-7,30
2	Belukar	54,26	11,46	63,26	13,36	1,88	0,40	-52,37	-11,06
3	Perkebunan	0,00	0,00	0,00	0,00	19,68	4,15	19,68	4,15
4	Pemukiman	2,37	0,50	2,32	0,49	15,40	3,25	13,03	2,75
5	Tanah Terbuka	2,17	0,46	2,17	0,46	0,81	0,17	-1,36	-0,29
6	Badan Air	2,56	0,54	2,56	0,54	2,79	0,59	0,24	0,05
7	Pertanian Lahan Kering	2,98	0,63	2,98	0,63	0,00	0,00	-2,98	-0,63
8	Pertanian Lahan Kering Campur	360,61	76,14	364,40	76,94	403,94	85,28	43,33	9,15
9	Sawah	3,39	0,72	3,39	0,72	8,86	1,87	5,47	1,16
10	Hutan Rawa Sekunder	1,73	0,36	1,73	0,36	0,00	0,00	-1,73	-0,36
11	Belukar Rawa	9,00	1,90	0,00	0,00	4,52	0,95	-4,48	-0,95
12	Pertambangan	0,00	0,00	0,00	0,00	15,76	3,33	15,76	3,33
Jumlah		473,64	100	473,64	100	473,64	100		

Sumber (Source): BPDAS-HL Ketahun, diolah 2023 (BPDAS-HL, analysed 2023)

Pada periode 1990-2020 telah terjadi perubahan penggunaan lahan yaitu penambahan luas lahan Pertanian Lahan Kering Campur berasal dari Hutan Lahan Kering Sekunder dan Belukar sebesar 34,58 km<sup>2</sup> (7,30%) dan 52,37 km<sup>2</sup> (11,06%). Selain itu, terdapat perubahan lahan menjadi pertambangan seluas 15,76 km<sup>2</sup> (3,33%). Pertambangan batu bara yang terdapat pada bagian hulu DAS merupakan penggunaan lahan yang berpotensi berpengaruh terhadap sistem hidrologi apabila tidak dikelola dengan baik. Saat ini, pada bagian hilir sungai terdapat banyak sisa kegiatan pertambangan berupa butir-butir batu bara yang terangkut oleh aliran air sehingga dapat menyebabkan pendangkalan dan pencemaran sungai (Wiryo et al., 2013). Selain itu, perubahan penggunaan lahan tersebut dapat menyebabkan peningkatan erosi,

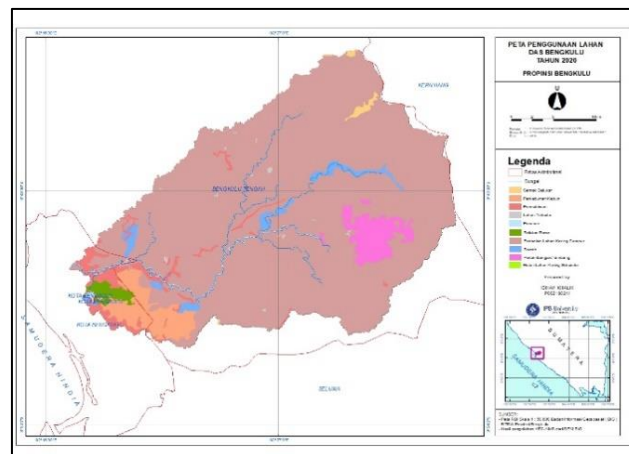
aliran permukaan, dan rata-rata debit aliran sungai (Budiyanto, Tarigan, Sinukaban, & Murtilaksono, 2015; Guzha, Rufino, Okoth, Jacobs, & Nóbrega, 2018).

Areal yang memiliki vegetasi terutama hutan lahan kering sekunder yang sudah berkurang dapat memengaruhi aliran permukaan, debit maksimum sungai akan semakin tinggi dan di sisi lain akan menurunkan debit minimum sungai. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa terjadinya penurunan tutupan hutan berkorelasi signifikan dengan penurunan kapasitas menahan air tanah pada suatu wilayah DAS (Kabeja et al., 2020; Yuono, Putranto, & Tukirun, 2020). Selain itu, perubahan peruntukan lahan juga dapat menyebabkan perubahan kualitas air sungai (Camara, Jamil, & Fikri, 2019; Tahiru, Doke, & Baatuuwie, 2020).



Gambar (Figure) 4. Peta penggunaan lahan 1990 (a) dan Peta penggunaan lahan 2000 (b) (*Land use map 1990 (a) and Land use map 2000 (b)*)

Sumber (Source): BPDAS-HL Bengkulu, diolah 2023 (*BPDAS-HL Bengkulu, analysed 2023*)



Gambar (Figure) 5. Peta penggunaan lahan 2020 (*Land use map 2020*)

Sumber (Source): BPDAS-HL Bengkulu, diolah 2023 (*BPDAS-HL Bengkulu, analysed 2023*)

## B. Analisis curah hujan wilayah

Analisis curah hujan rata-rata dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh dari tiap stasiun. Data curah hujan yang digunakan selama periode 30 tahun terakhir yaitu 1990-2019. Analisis dilakukan berdasarkan data dari pos pengamatan hujan yang terdapat di wilayah penelitian yaitu Bajak, Baturaja, Serumbung dan Tanjung Jaya. Kondisi iklim DAS sepanjang tahun cenderung selalu

turun hujan. Berdasarkan klasifikasi iklim *Schmidt* dan *Ferguson*, wilayah DAS tersebut termasuk dalam tipe iklim A ( $0 \leq Q \leq 0,143$ ). Nilai Q merupakan rasio antara bulan kering terhadap bulan basah. Hari hujan umumnya terjadi pada bulan Januari-April dan Oktober-Desember. Bulan kering terjadi pada bulan lainnya, namun demikian biasanya masih terjadi hujan.

Tabel (Table) 3. Ringkasan analisis deskriptif setiap stasiun hujan tahun 1990-2019 (Summary of descriptive analysis based on rainfall stations in 1990-2019)

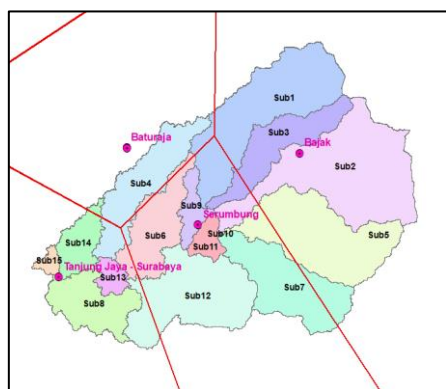
Stasiun Hujan	N	Min	Max	Sum	Mean	Std. Deviation	Variance	Skewness	Kurtosis
Bajak	10.957	0,00	450,00	103.477,00	9,44	20,09	403,64	4,73	44,59
Baturaja	10.896	0,00	392,00	117.684,00	10,80	21,85	477,24	3,82	24,55
Serumbang	10.500	0,00	275,00	86.130,00	8,20	16,64	276,74	3,84	23,52
Tanjung Jaya	10.957	0,00	224,00	83.546,00	7,62	18,02	324,83	4,14	24,49

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

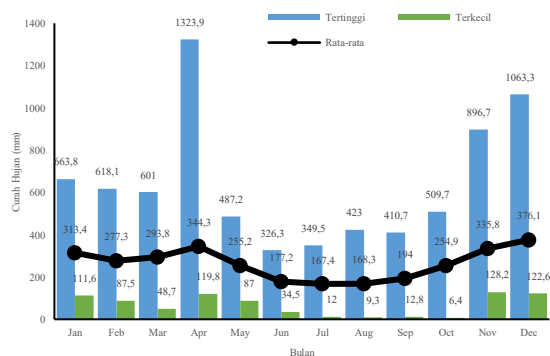
Pada periode tersebut jumlah curah hujan tahunan paling tinggi terjadi pada tahun 1998 tercatat di Pos Hujan Baturaja sebesar 7.730,9 mm dan tahun 2001 sebesar 7.320,0 mm. Sedangkan jumlah curah hujan tahunan paling rendah terjadi pada tahun 2000 di Pos Hujan Serumbang sebesar 752,6 mm dan tahun 2013 di Pos Hujan Bajak sebesar 815,9 mm. Berdasarkan Tabel 3, jumlah curah hujan harian tertinggi pernah terjadi berkisar antara 224,0-450 mm. Secara umum curah hujan harian tertinggi di Stasiun Bajak dan Baturaja.

Gambar 6 menunjukkan poligon yang terbentuk hasil pengolahan untuk mengetahui luas pengaruh masing-masing pos hujan terhadap curah hujan wilayah DAS. Stasiun hujan Bajak mempunyai pengaruh terbesar yaitu 52,31%,

Serumbang sebesar 32,66%, Tanjung Jaya sebesar 14,22% dan Baturaja sebesar 0,81%. Secara umum, pola hujan yang terjadi pada daerah penelitian membentuk huruf U yakni musim kering terjadi pada bulan Juni, Juli dan Agustus sedangkan bulan basah terjadi pada bulan Desember, Januari dan Februari. Kondisi iklim ini merupakan karakteristik yang terjadi pada wilayah Pulau Sumatera (Hermawan, 2010). Hasil analisis curah hujan wilayah rata-rata bulanan di DAS Bengkulu berkisar antara 9,3-1.323,9 mm. Curah hujan terendah terjadi pada Agustus 1994 dan tertinggi pada April 2016. Secara keseluruhan curah hujan rata-rata tahunan terkecil terjadi pada tahun 2013 mencapai 1.639,2 mm dan terbesar terjadi pada tahun 1990 mencapai 4.403,3 mm (Gambar 6).



(a)



(b)

Gambar (Figure) 6. Hasil Deliniasi Polygon Thiessen dan Curah hujan wilayah DAS Bengkulu (Polygon Thiessen deliniation and rainfall region of Bengkulu watershed)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

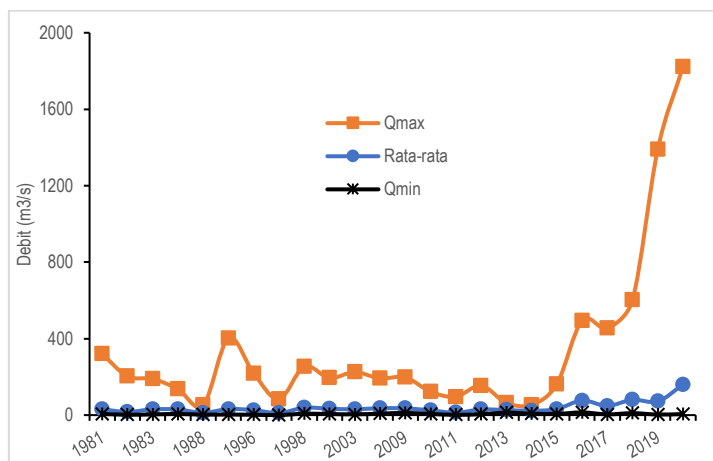
### C. Koefisien rezim aliran

Nisbah debit maksimum dan debit minimum yang dikenal dengan Koefisien Rezim Aliran (KRA) menjadi salah satu indikator penilaian kondisi DAS. Pada periode pengukuran 1981-2020 tersedia 24 seri data sedangkan beberapa tahun lainnya data tidak tersedia. Nilai KRA berfluktuatif dari kategori sangat rendah hingga sangat tinggi. Nilai KRA sangat tinggi terjadi pada tahun 2019, 2020 dan 1997 yang mencapai berturut-turut sebesar 469,79, 340,77 dan 333,20. Nilai KRA tersebut menggambarkan tingginya variasi nilai debit maksimum dan debit minimum di DAS Bengkulu (Gambar 7). Hidrograf debit sungai juga menunjukkan bahwa pada beberapa tahun terakhir variasi debit cukup tinggi. Hal ini terjadi selain karena curah hujan yang cukup tinggi pada periode tersebut juga dipengaruhi perubahan tutupan lahan pada wilayah DAS. Sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya telah terjadi penurunan luas penggunaan lahan berupa hutan menjadi non hutan yang dapat menurunkan kemampuan infiltrasi sehingga mempengaruhi aliran permukaan. Hasil analisis terhadap nilai KRA DAS Bengkulu disajikan pada Gambar 8. Hasil ini sejalan dengan penelitian lain menunjukkan terjadinya ketidakstabilan fungsi hidrologi DAS Bengkulu (Izzatuddinillah, Barus, & Rachman, 2023).

KRA terkecil terjadi pada tahun 2013 dan 2014 berturut-turut sebesar 5,07 dan 7,38. Debit rata-rata tahunan Sungai Bengkulu pada beberapa tahun terakhir menunjukkan tren peningkatan. Debit sungai tertinggi terjadi pada akhir bulan

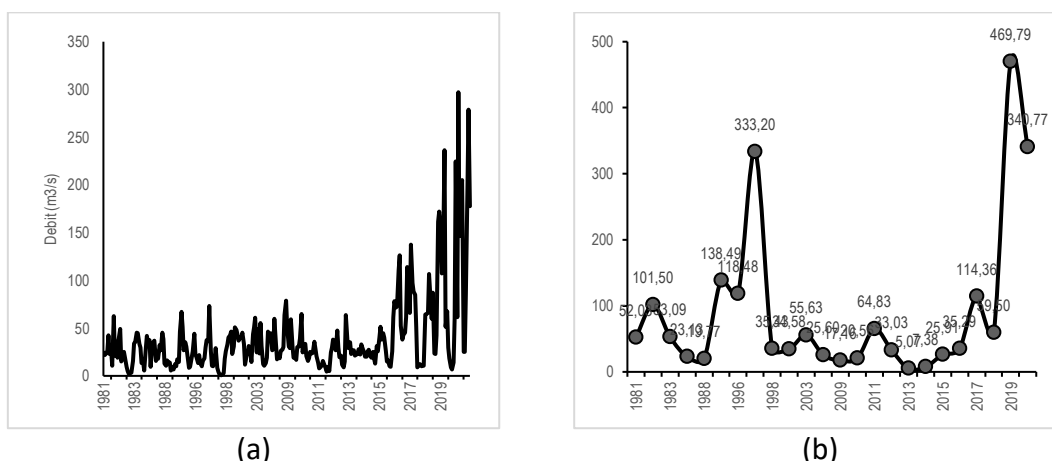
April tahun 2019 yang mencapai 1.390,57 m<sup>3</sup>/detik, hal ini disebabkan terjadinya hujan wilayah yang cukup tinggi mencapai 600,21 mm. Curah hujan tersebut menyebabkan aliran permukaan yang tinggi karena tanah tidak mampu menyerap semua air hujan. Pada November 2019 debit minimum yang terjadi adalah 2,96 m<sup>3</sup>/detik karena rata-rata curah hujan yang terjadi pada tengah bulan pertama November 2019 tersebut yang relatif kecil yaitu 4,81 mm. Dengan demikian dapat dipahami bahwa terjadinya fluktuasi debit sungai terkait erat dengan curah hujan yang terjadi pada wilayah DAS Bengkulu. Selain itu, tingginya aliran permukaan juga disebabkan adanya perubahan tutupan lahan (PT PLN (Persero), 2019). Hasil penelitian sebelumnya menyatakan bahwa pada periode 1990-2016 masih terjadi perubahan tutupan lahan DAS Bengkulu menjadi tanah terbuka dan permukiman (Supriyono *et al.*, 2017).

Kecenderungan peningkatan KRA dapat dikaitkan dengan adanya perubahan iklim global dan perubahan penggunaan lahan DAS. Gambaran mengenai perubahan debit aliran harian yang ekstrim menunjukkan bahwa kondisi DAS mulai terganggu (Asdak, 2010). Terjadinya perubahan penggunaan lahan yang bersifat absolut sehingga dibutuhkan upaya mitigasi dan adaptasi untuk mencegah terjadinya perubahan debit aliran sungai (Yuliasman, 2022). Kebijakan terkait penataan ruang dan pencegahan terjadinya perubahan penggunaan lahan agar dapat lebih dioptimalisasikan.



Gambar (Figure) 7. Debit Rata-rata, Debit Maksimum dan Debit Minimum tahunan Sungai Bengkulu (Average Discharge, Maximum Discharge and Minimum Discharge of Bengkulu River)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)



Gambar (Figure) 8. Hidrograf Debit Sungai Bengkulu Tahun 1981-2020 (a) dan Koefisien Rezim Aliran/KRA (b) (Hydrograph of Bengkulu River Discharge 1981-2020 (a) and Coefficient of Regime Flow (b))

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

#### D. Analisis Debit Andalan dan Volume Aliran Sungai

Debit andalan adalah besarnya debit minimum tertentu pada suatu sungai yang kejadiannya dihubungkan dengan probabilitas atau periode ulang tertentu (Triatmodjo, 2022). Debit ini merupakan debit minimum pada tingkat peluang tertentu yang dapat dipakai untuk keperluan penyediaan air. Besaran debit andalan ini digunakan untuk menentukan keandalan sumber air atau sungai dalam menyediakan air baku. Persyaratan yang umum digunakan dalam penyediaan air

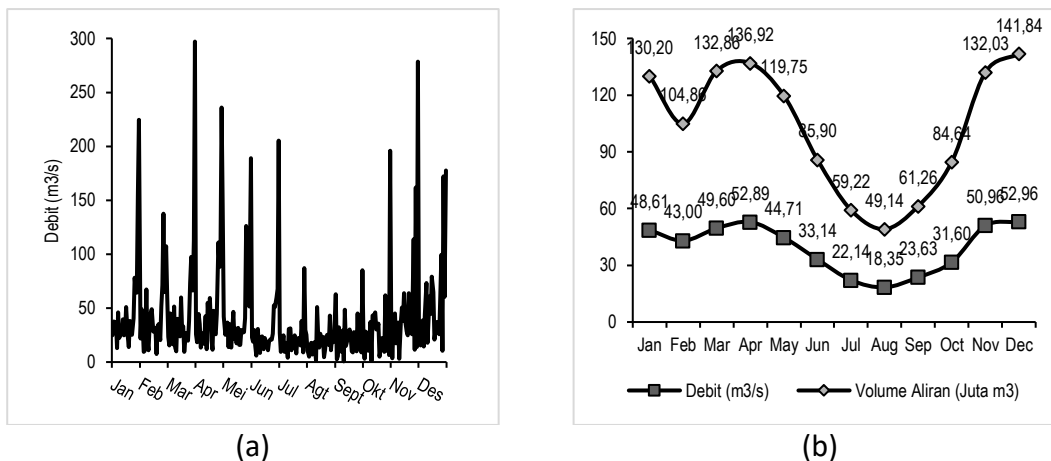
baku adalah debit dengan probabilitas 90%, artinya tingkat kejadian atau probabilitas debit yang kurang (tidak memenuhi) dari nilai tersebut hanya 10%.

Hidrograf debit rata-rata bulanan Sungai Bengkulu pada periode 1981-2020 menunjukkan variasi yang cukup tinggi antara debit maksimum dan debit minimum. Pada bulan Januari-Juni debit sungai berfluktuasi cukup besar. Pada periode bulan Juli-Oktober umumnya debit agak kecil karena musim kemarau. Namun debit kembali tinggi pada saat mulai musim hujan pada November-Desember. Secara

keseluruhan debit rata-rata bulanan Sungai Bengkulu pada periode 1981-2020 berkisar antara 18,35-52,96 m<sup>3</sup>/s (Gambar 9). Pada musim hujan debit cenderung tinggi sehingga ketersediaan air sungai meningkat dan sebaliknya pada musim kemarau ketersediaan air relatif rendah. Namun demikian debit sungai masih bisa memenuhi kebutuhan air. Berdasarkan nilai debit tersebut maka dapat diketahui besarnya volume aliran sungai. Rata-rata volume aliran berkisar dari tertinggi

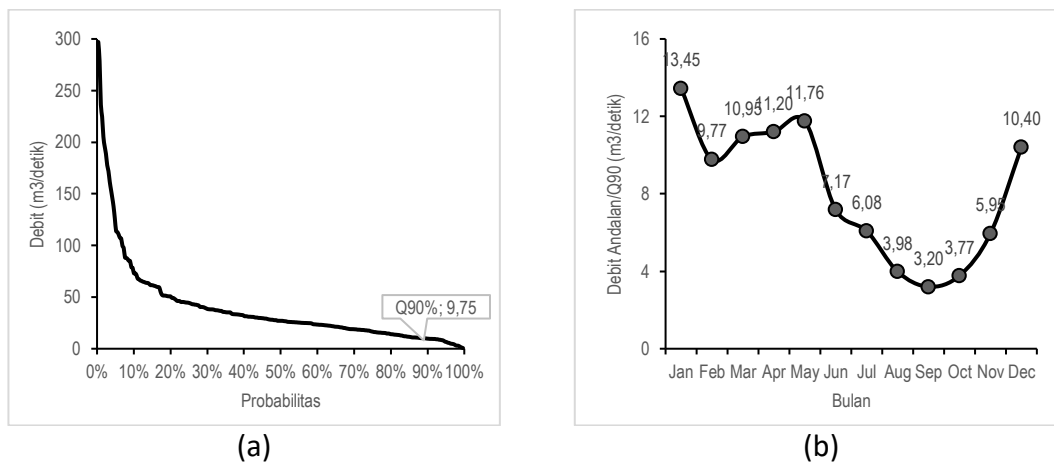
mencapai 141,84 juta m<sup>3</sup> dan terendah sebesar 49,14 juta m<sup>3</sup>.

Hasil perhitungan kurva durasi debit menunjukkan bahwa debit andalan dengan probabilitas 90% Sungai Bengkulu adalah 9,75 m<sup>3</sup>/s (Gambar 10). Berdasarkan besar debit andalan tersebut, maka dapat diketahui total volume aliran air yang tersedia dengan konversi dari m<sup>3</sup>/det menjadi m<sup>3</sup>/tahun (nilai debit dikalikan dengan 60 detik\*60 menit\*24 jam\*365 hari). Ketersediaan air adalah sekitar 344,69 juta m<sup>3</sup>/tahun.



Gambar (Figure) 9. Hidrograf Debit Rata-rata Bulanan (a) dan Volume Aliran (b) Sungai Bengkulu Tahun 1981-2020 (Hydrograph of Monthly Average Discharge (a) and Flow Volume (b) of Bengkulu River 1981-2020)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)



Gambar (Figure) 10. Debit Andalan (Q<sub>90</sub>) (a) dan Debit rata-rata per bulanan (b) Sungai Bengkulu Tahun 1981-2020 (Dependable Discharge (Q<sub>90</sub>) (a) and Monthly Average Discharge (b) of Bengkulu River in 1981-2020)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

Selanjutnya untuk mendapatkan gambaran mengenai ketersediaan air bulanan digunakan grafik debit andalan 90% bulanan (Gambar 10). Secara umum bulan Juli, Agustus, September dan Oktober memiliki debit yang kecil karena bulan kering atau musim kemarau. Pada bulan-bulan tersebut dimana curah hujan yang kurang sehingga ketersediaan air juga akan berkurang. Hal ini menjadi tantangan yang diperlukan antisipasi dan perhatian oleh berbagai pihak. Sebaliknya pada bulan-bulan lain pada musim basah dengan curah hujan yang tinggi akan terjadi peningkatan debit sungai. Pola grafik tersebut sesuai dengan pola debit sungai umumnya di Sumatera. Walaupun berkurang pada musim kemarau, sungai masih tetap terdapat aliran. Dengan demikian, air sungai masih mampu menyediakan air baku Kota Bengkulu dengan total kapasitas terpasang Perumda Air Minum Kota Bengkulu saat ini sebesar 600 l/detik yang berasal dari Sungai Bengkulu sebesar 200 l/s dan air Sungai Nelas sebesar 400 l/s.

### E. Elemen kendala dan permasalahan pengelolaan DAS

Pengelolaan DAS bertujuan untuk menjaga keseimbangan antara pemenuhan kebutuhan hidup manusia dan keberlanjutan sumberdaya alam (SDA). Namun demikian pengelolaan DAS memiliki berbagai permasalahan dan kendala akibat dari adanya interaksi berbagai elemen yang terlibat, baik aspek biofisik maupun aspek sosial budaya masyarakat di sekitarnya. Interaksi tersebut akan saling terkait dan memberikan dampak positif dan negatif sehingga tidak jarang dalam pemanfaatan SDA menimbulkan 'konflik'. Selain itu, DAS memiliki berbagai jenis penggunaan lahan. Dari sisi kewenangan kelembagaan, pengelolaan DAS perlu melibatkan berbagai *stakeholder* baik pemerintah pusat, pemerintah daerah, badan usaha dan masyarakat. Tujuan pemanfaatan sumberdaya yang tersedia di DAS juga dapat berbeda-beda. Kondisi ini menggambarkan kompleksnya pengelolaan suatu wilayah DAS.

Tabel (Table) 3. Elemen kendala dan permasalahan dalam pengelolaan DAS (*Elements of constraints and problems in watershed management*)

No	Sub Elemen Masalah/Kendala dalam Pengelolaan DAS
1	Peningkatan luas lahan kritis pada wilayah DAS (E1)
2	Terjadinya pencemaran sungai (E2)
3	Kurangnya kemampuan masyarakat dan badan usaha dalam pengelolaan lingkungan (E3)
4	Masih kurangnya koordinasi antar-stakeholder dalam pengelolaan daerah aliran sungai (E4)
5	Rencana tata ruang wilayah (RTRW) belum dijadikan belum tersedia dan/atau arahnya belum dijadikan pedoman dalam pemanfaatan ruang DAS (E5)
6	Mahalnya biaya konservasi DAS dan alokasi anggaran yang masih kurang memadai (E6)
7	Dukungan kebijakan dan peraturan dalam pengelolaan DAS masih belum tersedia dan/atau tumpang tindih termasuk kewenangan lembaga/instansi terkait (E7)
8	Penegakan hukum (law enforcement) belum dilakukan (E8)
9	Erosi, longsor dan sedimentasi yang mengancam pendangkalan sungai (E9)
10	Belum adanya kelembagaan yang melibatkan semua pihak dalam pengelolaan DAS (E10)
11	Kurangnya kepedulian dan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sungai (E11)

Sumber (Source): Hasil diskusi pakar 2023 (*Results of experts discussions 2023*)

Sebagai upaya perumusan prioritas kebijakan pengelolaan ketiga DAS tersebut dilakukan identifikasi kendala dan permasalahan berdasarkan perspektif dari pakar. Hasil identifikasi tersebut, kemudian dilakukan strukturisasi dan pemetaan agar permasalahan yang kompleks dapat dirancang alternatif solusi yang memungkinkan bagi pengambil kebijakan. Identifikasi elemen kendala dan permasalahan pengelolaan DAS Bengkulu dilakukan melalui diskusi dan wawancara dengan pakar yang terkait dengan pengelolaan DAS. Beberapa pakar yang terlibat sebanyak 7 orang meliputi akademisi, pemerintah, PDAM, tokoh masyarakat. Elemen kendala dan permasalahan yang teridentifikasi disajikan pada Tabel 3. Dalam pengelolaan DAS elemen-elemen tersebut saling terkait dan pada akhir berimplikasi pada penyediaan air bersih di Kota Bengkulu.

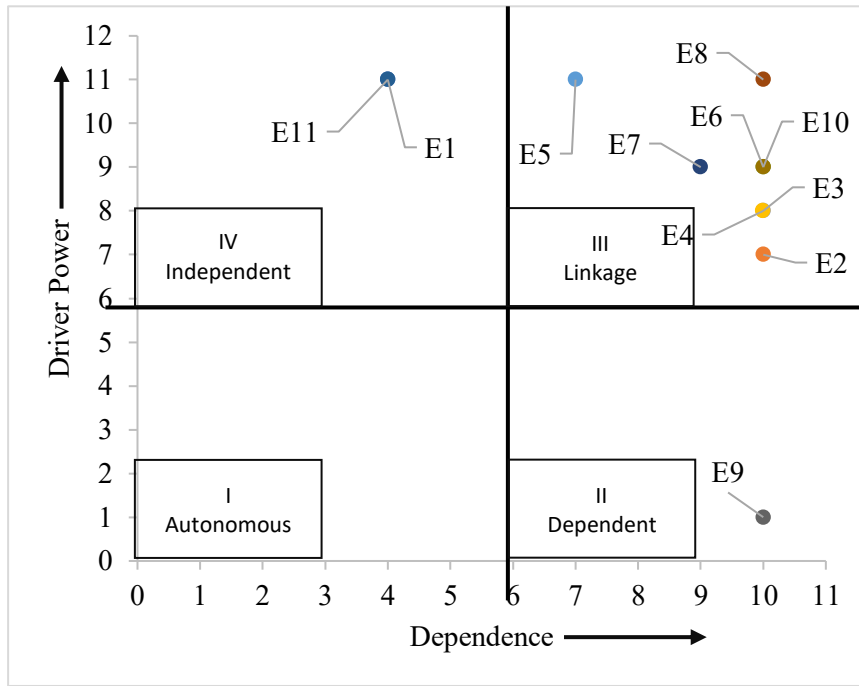
Berdasarkan hasil analisis *Interpretive Structural Modelling* diperoleh gambaran mengenai struktur kendala dan permasalahan dalam pengelolaan DAS Bengkulu. Hubungan kontekstual antar sub-elemen kendala dan permasalahan akan berkontribusi atau menyebabkan sub elemen kendala yang lain. Kendala dan permasalahan utama dalam pengelolaan DAS sub-elemen yang masuk dalam kuadran *independent* memiliki pengaruh besar terhadap sub-elemen lain. Sedangkan sub-elemen yang berada pada kuadran *dependent* dan *linkage* sangat dipengaruhi oleh faktor yang berada pada kuadran *independent*. Berdasarkan Gambar 11, dapat diketahui bahwa beberapa kendala dan permasalahan

terdapat pada kuadran *independent* yaitu kurangnya kepedulian dan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sungai (E11), terjadinya peningkatan luas lahan kritis pada wilayah DAS (E1); Rencana Tata Ruang (RTR) DAS belum tersedia dan/atau arahnya belum dijadikan pedoman dalam pemanfaatan ruang daerah tersebut (E5); dan penegakan hukum (*law enforcement*) belum dilakukan (E8). Keempat sub-elemen tersebut berada di kuadran *independent*, memiliki *driver power* yang tinggi dengan tingkat *dependence* rendah.

Sub-elemen kendala tersebut memberikan kontribusi yang tinggi terhadap sub-elemen kendala dan permasalahan lain sehingga elemen ini perlu menjadi prioritas untuk dikelola pada jangka pendek. Selain itu, perubahan yang terjadi dalam sub-elemen ini dapat mempengaruhi sub-elemen kendala yang lain. Pengelolaan jangka pendek perlu lebih memprioritaskan pada faktor-faktor *independent* tersebut. Sebagaimana diketahui kondisi tutupan lahan sangat terkait erat dengan sistem hidrologi. Peningkatan lahan kritis akibat pembukaan lahan pada bagian hulu DAS dapat menyebabkan *cathment area* tidak dapat berfungsi lagi sebagai pengatur tata air maupun penunjang lingkungan. Prioritas berikutnya yang perlu dilakukan adalah sub-elemen terkait dengan mahalnya biaya konservasi DAS dan alokasi anggaran yang masih kurang memadai (E6), dukungan kebijakan dan peraturan dalam pengelolaan DAS masih belum tersedia dan/atau tumpang tindih termasuk kewenangan lembaga/instansi terkait (E7);

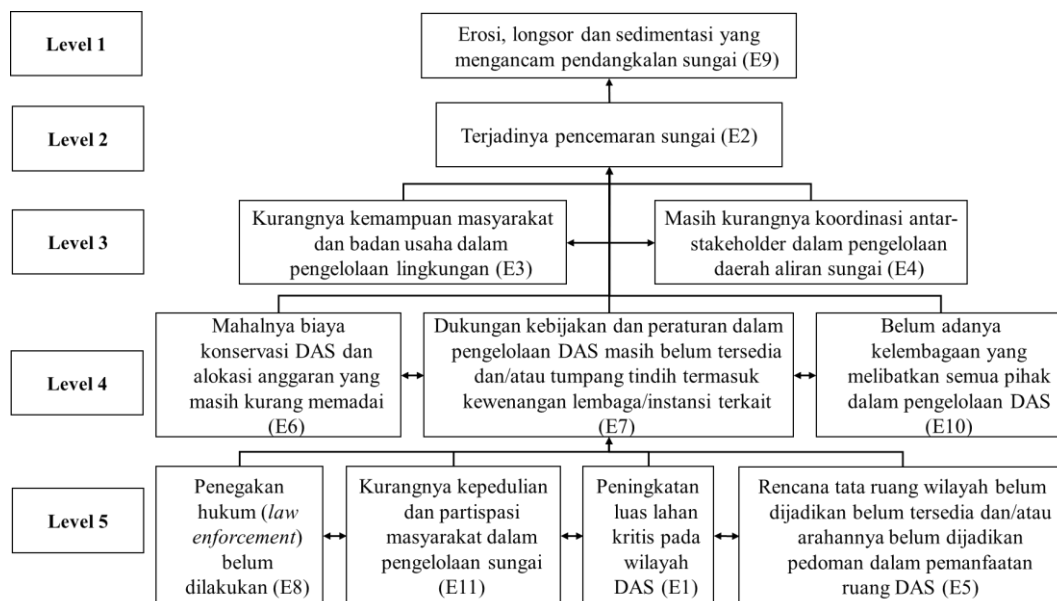
belum adanya kelembagaan yang melibatkan semua pihak dalam pengelolaan DAS (E10); kurangnya kemampuan masyarakat dan badan usaha dalam pengelolaan lingkungan (E3), masih

kurangnya koordinasi antar-stakeholder dalam pengelolaan daerah aliran sungai (E4), terjadinya pencemaran sungai (E2); dan erosi, longsor dan sedimentasi yang mengancam pendangkalan sungai (E9).



Gambar (Figure) 11. Matriks driver power-dependence Sub-elemen kendala dan permasalahan pengelolaan DAS (Power-dependency driver matrix of Sub-elements of constraints and problems in watershed management)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)



Gambar (Figure) 12. Matriks driver power-dependence Sub-elemen kendala dan permasalahan pengelolaan DAS (Power-dependence driver matrix of Sub-elements of constraints and problems in watershed management)

Sumber (Source): Pengolahan data 2023 (Data analysis 2023)

Kendala dan permasalahan pada kuadran II memiliki tingkat ketergantungan yang tinggi dan dipengaruhi oleh sub elemen kendala lainnya. Matriks yang menggambarkan hierarki tahapan pengelolaan DAS secara berjangka yang dihasilkan analisis ISM disajikan pada Gambar 12. Hierarki tersebut menunjukkan bahwa level 5 memiliki daya dorong (*driver power*) yang tinggi dan tingkat ketergantungan yang rendah. Sub-elemen pada level ini menjadi prioritas untuk dikelola karena dapat memengaruhi sub-elemen pada bagian atas (level 4), kemudian akan mempengaruhi level 3 dan seterusnya.

Tujuan utama dari pengelolaan DAS adalah untuk menjaga fungsi sistem hidrologi sehingga sungai sebagai salah satu sumber air bagi wilayah bagian hilir dapat terpenuhi secara berkelanjutan. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perilaku debit sangat terkait dengan penggunaan lahan atau perubahan tutupan lahan DAS (Kayitesi et al., 2022; Koneti, Sunkara, & Roy, 2018; Meneses, Reis, Vale, & Saraiva, 2015). Batasan wilayah pengelolaan yang diatur berbasis ekologi DAS dengan melibatkan semua wilayah administrasi terkait. RTR ini dapat menjadi acuan dan secara operasional perlu diintegrasikan kedalam RTRW kabupaten/kota terkait. Dengan demikian arahan penggunaan lahan dan pola ruang dapat disesuaikan dengan berdasarkan fungsinya.

Selain itu, kendala yang masih dihadapi adalah kepedulian dan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan wilayah DAS sangat terkait dengan terjadinya

pencemaran sungai. Pada bagian hulu sungai terdapat berbagai penggunaan lahan seperti: permukiman, industri/pabrik, pertambangan, pertanian/peternakan dan industri kecil lainnya. Kesemuanya aktivitas antropogenik tersebut berpotensi sebagai sumber pencemaran baik *point-source* maupun *non-point source* (Jaikawna & Pagdee, 2022; Wilson, 2015). Untuk itu, strategi ke depan diperlukan upaya konservasi untuk mempertahankan pertumbuhan sosial ekonomi dan keberlanjutan ekologi serta perlu melakukan manajemen permintaan air (Xiao-Jun et al., 2011). Selain itu, dalam pengelolaan DAS diperlukan upaya untuk mempertahankan kawasan agar tetap bervegetasi serta diperlukan koordinasi pengelolaan sumber daya air antara para pemangku kepentingan (Surya, Purwanto, Sapei, & Widiatmaka, 2015).

Berdasarkan kendala dan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, diperlukan upaya serius pemerintah untuk menyusun kebijakan pengelolaan DAS secara terintegrasi. Bertolak dari kondisi tersebut, beberapa alternatif kebijakan yang dapat diusulkan, antara lain melakukan upaya konservasi dan perlindungan terhadap kawasan yang ada di bagian hulu. Hal ini sesuai sejalan dengan beberapa kajian yang dilakukan sebelumnya menunjukkan pentingnya kawasan perlindungan di bagian hulu (BPDASHL Ketahun, 2011; Haryani, Baskoro, & Hidayat, 2023). Memastikan agar struktur penggunaan lahan dapat mendukung konservasi DAS. Kawasan kritis umumnya disebabkan oleh adanya

pembukaan lahan tidak terkendali, tanah terbuka yang menyebabkan terjadinya erosi sehingga lahan tidak berfungsi dengan baik dalam tata air. Pelestarian kawasan hutan peran penting dalam pengaturan sumber daya air pada suatu DAS (Aladejana, Salami, & Adetoro, 2018; Kundu, Khare, & Mondal, 2017). Rencana Tata Ruang (RTR) berbasis DAS yang dapat menjadi acuan bagi semua pihak. Selain itu pemerintah perlu melakukan reboisasi atau penghijauan lingkungan untuk mempertahankan kawasan bervegetasi pada seluruh areal DAS terutama pada bagian hulu; melakukan penanaman hutan dan tanaman dalam bentuk agroforestry. Kegiatan ini diharapkan dapat selain memberikan manfaat ekonomi kepada masyarakat juga tetap memiliki fungsi konservasi.

#### IV. KESIMPULAN

Pada periode 1990-2020 telah terjadi perubahan penggunaan lahan DAS Bengkulu berupa penurunan Hutan Lahan Kering Sekunder dan terdapat perubahan lahan dari semak belukar menjadi pertanian lahan kering kemudian menjadi pertambangan. Selain itu, debit andalan Sungai Bengkulu dengan probabilitas 90% menunjukkan potensi ketersediaan air yang cukup besar dan masih dapat memenuhi kapasitas terpasang pengolahan air baku di Kota Bengkulu. Nilai nisbah antara debit maksimum dan debit minimum setiap tahun cukup fluktuatif namun adanya tren peningkatan yang mengindikasikan bahwa kondisi DAS mulai terganggu akibat adanya perubahan iklim global dan perubahan tutupan lahan dari hutan menjadi non hutan. Selanjutnya

elemen kendala dan permasalahan yang perlu menjadi prioritas utama dalam pengelolaan DAS yang terdapat pada kuadran *independent* yaitu (i) terjadinya pencemaran sungai; (ii) peningkatan luas lahan kritis pada wilayah DAS; (iii) erosi, longsor dan sedimentasi yang mengancam pendangkalan sungai; dan (iv) Rencana Tata Ruang (RTR) DAS belum tersedia dan/atau arahnya belum dijadikan pedoman dalam pemanfaatan ruang daerah tersebut. Beberapa rekomendasi kebijakan yang perlu dilakukan yaitu: integrasi rencana tata ruang dan rencana pengelolaan DAS lintas pemda dan lintas sektor sebagai acuan pengelolaan SDA; melakukan reboisasi atau penghijauan lingkungan untuk mempertahankan kawasan bervegetasi; melakukan penanaman hutan dan tanaman dalam bentuk agroforestry.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih antara lain kepada Kepala BPDAS-HL Ketahun Bengkulu, Direktur Bina Teknik Sumber Daya Air, Kementerian PUPR atas dukungan data yang diberikan dalam penelitian ini.

#### KONTRIBUSI

IK: Mengonsep, menulis, mengumpulkan data, dan menganalisis. AS: Membuat konsep, mengoreksi dan meninjau ulang. SH: Membuat konsep, mengoreksi dan meninjau ulang. EA: Membuat konsep, mengoreksi dan meninjau ulang.

#### DAFTAR PUSTAKA

Aghsaei, H., Dinan, N. M., Moridi, A., Asadolahi, Z., Delavar, M., Fohrer, N., &

- Wagner, P. D. (2020). Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran. *Science of the Total Environment*, 712(136449), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136449>
- Al Amin, M. B., Toyfur, M. F., Fransiska, W., & Marlina, A. (2020). Delineasi DAS dan Elemen Model Hidrologi Menggunakan HEC-HMS Versi 4.4. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 9(1), 33–38. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v9i1.37>
- Aladejana, O. O., Salami, A. T., & Adetoro, O.-I. O. (2018). Hydrological responses to land degradation in the Northwest Benin Owena River Basin, Nigeria. *Journal of Environmental Management*, 225, 300–312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.095>
- Alcamo, J. (2019). Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.11.005>
- Arnop, O., Budiyanto, & Rustama. (2019). Kajian evaluasi mutu Sungai Nelas dengan metode Storet dan Indeks Pencemaran. *Jurnal Naturalis*, 8(1), 15–24.
- Asdak, C. (2010). *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- BPDASHL Ketahun, [Balai Pengelolaan DAS dan Hutan Lindung Ketahun]. (2011). *Naskah Rencana Pengelolaan DAS terpadu DAS Bengkulu*. Bengkulu [ID]: BPDASHL Ketahun.
- BPS, [Badan Pusat Statistik]. (2020). *Provinsi Bengkulu Dalam Angka 2020*. Bengkulu [ID]: Badan Pusat Statistik.
- Budiyanto, S., Tarigan, S. D., Sinukaban, N., & Murtiaksono, K. (2015). The Impact of Land Use on Hydrological Characteristics in Kaligarang Watershed. *International Journal of Science and Engineering*, 8(2), 125–130. <https://doi.org/10.12777/ijse.8.2.125-130>
- Camara, M., Jamil, N. R., & Fikri, A. B. A. (2019). Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review. *Ecological Processes*, 8(10), 1–10.
- Chen, X., Lee, R. M., Dwivedi, D., Son, K., Fang, Y., Zhang, X., ... Scheibe, T. D. (2021). Integrating field observations and process-based modeling to predict watershed water quality under environmental perturbations. *Journal of Hydrology*, 602(125762), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125762>
- Dhaouadi, S., Kefi, M., Tarkhani, W., Stambouli, T., & Chkirbene, A. (2020). Assessment of the impact of land-cover change on water quality: case study of the Chiba watershed, Nabeul, Tunisia. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(57), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00195-7>
- Gao, Y., Chen, J., Luo, H., & Wang, H. (2020). Prediction of hydrological responses to land use change. *Science of The Total Environment*, 708, 134998. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134998>
- Guzha, A. C., Rufino, M. C., Okoth, S., Jacobs, S., & Nóbrega, R. L. B. (2018). Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 49–67.

- <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>
- Haryani, W. A., Baskoro, D. P. T., & Hidayat, Y. (2023). Analisis perubahan penggunaan lahan di DAS Batang Tabir Kabupaten Merangin, Provinsi Jambi. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, 7(1), 89–104. <https://doi.org/10.59465/jppdas.2023.7.1.89-104>
- Hermawan, E. (2010). Pengelompokan Pola Curah Hujan yang Terjadi di Beberapa Kawasan P. Sumatera Berbasis Hasil Analisis Teknik Spektral. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 11(2). <https://doi.org/10.31172/jmg.v11i2.67>
- Izzatuddinillah, I., Barus, B., & Rachman, L. M. (2023). Analisis Penggunaan Lahan dan Pola Ruang Berbasis Koefisien Regim Aliran (KRA) pada DAS Air Bengkulu. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 25(2), 56–63. <https://doi.org/10.29244/jitl.25.2.56-63>
- Jaikawna, H., & Pagdee, A. (2022). Relationships between land use patterns and water quality in the Pong River Basin, Northeast Thailand. *EnvironmentAsia*, 15(2), 75–85. <https://doi.org/10.14456/ea.2022.35>
- Kabeja, C., Li, R., Guo, J., Rwatangabo, D. E. R., Manyifika, M., Gao, Z., ... Zhang, Y. (2020). The impact of reforestation induced land cover change (1990-2017) on flood peak discharge using HEC-HMS hydrological model and satellite observations: A study in two mountain Basins, China. *Water (Switzerland)*, 12(5), 1–22. <https://doi.org/10.3390/W12051347>
- Kayitesi, N. M., Guzha, A. C., & Mariethoz, G. (2022). Impacts of land use land cover change and climate change on river hydro-morphology- a review of research studies in tropical regions. *Journal of Hydrology*, 615, 128702. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128702>
- Koneti, S., Sunkara, S. L., & Roy, P. S. (2018). Hydrological Modeling with Respect to Impact of Land-Use and Land-Cover Change on the Runoff Dynamics in Godavari River Basin Using the HEC-HMS Model. *International Journal of Geo-Information*, 7(206). <https://doi.org/10.3390/ijgi7060206>
- Kumar, Arun., Singh, R., Jena, P. P., Chatterjee, C., & Mishra, A. (2015). Identification of the best multi-model combination for simulating river discharge. *Journal of Hydrology*, 525, 313–325. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.060>
- Kumar, Ashok, & Singh, V. (2019). Overview of Interpretive Structural Modeling. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 04(05), 536–540. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2019.v04i05.078>
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Past, present and future land use changes and their impact on water balance. *Journal of Environmental Management*, 197, 582–596. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.018>
- Mananoma, T., Ratu, Y. A., & Moningka, F. M. I. (2024). Analysis of Flood Incidents in Manado City due to Rainfall Fluctuations (Case Study of the Tondano Watershed), Indonesia. *The Open Civil Engineering Journal*, 18(1). <https://doi.org/10.2174/0118741495353862241029214222>
- Meneses, B. M., Reis, R., Vale, M. J., & Saraiva, R. (2015). Land use and land

- cover changes in Zêzere watershed (Portugal) — Water quality implications. *Science of the Total Environment*, 527–528, 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.092>
- Muis, B. A. (2019). Impact of land use change on hydrological response of Krueng Aceh Watershed in Aceh Province, Indonesia. *Nature Environment and Pollution Technology*, 18(4), 1275–1281.
- PT PLN (Persero), [PT Perusahaan Listrik Negara]. (2019). *Studi Banjir dan Genangan Air DAS Musi di Desa Air Hitam dan Desa Tanjung Alam serta Rekomendasi Tindak Lanjut dalam Mengurangi Tingkat Genangan*.
- Ranjan, S., & Singh, V. (2022). HEC-HMS based rainfall-runoff model for Punpun river basin. *Water Practice and Technology*, 17(5), 986–1001. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.033>
- Rápalo, L. M. C., Uliana, E. M., Moreira, M. C., da Silva, D. D., de Melo Ribeiro, C. B., da Cruz, I. F., & dos Reis Pereira, D. (2021). Effects of land-use and -cover changes on streamflow regime in the Brazilian Savannah. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38(100934), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100934>
- Satmaidi, E., Muthia, A. A., & Wulandari. (2018). Konsep hukum pengelolaan tambang batubara berkelanjutan berdasarkan pendekatan daerah aliran sungai (DAS) di Provinsi Bengkulu. *Jurnal Bina Hukum Lingkungan*, 2(2), 198–241. <https://doi.org/10.24970/jbhl.v2n2.16>
- Seelen, L. M. S., Flaim, G., Jennings, E., & De Senerpont Domis, L. N. (2019). Saving water for the future: Public awareness of water usage and water quality. *Journal of Environmental Management*, 242, 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.047>
- Shamsuzzoha, A., & Piya, S. (2020). Identification and analysis of the driving factors for product modularity by interpretive structural modelling. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 17(4), 1–24.
- Simonovic, S. P. (2020). Systems approach to management of water resources—toward performance based water resources engineering. *Water (Switzerland)*, 12, 1–16. <https://doi.org/10.3390/w12041208>
- Supriyono, Citra, F. W., Sulisty, B., & Barchia, M. F. (2017). Estimasi perubahan tutupan lahan untuk deteksi erosi tanah di catchment area DAS Sungai Bengkulu dengan menggunakan citra Landsat. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Geografi FKIP UMP 2017*, 110–122. Purwokerto.
- Surya, R. A., Purwanto, M. Y. J., Sapei, A., & Widiatmaka. (2015). Analisis Kebijakan Pengelolaan Air Baku Berkelanjutan di Sub DAS Konawe Kabupaten Konawe Sulawesi Tenggara. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*, 12(3), 263–282. <https://doi.org/10.20886/jakk.2015.12.3.263-282>
- Tahiru, A. A., Doke, D. A., & Baatuuwie, B. N. (2020). Effect of land use and land cover changes on water quality in the Nawuni Catchment of the White Volta Basin, Northern Region, Ghana. *Applied Water Science*, 10(198), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01272-6>
- Triatmodjo, B. (2022). *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Ullah, K. A., Jiang, J., & Wang, P. (2018). Land use impacts on surface water quality by statistical approaches. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(2), 231–250.

<https://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.02.010>

- Wilson, C. O. (2015). Land use/land cover water quality nexus: quantifying anthropogenic influences on surface water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(424), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4666-4>
- Wiryono, Senoaji, G., & Hidayat, M. F. (2013). *Studi daya tampung dan daya dukung lingkungan daerah aliran sungai (DAS) Air Bengkulu*. Bengkulu [ID].
- Xiao-Jun, W., Jian-Yun, Z., Elmahdi, A., Rui-Min, H., Li-Ru, Z., & Chen, F. (2011). Water demand forecasting under changing environment: A System Dynamics approach. *IAHS-AISH Publication*, 347(July), 259–266.
- Yuliasman, Y. (2022). *Evaluasi pengaruh perubahan penggunaan lahan dan curah hujan terhadap debit aliran sungai di sub DAS Cisangkuy*. IPB University.
- Yuono, A. L., Putranto, D. D. A., & Tukirun, S. (2020). Effect of Land Use Changes of Upstream Komerling Sub Watershed on Declining Water Availability. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 126–130.
- Zeleeuw, D. G., & Melesse, A. M. (2018). Applicability of a spatially semi-distributed hydrological model for watershed scale runoff estimation in Northwest Ethiopia. *Water (Switzerland)*, 10(7), 10–12. <https://doi.org/10.3390/w10070923>

Halaman ini sengaja di kosongkan