

# HIDROLOGI



Ir Meylis Safriani, S.T., M.T. | Ir. Arsyad, S.T., M.T. | Ir. M. Agusalam, S.T., M.T. | Dr. Ir. H. Apriyanto, M.Si., M.M.  
Ir. Zulharnah, M.T. | Amalia Nurdin, S.T., M.T. | Fitry Hasdanita, S.T., M.T. | Suprpti, S.T., M.T.  
Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng | Dr. Ir. Imam Rohani, S.T., M.T. | Fachruddin, S.T.P., M.Si

Editor: Weni Yuliani, S.Si., M.M., C.Ed

# HIDROLOGI

## Penulis:

Ir. Meylis Safriani, S.T., M.T

Ir. Arsyad, S.T., M.T

Ir. M. Agusalim, S.T., M.T

Dr. Ir. H. Apriyanto, S.E., M.Si., M.M

Ir. Zulharnah, M.T

Amalia Nurdin, S.T., M.T

Fitry Hasdanita, S.T., M.T

Suprapti, S.T., M.T

Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng

Dr. Ir. Imam Rohani, S.T., M.T

Fachruddin, S.TP., M.Si

**Editor:** Weni Yuliani, S.Si., M.M., C.Ed



**LINGKAR EDUKASI INDONESIA**

# HIDROLOGI

## Penulis:

Ir. Meylis Safriani, S.T., M.T  
Ir. Arsyad, S.T., M.T  
Ir. M. Agusalm, S.T., M.T  
Dr. Ir. H. Apriyanto, S.E., M.Si., M.M  
Ir. Zulharnah, M.T  
Amalia Nurdin, S.T., M.T  
Fitry Hasdanita, S.T., M.T  
Suprapti, S.T., M.T  
Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng  
Dr. Ir. Imam Rohani, S.T., M.T  
Fachruddin, S.TP., M.Si

---

**Editor:** Weni Yuliani, S.Si., M.M., C.Ed

**Penyunting:** Madina Chairunnisa, S.Pd

**Desain Sampul dan Tata Letak:** Neza Sartika

---

## Diterbitkan oleh:

Lingkar Edukasi Indonesia  
Anggota IKAPI No. 058/SBA/2024  
Kolam Janiah, Nagari Kudu Ganting  
Kec. V Koto Timur, Kabupaten Padang Pariaman  
Email: [lingkaredukasiindonesia.id@gmail.com](mailto:lingkaredukasiindonesia.id@gmail.com)  
Website: [www.lingkaredukasiindonesia.com](http://www.lingkaredukasiindonesia.com)

---

**ISBN: 978-634-7159-10-6**

---

Cetakan pertama, Maret 2025

---

© Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang keras memperbanyak, memfotokopi, Sebagian atau seluruh isi  
buku tanpa izin tertulis dari penerbit.

# KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, buku *Hidrologi* ini dapat terselesaikan dan dipublikasikan. Buku ini hadir sebagai sebuah usaha untuk memberikan pemahaman dasar yang komprehensif mengenai hidrologi, ilmu yang mempelajari pergerakan, distribusi, dan kualitas air di bumi serta hubungan air dengan lingkungan sekitarnya.

Seiring dengan semakin pentingnya pengelolaan sumber daya alam, khususnya air, dalam kehidupan manusia, buku ini diharapkan dapat menjadi panduan yang bermanfaat bagi mahasiswa, praktisi, serta peneliti yang tertarik untuk memahami lebih dalam tentang hidrologi. Berbagai topik yang dibahas dalam buku ini, seperti siklus hidrologi, curah hujan, aliran sungai, serta analisis hidrologi, diharapkan dapat memberikan wawasan yang berguna dalam aplikasi nyata, baik di bidang teknik, lingkungan, maupun kebijakan pengelolaan air.

Proses penyusunan buku ini melibatkan riset dan referensi dari berbagai sumber, dengan tujuan agar pembaca mendapatkan pengetahuan yang up-to-date dan relevan dengan perkembangan terbaru di bidang hidrologi. Setiap bab disusun secara terstruktur dan mudah dipahami, dilengkapi dengan contoh soal, studi kasus, serta ilustrasi yang mendukung pemahaman konsep-konsep yang dibahas.

Kami menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu, kami sangat mengharapkan masukan dan saran konstruktif dari para pembaca guna penyempurnaan lebih lanjut. Semoga buku ini dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu hidrologi, serta bermanfaat bagi

semua pihak yang berkepentingan dalam pengelolaan sumber daya air secara bijak dan berkelanjutan.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya bagi pembaca.

Aceh, Maret 2025

**Penulis**

# DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>ix</b>
<b>BAB 1 PENGERTIAN HIDROLOGI DAN PENGGUNAANNYA....</b>	<b>1</b>
<b>Oleh Ir. Meylis Safriani, S.T., M.T .....</b>	<b>1</b>
A. Pendahuluan.....	1
B. Hidrologi dalam Perspektif Historis.....	3
C. Perkembangan Hidrologi sebagai Ilmu Pengetahuan .....	5
D. Siklus Hidrologi .....	8
E. Penggunaan Hidrologi dan Aplikasinya.....	13
F. Kesimpulan .....	16
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>17</b>
<b>BAB 2 DEFINISI HUJAN .....</b>	<b>19</b>
<b>Oleh Ir. Arsyad, S.T., M.T.....</b>	<b>19</b>
A. Pendahuluan.....	19
B. Proses Terbentuknya Hujan .....	21
C. Jenis-Jenis Hujan .....	26
D. Manfaat dan Tantangan Hujan dalam Hidrologi Terapan .....	32
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>36</b>

<b>BAB 3 ANALISIS DATA HUJAN .....</b>	<b>37</b>
<b>Oleh Ir. M. Agusalim, S.T., M.T .....</b>	<b>37</b>
A. Pendahuluan .....	37
B. Pengukuran Hujan .....	38
C. Curah Hujan Maksimum Harian Rata-rata .....	43
D. Analisa Hujan Rata-rata Derah.....	44
E. Metode Estimasi Data Hujan yang Hilang.....	56
F. Teori Uji Konsistensi Data .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>64</b>
<b>BAB 4 EVAPORASI DAN TRANSPIRASI: PENGARUH TERHADAP KETERSEDIAAN AIR.....</b>	<b>65</b>
<b>Oleh Dr. Ir. H. Apriyanto, S.E., M.Si., M.M .....</b>	<b>65</b>
A. Pengertian Evaporasi dan Transpirasi .....	65
B. Keterkaitan Evaporasi, Transpirasi, dan Ketersediaan Sumber Daya Air .....	69
C. Tantangan dalam Mengelola Evaporasi dan Transpirasi untuk Ketahanan Air .....	72
D. Evaporasi dan Transpirasi dalam Konteks Pengelolaan Sumber Daya Air di Daerah Tropis.....	77
E. Evaporasi dan Transpirasi dalam Konteks Kebijakan Pengelolaan Sumber Daya Alam.....	81
F. Peran Evaporasi dan Transpirasi dalam Ketahanan Air Global .....	85
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>89</b>

<b>BAB 5 PRESIPITASI: JENIS, POLA, DAN PENGUKURAN CURAH HUJAN .....</b>	<b>95</b>
<b>Oleh Ir. Zulharnah, M.T .....</b>	<b>95</b>
A. Pendahuluan.....	95
B. Jenis-Jenis Presipitasi.....	96
C. Pola Presipitasi .....	102
D. Pengukuran Curah Hujan .....	104
E. Kesimpulan .....	106
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>108</b>
<b>BAB 6 INFILTRASI DAN PERKOLASI .....</b>	<b>111</b>
<b>Oleh Amalia Nurdin, S.T., M.T .....</b>	<b>111</b>
A. Pendahuluan.....	111
B. Proses <i>Infiltrasi</i> .....	114
C. Faktor-faktor yang mempengaruhi <i>infiltrasi</i> .....	114
D. Metode pengukuran infiltrasi .....	116
E. Perkolasi: Gerakan Air di Lapisan Bawah .....	120
F. Dampak <i>Infiltrasi</i> dan Perkolasi.....	124
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>126</b>
<b>BAB 7 ALIRAN PERMUKAAN DAN DRAINASE: DINAMIKA ALIRAN DI PERMUKAAN BUMI.....</b>	<b>129</b>
<b>Oleh Fitry Hasdanita, S.T., M.T .....</b>	<b>129</b>
A. Pendahuluan.....	129
B. Aliran Permukaan.....	130
C. <i>Drainase</i> .....	137

<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>142</b>
<b>BAB 8 AKUIFER DAN AIR TANAH: SUMBER DAYA DAN PEMANFAATAN AIR BAWAH PERMUKAAN .....</b>	<b>145</b>
<b>Oleh Suprapti, S.T., M.T .....</b>	<b>145</b>
A. Pendahuluan .....	145
B. Air tanah dan akuifer .....	146
C. Pemanfaatan air tanah dan permasalahannya .....	153
D. Konservasi air tanah .....	155
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>157</b>
<b>BAB 9 BANJIR DAN KEKERINGAN: DINAMIKA HIDROLOGIS DAN MANAJEMEN RISIKO .....</b>	<b>159</b>
<b>Oleh Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng .....</b>	<b>159</b>
A. Pendahuluan .....	159
B. Dinamika Hidrologis Banjir dan Kekeringan.....	162
C. Strategi Manajemen Risiko Banjir .....	173
D. Strategi Manajemen Risiko Kekeringan .....	183
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>190</b>
<b>BAB 10 HIDROLOGI SUNGAI: ALIRAN, DEBIT, DAN KESEIMBANGAN AIR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI</b>	<b>195</b>
<b>Oleh Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng .....</b>	<b>195</b>
A. Definisi dan Konsep Dasar Hidrologi Sungai .....	195
B. Aliran Permukaan, Aliran Bawah Tanah, dan Interaksinya .....	199
C. Tujuan Studi Hidrologi Sungai .....	203
D. Faktor Pengaruh Aliran .....	209

E. Debit Sungai.....	213
F. Keseimbangan Air di Daerah Aliran Sungai (DAS) .....	215
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>219</b>
<b>BAB 11 PENGELOLAAN SUMBER DAYA AIR: KONSERVASI, PENGUNAAN BERKELANJUTAN, DAN KEBIJAKAN .....</b>	<b>223</b>
<b>Oleh Dr. Ir. Imam Rohani, ST., MT .....</b>	<b>223</b>
A. Pendahuluan.....	223
B. Konservasi Sumber Daya Air.....	224
C. Penggunaan Sumber Daya Air secara Berkelanjutan ...	230
D. Kebijakan Pengelolaan Sumber Daya Air .....	238
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>247</b>
<b>BAB 12 PERUBAHAN IKLIM DAN DAMPAKNYA TERHADAP HIDROLOGI GLOBAL.....</b>	<b>265</b>
<b>Oleh Fachruddin, S.TP., M.Si.....</b>	<b>265</b>
A. Pendahuluan.....	265
B. Perubahan Iklim Di Dunia .....	266
C. Dampaknya Terhadap Hidrologi Global .....	279
D. Proyeksi Debit Sungai .....	281
E. Kesimpulan .....	282
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>283</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>287</b>

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Siklus Hidrologi .....	11
Gambar 3. 1 <i>ARR Weighing Bucket</i> .....	41
Gambar 3. 2 <i>ARR Tipping Bucket</i> .....	42
Gambar 3. 3 ARR dengan float (Pelampung) .....	43
Gambar 3. 4 Poligon thiessen .....	47
Gambar 3. 5 Cara isoyet .....	49
Gambar 3. 6 DAS sungai Maros .....	50
Gambar 3. 7 Garis Hayal Pada DAS Maros (Tompobulu).....	51
Gambar 3. 8 Jumlah Garis Hayal Pada DAS Maros (Tompobulu) .....	52
Gambar 3. 9 Jumlah Garis Hayal Pada DAS Maros (Tompobulu) .....	53
Gambar 3. 10 Lengkung Massa Ganda.....	63
Gambar 5. 1 Prensipitasi Konvekti .....	97
Gambar 5. 2 Presipitasi Frontal .....	99
Gambar 5. 3 Presipitasi Orografik.....	101
Gambar 6. 1 Ilustrasi Proses infiltrasi.....	113
Gambar 6. 2 Ilustrasi Proses perkolasi .....	113
Gambar 6. 3 Penggunaan <i>Double Ring Infiltrrometer</i> .....	117
Gambar 6. 4 Alat <i>Double Ring Infiltrrometer</i> .....	118
Gambar 6. 5 Perbandingan Porositas Jenis Tanah .....	122

Gambar 6. 6 Proses <i>Infiltrasi</i> ke Perkolasi .....	124
Gambar 7. 1 Proses Aliran Permukaan.....	131
Gambar 7. 2 Komponen Aliran Permukaan.....	134
Gambar 7. 3 Elemen kunci LID .....	139
Gambar 8. 1 Kondisi topografi mempengaruhi muka air tanah .....	148
Gambar 8. 2 Recharge dan discharge area .....	149
Gambar 8. 3 Akuifer tidak tertekan dan akuifer tertekan.....	151
Gambar 8. 4 Akuifer bocor dan akuifer melayang .....	152
Gambar 8. 5 Cara kerja sumur artesis.....	153
Gambar 9. 1 Dampak Penyebab Kekeringan.....	168
Gambar 9. 2 Analisis dan Dampak Kombinasi Banjir dan Kekeringan .....	172
Gambar 9. 3 Analisis dan Kombinasi Pendekatan Mitigasi Risiko .....	176
Gambar 9. 4 Kombinasi Pendekatan Mitigasi Risiko .....	179
Gambar 10. 1 Faktor yang mempengaruhi Aliran sungdai dan dampaknya .....	213
Gambar 11. 1 Pemanenan air hujan (PAH).....	227
Gambar 11. 2 Konsep Desain Jaringan Irigasi Mikro dengan Sumber Air Sumur Bor.....	233
Gambar 11. 3 Kerangka Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu (IWRM) di komunitas pulau-pulau kecil.....	245
Gambar 12. 1 Laju Perubahan Curah Hujan Tahunan .....	269

# DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Perbandingan ketiga Jenis Siklus Hidrologi .....	13
Tabel 2. 1 Proses Terbentuknya Hujan.....	24
Tabel 2. 2 Karakteristik dan Dampak Jenis-jenis Hujan .....	28
Tabel 2. 3 Proses Hujan.....	30
Tabel 7. 1 Koefisien Aliran (C).....	135
Tabel 8. 1 Perkiraan jumlah air di dunia .....	145
Tabel 11. 1 Jenis-jenis teknologi digital yang dapat diterapkan dalam manajemen air diperkotaan .....	237
Tabel 11. 2 Contoh status keberlanjutan pengelolaan sumber daya air.....	239
Tabel 11. 3 Analisis resiko banjir .....	241
Tabel 12. 1 Dampak Pemanasan Global Peningkatan Intensitas Curah Hujan.....	279

# **BAB 1**

## **PENGERTIAN HIDROLOGI DAN PENGUNAANNYA**

Oleh Ir. Meylis Safriani, S.T., M.T

### **A. Pendahuluan**

Hidrologi adalah cabang ilmu geografi fisik yang mempelajari distribusi, pergerakan, dan sifat-sifat air di permukaan dan bawah permukaan bumi. Ilmu ini memainkan peran penting dalam memahami dan mengelola sumber daya air, yang merupakan kebutuhan fundamental bagi kehidupan manusia, ekosistem, dan berbagai aktivitas ekonomi. Secara etimologi, kata "*hidrologi*" berasal dari bahasa Yunani "*hydro*" yang berarti air dan "*logos*" yang berarti ilmu atau studi.

Dalam pengertian modern, hidrologi mencakup studi tentang siklus hidrologi, yang melibatkan berbagai proses fisik seperti evaporasi, kondensasi, presipitasi, infiltrasi, aliran permukaan, dan aliran bawah tanah. Selain itu, hidrologi juga mempertimbangkan dampak dari perubahan iklim, aktivitas manusia, dan faktor geologi terhadap ketersediaan serta kualitas sumber daya air (Hornberger et al., 2014; Kundzewicz et al., 2018).

Hidrologi tidak hanya berfungsi sebagai ilmu murni tetapi juga memiliki penerapan praktis yang luas. Misalnya, studi hidrologi digunakan dalam pengelolaan sumber daya air, mitigasi bencana banjir, pembangunan infrastruktur seperti

bendungan dan waduk, serta pelestarian ekosistem. Dengan menggunakan teknologi modern seperti penginderaan jauh dan model hidrologi berbasis komputer, para ilmuwan dapat memahami dan memprediksi dinamika sistem air secara lebih akurat (Beven, 2012).

Sumber daya air menghadapi tantangan yang semakin kompleks akibat perubahan iklim, urbanisasi, dan peningkatan populasi manusia. Fenomena seperti banjir, kekeringan, dan pencemaran air mencerminkan pentingnya pengelolaan air berbasis ilmu hidrologi yang komprehensif. Dalam konteks ini, hidrologi tidak hanya menjadi alat ilmiah untuk memahami sistem air, tetapi juga menjadi fondasi utama dalam merancang kebijakan dan solusi praktis yang berkelanjutan.

Penggunaan hidrologi mencakup berbagai aspek seperti pengelolaan sumber daya air, perencanaan tata ruang, mitigasi bencana, hingga pengembangan teknologi baru untuk pemantauan dan analisis data hidrologi. Dalam dunia teknik sipil, misalnya, ilmu ini menjadi dasar dalam merancang infrastruktur seperti bendungan, saluran irigasi, dan sistem drainase. Sedangkan dalam sektor pertanian, hidrologi membantu mengoptimalkan penggunaan air untuk irigasi yang efisien, sehingga mendukung ketahanan pangan global (Mays, 2011).

Perkembangan ilmu hidrologi telah memberikan kontribusi signifikan terhadap pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan. Tantangan-tantangan global, seperti perubahan iklim, urbanisasi, pertumbuhan populasi, serta eksploitasi sumber daya alam, menuntut pendekatan yang lebih komprehensif dan integratif dalam mempelajari sistem hidrologi. Fenomena seperti banjir, kekeringan, penurunan kualitas air, dan meningkatnya tekanan terhadap sumber daya

air di berbagai belahan dunia menjadi pengingat akan pentingnya ilmu ini dalam merancang kebijakan yang efektif dan solusi teknis yang adaptif.

## **B. Hidrologi dalam Perspektif Historis**

Ilmu hidrologi telah dikenal sejak zaman kuno, ketika peradaban pertama seperti Mesir, Mesopotamia, dan Lembah Sungai Indus mengandalkan air sebagai fondasi bagi pertanian dan kehidupan masyarakat. Dalam konteks ini, manusia telah lama berusaha memahami dan mengelola air melalui sistem irigasi, bendungan, dan kanal. Meskipun pengetahuan hidrologi pada masa itu lebih bersifat empiris, banyak prinsip-prinsip dasar yang ditemukan tetap relevan hingga saat ini.

Perkembangan ilmu hidrologi modern mulai terlihat pada abad ke-19 dan 20, ketika para ilmuwan mulai mengembangkan teori-teori kuantitatif tentang pergerakan air dalam sistem alam. Penggunaan teknologi, seperti sensor dan pemodelan komputer, telah membawa revolusi besar dalam memahami siklus hidrologi secara lebih mendalam dan akurat (Mays, 2011). Dengan kemajuan ini, para ilmuwan dapat mengintegrasikan data dari berbagai disiplin ilmu, seperti meteorologi, geologi, ekologi, dan teknik sipil, untuk menghasilkan solusi yang lebih baik terhadap permasalahan air.

## **Tantangan Global dalam Pengelolaan Sumber Daya Air**

Salah satu isu utama dalam pengelolaan air adalah dampak perubahan iklim. Kenaikan suhu global menyebabkan perubahan pola curah hujan, pengurangan lapisan es, dan peningkatan kejadian cuaca ekstrem. Sebagai akibatnya, wilayah tertentu mengalami kekurangan air yang parah, sementara wilayah lain menghadapi banjir yang merusak. Dalam skala global, fenomena ini telah meningkatkan tekanan terhadap

sumber daya air, yang pada akhirnya memengaruhi ketahanan pangan, kesehatan masyarakat, dan stabilitas ekonomi (IPCC, 2021).

Urbanisasi yang pesat juga memberikan tantangan besar terhadap sistem hidrologi. Pertumbuhan kota-kota besar sering kali tidak diimbangi dengan infrastruktur pengelolaan air yang memadai. Akibatnya, banyak daerah perkotaan menghadapi masalah banjir, pencemaran air, dan krisis pasokan air bersih. Selain itu, penggunaan air untuk kebutuhan industri dan domestik yang tidak efisien turut memperburuk kondisi ini (UNESCO, 2022).

Ilmu hidrologi memiliki aplikasi yang luas dalam berbagai sektor. Dalam bidang teknik sipil, misalnya, hidrologi digunakan untuk merancang infrastruktur seperti bendungan, jembatan, dan saluran drainase. Sementara itu, dalam sektor pertanian, hidrologi membantu dalam merancang sistem irigasi yang efisien dan berkelanjutan, yang sangat penting untuk ketahanan pangan global.

Di sisi lain, hidrologi juga memainkan peran penting dalam mitigasi bencana. Pemahaman yang mendalam tentang pola aliran sungai, prediksi curah hujan, dan interaksi antara air permukaan dan air tanah memungkinkan pengelolaan risiko banjir dan kekeringan secara lebih efektif. Selain itu, teknologi pemantauan dan peringatan dini berbasis hidrologi telah terbukti mampu menyelamatkan ribuan nyawa di berbagai belahan dunia (WMO, 2019).

Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan pendekatan interdisipliner dalam ilmu hidrologi. Pengintegrasian ilmu hidrologi dengan teknologi modern, seperti pemantauan satelit, pemodelan berbasis kecerdasan buatan, dan analisis data besar, memungkinkan pengelolaan

sumber daya air yang lebih efektif. Di sisi lain, kolaborasi antara berbagai disiplin ilmu, termasuk ekonomi, hukum, dan ilmu sosial, diperlukan untuk memastikan bahwa solusi teknis dapat diterapkan secara efektif dan berkelanjutan (Savenije et al., 2020).

### **C. Perkembangan Hidrologi sebagai Ilmu Pengetahuan**

Sejarah perkembangan hidrologi menunjukkan evolusi dari pendekatan kualitatif menjadi kuantitatif. Pada zaman kuno, hidrologi lebih banyak didasarkan pada observasi dan kepercayaan tradisional. Misalnya, masyarakat Mesir kuno menggunakan siklus tahunan Sungai Nil sebagai pedoman untuk kegiatan pertanian. Namun, pada abad ke-17, pemikiran ilmiah mulai memengaruhi cara manusia memahami air dan siklusnya (Chow et al., 1988).

Pada masa Yunani kuno, para filsuf seperti Thales dan Hippocrates telah mengemukakan gagasan awal mengenai siklus air, meskipun belum didukung oleh bukti empiris yang memadai. Thales, misalnya, berpendapat bahwa semua materi berasal dari air sebagai elemen dasar kehidupan. Dalam pandangan ini, air dianggap memiliki kekuatan transformatif yang mengatur alam semesta. Pada era ini, pengetahuan tentang air lebih bersifat spekulatif dan kurang didasarkan pada pengamatan ilmiah yang sistematis.

Baru pada abad ke-17 dan 18, seiring dengan kemajuan metode ilmiah, hidrologi mulai berkembang sebagai disiplin ilmu yang berbasis kuantitatif. Kontribusi penting datang dari ilmuwan seperti Pierre Perrault dan Edme Mariotte, yang mengukur aliran air di Sungai Seine untuk memahami hubungan antara curah hujan dan debit sungai. Penelitian mereka

menandai awal dari pendekatan eksperimental dalam hidrologi. Perrault menunjukkan bahwa air hujan cukup untuk menjelaskan aliran sungai, membantah pandangan tradisional bahwa air sungai berasal dari sumber bawah tanah yang tak terbatas (Perrault, 1674).

Pada abad ke-19, pengembangan hukum fisika seperti hukum Bernoulli dan hukum Darcy semakin memperkuat dasar ilmiah hidrologi. Hukum Darcy, yang diperkenalkan oleh Henry Darcy pada tahun 1856, menjadi dasar penting dalam studi aliran air tanah. Penemuan ini membuka jalan bagi pengembangan metode kuantitatif untuk mempelajari pergerakan air melalui media berpori. Selain itu, teknologi baru seperti pengukur hujan dan stasiun pemantauan aliran air mulai digunakan secara luas, memungkinkan pengumpulan data hidrologi yang lebih akurat.

Masuk ke abad ke-20, hidrologi mengalami transformasi besar dengan munculnya pemodelan matematika dan komputer. Salah satu kontribusi penting dalam periode ini adalah pengembangan metode unit hidrograf oleh Sherman pada tahun 1932. Metode ini memungkinkan perhitungan respons hidrologi suatu daerah terhadap curah hujan, yang sangat berguna untuk perencanaan banjir dan pengelolaan sumber daya air. Selain itu, penggunaan komputer pada tahun 1950-an dan 1960-an memungkinkan analisis data hidrologi dalam skala yang jauh lebih besar. Model-model seperti *Stanford Watershed Model* (SWM) menjadi alat penting dalam penelitian hidrologi modern.

Pada paruh kedua abad ke-20, hidrologi mulai mengintegrasikan disiplin ilmu lain seperti meteorologi, geologi, dan ekologi. Pendekatan interdisipliner ini memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang interaksi antara air, tanah, dan vegetasi. Misalnya, studi tentang intersepsi hujan oleh

vegetasi dan pengaruhnya terhadap aliran permukaan memberikan wawasan baru tentang hubungan antara ekosistem dan siklus hidrologi.

Kemajuan teknologi juga memberikan dampak signifikan pada perkembangan hidrologi. Pemanfaatan penginderaan jauh (*remote sensing*) dan sistem informasi geografis (SIG) pada tahun 1980-an membuka era baru dalam pemantauan dan analisis data hidrologi. Dengan teknologi ini, ilmuwan dapat memetakan distribusi air secara global, memantau perubahan tutupan lahan, dan memprediksi dampak perubahan iklim terhadap sumber daya air.

Pada abad ke-21, hidrologi semakin berkembang dengan adopsi teknologi canggih seperti kecerdasan buatan (*AI*) dan analisis data besar (*big data*). Metode-metode ini memungkinkan pemodelan yang lebih akurat dan prediksi yang lebih andal tentang pergerakan air di berbagai skala temporal dan spasial. Selain itu, penelitian terbaru juga menyoroti pentingnya memahami dampak antropogenik, seperti urbanisasi dan perubahan tata guna lahan, terhadap siklus hidrologi (Kundzewicz et al., 2018).

Hidrologi modern juga semakin fokus pada pengelolaan air yang berkelanjutan. Isu-isu seperti pengurangan risiko bencana, adaptasi terhadap perubahan iklim, dan pengelolaan air berbasis ekosistem menjadi perhatian utama. Di banyak negara, pendekatan ini diwujudkan melalui kebijakan terpadu yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta. Konsep *Integrated Water Resources Management (IWRM)* menjadi kerangka kerja utama dalam pendekatan ini, yang menggabungkan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan dalam pengelolaan air.

Dengan sejarah yang kaya dan perkembangan yang dinamis, hidrologi terus beradaptasi untuk menjawab tantangan global yang semakin kompleks. Dari pendekatan tradisional yang bersifat empiris hingga penggunaan teknologi mutakhir, ilmu ini telah membuktikan relevansinya dalam mendukung keberlanjutan sumber daya air dan ekosistem bumi. Dalam konteks ini, hidrologi tidak hanya menjadi alat ilmiah untuk memahami sistem air, tetapi juga menjadi fondasi utama dalam merancang kebijakan yang efektif dan solusi praktis yang adaptif (Goswami & O'Connor, 2007).

### **D. Siklus Hidrologi**

Siklus hidrologi, atau siklus air, adalah proses sirkulasi air secara alami di bumi melalui berbagai fase, yang melibatkan atmosfer, daratan, dan perairan. Siklus ini mendistribusikan air di seluruh planet dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Siklus hidrologi memastikan keberlanjutan sumber daya air di bumi, tetapi aktivitas manusia seperti deforestasi, urbanisasi, dan perubahan iklim dapat memengaruhi keseimbangan siklus ini.

#### **1. Komponen Siklus Hidrologi**

Siklus hidrologi terdiri dari berbagai komponen penting yang berinteraksi untuk mempertahankan pergerakan air di bumi. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai setiap komponen dalam siklus hidrologi:

##### **a. Evaporasi**

Evaporasi adalah proses di mana air di permukaan bumi, seperti lautan, sungai, dan danau, menguap menjadi uap air akibat panas dari matahari. Proses ini merupakan langkah awal dalam siklus hidrologi, di mana air berubah bentuk dari cair menjadi gas. Evaporasi dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk suhu,

kecepatan angin, dan tingkat kelembapan udara. Menurut penelitian (Hornberger et al., 2014), sekitar 90% dari uap air di atmosfer berasal dari evaporasi lautan.

b. Transpirasi

Transpirasi adalah proses penguapan air dari permukaan daun tumbuhan melalui stomata. Proses ini berkontribusi secara signifikan terhadap pelepasan uap air ke atmosfer. Bersama-sama, evaporasi dan transpirasi disebut evapotranspirasi, yang mencerminkan total penguapan air dari tanah dan vegetasi ke atmosfer.

c. Kondensasi

Setelah uap air naik ke atmosfer, ia mengalami pendinginan dan berubah menjadi butiran air kecil atau kristal es. Proses ini dikenal sebagai kondensasi. Butiran ini bergabung membentuk awan. Kondensasi adalah tahap penting karena mengubah uap air kembali ke bentuk cair dan menjadi dasar terbentuknya presipitasi (Mitsch & Gosselink, 2015).

d. Presipitasi

Presipitasi terjadi ketika butiran air atau kristal es di awan menjadi cukup besar dan berat untuk jatuh ke bumi. Bentuk presipitasi dapat berupa hujan, salju, atau hujan es, tergantung pada suhu atmosfer. Presipitasi adalah mekanisme utama yang mengembalikan air dari atmosfer ke permukaan bumi.

e. *Runoff* dan Aliran Permukaan

Air dari presipitasi yang tidak terserap oleh tanah akan mengalir di permukaan bumi menuju sungai, danau, atau lautan. Proses ini dikenal sebagai *runoff*. *Runoff* memainkan peran penting dalam pengisian badan air dan transportasi sedimen serta

nutrien. Wilayah tangkapan air atau daerah aliran sungai (DAS) adalah area di mana runoff dikumpulkan.

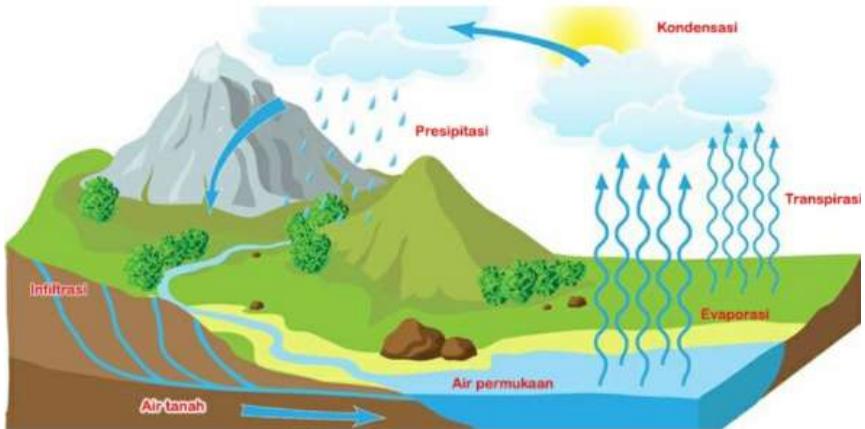
### f. Infiltrasi

Infiltrasi adalah proses di mana air dari presipitasi meresap ke dalam tanah melalui pori-pori tanah. Tingkat infiltrasi bergantung pada sifat tanah, kemiringan permukaan, dan intensitas presipitasi. Proses ini penting untuk mengisi cadangan air tanah yang diperlukan untuk kebutuhan domestik dan pertanian (Beven, 2012).

Perkolasi Setelah air masuk ke dalam tanah, ia terus bergerak lebih dalam melalui proses perkolasi, menuju akuifer atau lapisan air tanah. Perkolasi memastikan penyimpanan air bawah tanah yang stabil. Air Tanah dan Aliran Bawah Tanah Air yang tersimpan di akuifer bergerak perlahan melalui lapisan batuan dan tanah menuju sungai atau lautan. Aliran bawah tanah berfungsi sebagai penghubung antara air tanah dan badan air permukaan.

Penguapan Ulang (*Evaporation* dan *Transpiration*) Sebagian air yang telah tersimpan atau mengalir kembali ke badan air akan menguap kembali ke atmosfer, mengulangi siklus hidrologi.

Berikut ditampilkan gambar siklus hidrologi.



**Gambar 1. 1 Siklus Hidrologi**

(Sumber: Sutopo, 2012)

## 2. Jenis Siklus Hidrologi

### a. Siklus Hidrologi Pendek

Siklus ini adalah bentuk paling sederhana dan berlangsung tanpa melibatkan daratan. Prosesnya terjadi langsung antara laut atau badan air lainnya dan atmosfer. Berikut tahapan detailnya:

1. Penguapan (Evaporasi): Air dari permukaan laut menguap akibat panas matahari, berubah menjadi uap air.
2. Kondensasi: Uap air naik ke atmosfer, mendingin, dan berubah menjadi partikel kecil yang membentuk awan.
3. Presipitasi: Awan yang terbentuk menghasilkan hujan yang langsung jatuh kembali ke laut tanpa melewati daratan.

### **b. Siklus Hidrologi Sedang**

Siklus ini lebih kompleks dibandingkan siklus pendek karena melibatkan daratan sebagai bagian dari jalur sirkulasi air. Tahapan dalam siklus sedang meliputi:

1. Penguapan (*Evaporasi*): Air dari laut, sungai, atau danau menguap ke atmosfer karena panas matahari.
2. Kondensasi: Uap air membentuk awan di atmosfer.
3. Presipitasi: Hujan turun di daratan setelah awan mencapai wilayah tertentu.
4. Aliran Permukaan (*Runoff*): Sebagian air hujan yang jatuh mengalir sebagai aliran permukaan menuju sungai dan akhirnya kembali ke laut.
5. Infiltrasi: Sebagian air meresap ke dalam tanah, mengisi air tanah, sebelum akhirnya kembali ke laut.

### **c. Siklus Hidrologi Panjang**

Siklus ini merupakan bentuk paling kompleks karena mencakup lebih banyak tahapan dan waktu yang lebih lama. Siklus ini melibatkan pembentukan salju atau es di tahap presipitasi dan mencakup penyimpanan air dalam bentuk beku sebelum kembali ke laut. Berikut tahapan detailnya:

1. Penguapan (*Evaporasi*): Air dari laut atau badan air lainnya menguap ke atmosfer.
2. Kondensasi: Uap air berubah menjadi partikel es atau awan.
3. Presipitasi: Hujan atau salju turun ke daratan.
4. Penyimpanan Es/*Gletser*: Sebagian presipitasi membentuk es di daerah kutub atau pegunungan tinggi dan tertahan dalam waktu lama sebagai gletser.
5. Pergerakan *Gletser*: *Gletser* yang mencair secara perlahan mengalir menjadi aliran sungai.

6. Runoff dan Infiltrasi: Air dari *gletser*, hujan, atau aliran sungai mengalir kembali ke laut atau meresap ke dalam tanah sebagai air tanah sebelum mencapai laut.

**Tabel 1. 1 Perbandingan ketiga Jenis Siklus Hidrologi**

Aspek	Siklus Pendek	Siklus Sedang	Siklus Panjang
Jalur Sirkulasi	Laut↔Atmosfer	Laut↔Atmosfer↔Daratan	Laut↔Atmosfer↔Daratan↔Es
Kompleksitas	Rendah	Sedang	Tinggi
Durasi Waktu	Singkat	Sedang	Panjang
Penyimpanan Air	Tidak ada	Air tanah	Es dan gletser
Contoh	Hujan di tengah laut	Hujan di daratan	Salju dan gletser mencair

(Sumber: Sutopo, 2012)

## E. Penggunaan Hidrologi dan Aplikasinya

Ilmu hidrologi berperan sentral dalam pengelolaan sumber daya air yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan manusia sekaligus menjaga keberlanjutan ekosistem. Salah satu penerapan utama adalah perencanaan waduk dan bendungan. Waduk memainkan peran strategis dalam menyediakan air untuk irigasi, air minum, dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Misalnya, analisis hidrologi digunakan untuk mempelajari pola debit sungai tahunan sehingga kapasitas penyimpanan air waduk dapat dirancang secara optimal. Dalam hal ini, data curah hujan, evaporasi, serta aliran masuk dan

keluar menjadi kunci utama (Chow et al., 1988). Selain itu, distribusi air bersih juga bergantung pada pemahaman hidrologi untuk mengidentifikasi sumber air yang dapat diandalkan dan berkelanjutan, terutama di wilayah dengan tantangan geografis seperti daerah kering atau pulau terpencil.

Dalam mitigasi bencana, hidrologi menawarkan pendekatan ilmiah untuk memahami dan mengurangi risiko banjir serta kekeringan. Banjir, yang sering kali dipicu oleh curah hujan ekstrem, dapat diprediksi melalui model hidrologi berbasis DAS. Model ini memperhitungkan faktor-faktor seperti kapasitas infiltrasi tanah, kondisi vegetasi, dan perubahan penggunaan lahan. Sebagai contoh, di DAS Citarum, model hidrologi digunakan untuk memprediksi debit banjir musiman dan mengembangkan langkah-langkah pengendalian seperti pembuatan kolam retensi (Beven, 2012). Di sisi lain, kekeringan, yang disebabkan oleh defisit curah hujan jangka panjang, dapat dikelola dengan memanfaatkan data historis hidrologi untuk perencanaan cadangan air, seperti pembangunan embung atau sumur resapan.

Dalam pertanian, ilmu hidrologi mendukung perencanaan irigasi yang efisien dengan memastikan pasokan air yang cukup untuk tanaman selama musim tanam. Pemodelan evapotranspirasi, yang melibatkan penghitungan kehilangan air melalui penguapan dan transpirasi tanaman, menjadi bagian integral dari perencanaan irigasi. Contohnya, di wilayah pertanian semi-arid seperti di India bagian selatan, pemodelan hidrologi telah diterapkan untuk merancang sistem irigasi tetes yang hemat air, sehingga membantu meningkatkan produktivitas lahan sambil meminimalkan pemborosan air. Selain itu, hidrologi mendukung pengelolaan kekeringan dengan menentukan pola tanam yang sesuai, seperti memilih varietas

tanaman tahan kekeringan di daerah yang rawan kekurangan air.

Pada level perkotaan, hidrologi digunakan untuk mengatasi tantangan tata kelola air yang kompleks, terutama dalam desain sistem drainase. Urbanisasi yang pesat sering kali memperparah risiko banjir akibat meningkatnya permukaan tanah tertutup beton yang mengurangi infiltrasi air ke tanah. Dalam konteks ini, hidrologi menyediakan solusi berupa sistem drainase berbasis alam, seperti penggunaan taman hujan (*rain garden*) atau area peresapan air untuk mengurangi aliran permukaan selama hujan lebat. Hidrologi juga mendukung pengelolaan air limbah melalui analisis interaksi air limbah dengan sistem air alami, yang bertujuan untuk mengurangi kontaminasi dan melindungi kesehatan masyarakat (Viessman & Lewis, 2003).

Konservasi lingkungan menjadi aspek penting lain yang didukung oleh hidrologi. Studi hidrologi memungkinkan pelestarian ekosistem air tawar, seperti sungai, danau, dan rawa, yang berfungsi sebagai habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna. Contohnya, analisis hidrologi digunakan untuk memantau aliran dasar sungai (*baseflow*) guna memastikan kelangsungan hidup organisme akuatik selama musim kemarau (Mitsch & Gosselink, 2007). Selain itu, dalam restorasi lahan basah, data hidrologi digunakan untuk menentukan pola aliran air yang diperlukan agar lahan tersebut dapat mendukung *biodiversitas* seperti sediakala.

Dalam sektor energi, hidrologi mendukung pengembangan pembangkit listrik tenaga air dengan menyediakan data tentang potensi debit sungai dan ketinggian air yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi yang optimal. Misalnya, pembangunan PLTA besar seperti Bendungan Tiga Ngarai di China

menggunakan analisis hidrologi untuk mengukur dampaknya terhadap aliran sungai dan lingkungan sekitar.

Hidrologi juga memainkan peran krusial dalam penelitian iklim dan perubahan global. Dengan memahami interaksi antara perubahan suhu global, pola curah hujan, dan aliran air, hidrologi membantu memprediksi dampak perubahan iklim terhadap siklus hidrologi. Sebagai contoh, model iklim global seperti *Global Circulation Models* (GCMs) digunakan untuk mempelajari bagaimana peningkatan suhu bumi memengaruhi pola hujan di daerah tropis (Trenberth, 2011). Informasi ini penting untuk perencanaan adaptasi, seperti membangun infrastruktur penyimpanan air yang tahan terhadap skenario perubahan iklim.

## **F. Kesimpulan**

Hidrologi merupakan ilmu yang sangat penting untuk memahami sistem air di bumi. Dengan terus berkembangnya teknologi dan metode analisis, hidrologi akan semakin berkontribusi dalam menjawab tantangan global terkait air, seperti perubahan iklim, urbanisasi, dan pertumbuhan populasi. Pemahaman yang mendalam tentang hidrologi memungkinkan kita untuk mengelola sumber daya air secara berkelanjutan dan melindungi ekosistem yang bergantung padanya.

Perubahan iklim telah memberikan dampak signifikan terhadap dinamika hidrologi. Peningkatan suhu global, misalnya, memengaruhi pola presipitasi, penguapan, dan ketersediaan air di berbagai wilayah. Studi menunjukkan bahwa perubahan ini dapat meningkatkan risiko banjir dan kekeringan, serta memengaruhi ketersediaan air untuk kebutuhan manusia dan ekosistem. Hidrologi membantu menentukan strategi optimal untuk penggunaan dan pelestarian sumber daya air.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Goswami, D., & O'Connor, K. M. (2007). Hydrological impact of climate change. *Hydrology Research*, 38(3), 253-273. <https://doi.org/10.2166/nh.2007.005>
- Hornberger, G. M., Raffensperger, J. P., Wiberg, P. L., & Eshleman, K. N. (2014). *Elements of Physical Hydrology* (2nd ed.). Johns Hopkins University Press.
- IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., ... & Shiklomanov, I. (2018). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 3-10. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.3>
- Mays, L. W. (2011). *Water Resources Engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). Wiley.
- Shortridge, J. E., Guikema, S. D., & Zaitchik, B. F. (2016). Flood risk management in the United States: Balancing protection and resilience in a changing climate. *Water Resources Research*, 52(3), 1758-1774. <https://doi.org/10.1002/2015WR018432>
- Sutopo, P. (2012). *Prinsip-Prinsip Hidrologi*. Malang: Universitas Brawijaya Press.

- UNESCO. (2022). *World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the Invisible Visible*. United Nations World Water Assessment Programme (UNESCO-WWAP).
- Ward, R. C., & Robinson, M. (2000). *Principles of Hydrology* (4th ed.). McGraw-Hill.
- WMO. (2019). *Hydrological Status and Outlook System (HydroSOS): Framework and Implementation Plan*. World Meteorological Organization.

# **BAB 2**

## **DEFINISI HUJAN**

Oleh Ir. Arsyad, S.T., M.T

### **A. Pendahuluan**

Hujan adalah fenomena meteorologis yang sangat penting dalam siklus hidrologi, di mana air yang menguap dari permukaan bumi kembali ke tanah dalam bentuk tetesan air. Proses ini melibatkan tiga tahap utama: evaporasi, kondensasi, dan presipitasi. Evaporasi terjadi ketika air di permukaan laut, sungai, dan danau menguap karena panas matahari. Uap air ini kemudian naik ke atmosfer dan, ketika mengalami pendinginan, akan mengembun menjadi tetesan air, membentuk awan. Ketika tetesan air di dalam awan semakin besar dan berat, mereka akan jatuh ke permukaan bumi sebagai hujan. Proses ini bukan hanya penting secara ilmiah, tetapi juga memiliki dampak besar pada kehidupan di bumi (Ahrens, 2019).

Hujan memiliki peran penting dalam mendukung kehidupan di bumi. Tanpa hujan, ekosistem akan terancam karena tanaman dan hewan sangat bergantung pada keberadaan air. Hujan membantu menjaga kelembaban tanah, yang pada gilirannya mendukung pertumbuhan tanaman dan kesuburan lahan. Selain itu, hujan juga berfungsi untuk mengisi sumber daya air tawar, seperti sungai, danau, dan akuifer, yang sangat penting untuk kebutuhan air masyarakat. Dengan demikian, hujan berkontribusi pada keberlangsungan kehidupan dan produktivitas pertanian, serta menjaga keseimbangan ekosistem secara keseluruhan (Crowther, 2022).

Dalam konteks perubahan iklim, hujan memainkan peran kunci dalam pengaturan suhu global dan iklim. Hujan berfungsi sebagai mekanisme untuk mendistribusikan energi di atmosfer, membantu mengatur suhu permukaan bumi. Selain itu, perubahan pola curah hujan akibat pemanasan global dapat memengaruhi pola cuaca dan iklim di seluruh dunia. Perubahan ini dapat menyebabkan kekeringan yang lebih sering atau banjir yang lebih parah, yang dapat berdampak signifikan pada ketahanan pangan dan ketersediaan sumber daya air. Oleh karena itu, pemahaman tentang hujan dan faktor-faktor yang mempengaruhinya sangat penting dalam merencanakan strategi mitigasi untuk menghadapi tantangan perubahan iklim (BKG, 2023).

Hujan juga memiliki nilai ekonomis yang tinggi, terutama dalam sektor pertanian dan energi. Pertanian, sebagai salah satu sektor yang paling terpengaruh oleh curah hujan, sangat bergantung pada pola dan intensitas hujan untuk keberhasilan produksi tanaman. Hujan yang cukup dapat meningkatkan hasil panen, sementara kurangnya hujan dapat menyebabkan gagal panen. Selain itu, banyak negara memanfaatkan potensi energi hidrolistrik yang dihasilkan dari curah hujan yang jatuh di sungai-sungai. Ini menjadikan hujan sebagai sumber daya alam yang berharga dan berkelanjutan untuk pembangunan ekonomi (Lingkar Edukasi Indonesia, 2023).

Namun, hujan juga dapat membawa dampak negatif. Curah hujan yang tinggi dalam waktu singkat dapat menyebabkan bencana alam, seperti banjir dan tanah longsor. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun hujan adalah sumber kehidupan, kehadirannya harus dikelola dengan baik untuk menghindari kerugian yang dapat ditimbulkan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan pemantauan dan analisis terhadap pola curah hujan agar dapat merencanakan langkah-langkah

yang tepat dalam mitigasi risiko dan memanfaatkan sumber daya air secara berkelanjutan (Ahrens, 2019) dan (BMKG, 2023).

## **B. Proses Terbentuknya Hujan**

### **1. Tahap Evaporasi**

Evaporasi adalah tahap pertama dalam proses terbentuknya hujan, di mana air dari berbagai permukaan, seperti laut, danau, dan sungai, menguap dan berubah menjadi uap air. Proses ini merupakan bagian integral dari siklus hidrologi, yang memastikan perputaran air di atmosfer dan di permukaan bumi. Evaporasi terjadi ketika air di permukaan mengalami peningkatan suhu akibat panas matahari. Ketika suhu lingkungan cukup tinggi, partikel air dalam keadaan cair mendapatkan energi yang cukup untuk mengatasi gaya tarik antar molekul, sehingga mereka dapat bergerak ke atmosfer dalam bentuk uap air (Ahrens, 2019).

Beberapa faktor yang mempengaruhi laju evaporasi meliputi suhu lingkungan, intensitas sinar matahari, dan keberadaan angin. Suhu yang lebih tinggi meningkatkan laju evaporasi karena memberikan lebih banyak energi kepada molekul air untuk berubah menjadi uap. Selain itu, intensitas sinar matahari yang tinggi dapat mempercepat proses evaporasi, terutama di daerah tropis yang mendapatkan cahaya matahari secara langsung. Angin juga berperan penting dalam proses ini; kehadiran angin yang kencang dapat mengangkat uap air dari permukaan dengan cepat, sehingga meningkatkan laju penguapan. Di sisi lain, dalam kondisi lembab dengan kelembapan tinggi, laju evaporasi cenderung menurun karena udara sudah jenuh dengan uap air (Crowther, 2022).

Proses evaporasi tidak hanya terjadi di permukaan air, tetapi juga dari tanah dan tanaman melalui proses yang dikenal sebagai transpirasi. Transpirasi adalah proses di mana tanaman melepaskan uap air dari permukaan daun ke atmosfer. Gabungan dari evaporasi dan transpirasi dikenal sebagai evapotranspirasi, yang merupakan komponen penting dalam pengukuran curah hujan dan pemahaman dinamika air di suatu daerah. Secara keseluruhan, tahap evaporasi sangat penting dalam mengatur ketersediaan air dan keseimbangan ekosistem di seluruh dunia, karena ia menyuplai uap air yang diperlukan untuk pembentukan awan dan, pada akhirnya, hujan (BMKG, 2023).

## **2. Tahap Kondensasi**

Setelah uap air naik ke atmosfer melalui proses evaporasi, tahap berikutnya adalah kondensasi, di mana uap air mengalami pendinginan pada ketinggian tertentu. Ketika uap air mencapai ketinggian yang cukup tinggi, suhu udara di sekitarnya mulai menurun. Proses pendinginan ini menyebabkan uap air tidak lagi mampu mempertahankan bentuk gasnya dan mulai beralih ke fase cair. Ketika suhu udara turun di bawah titik embun, uap air mulai berkumpul menjadi tetesan air kecil yang sangat halus (BMKG, 2023).

Kondensasi ini terjadi karena adanya perubahan tekanan dan suhu yang mempengaruhi molekul-molekul air di udara. Tetesan air kecil ini sangat kecil sehingga dapat melayang di udara dan berkumpul membentuk awan. Selama proses ini, partikel-partikel kecil di atmosfer, seperti debu dan garam laut, berfungsi sebagai inti kondensasi, yang memungkinkan tetesan air untuk berkumpul lebih efisien. Semakin banyak uap air yang terakumulasi, semakin besar dan lebih tebal awan yang terbentuk.

Proses pembentukan awan sangat penting karena awan berfungsi sebagai reservoir untuk air yang akan jatuh kembali ke permukaan bumi sebagai hujan. Selain itu, awan juga memainkan peran dalam mengatur suhu dan iklim dengan memantulkan sinar matahari dan menjaga kelembaban di atmosfer. Oleh karena itu, pemahaman mengenai kondensasi dan pembentukan awan sangat penting dalam studi meteorologi dan iklim (Crowther, 2022).

### **3. Tahap Presipitasi**

Tahap presipitasi adalah fase terakhir dalam proses terbentuknya hujan, di mana tetesan air yang telah terbentuk dalam awan jatuh ke permukaan bumi. Setelah proses kondensasi, ketika uap air yang terkumpul dalam bentuk tetesan menjadi cukup besar dan berat, mereka tidak dapat lagi ditahan oleh arus udara di dalam awan. Akibatnya, tetesan air tersebut mulai jatuh ke tanah sebagai presipitasi, yang dapat berupa hujan, salju, atau embun, tergantung pada suhu dan kondisi atmosfer saat itu (Ahrens, 2019).

Dalam proses presipitasi, ukuran dan berat tetesan air menjadi faktor kunci. Tetesan air yang lebih kecil mungkin akan menguap kembali sebelum mencapai permukaan, sementara tetesan yang lebih besar akan jatuh dengan cepat. Hujan yang turun dapat bervariasi dalam intensitasnya, dari gerimis yang ringan hingga hujan lebat. Selain itu, presipitasi juga dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk suhu, kelembaban, dan kondisi meteorologis yang lebih luas, seperti pergerakan massa udara dan tekanan atmosfer. Hujan yang jatuh ini sangat penting untuk mengisi

kembali sumber air tanah, danau, serta sungai, yang menjadi sumber air bagi kehidupan manusia dan ekosistem.

Proses presipitasi juga memainkan peran krusial dalam siklus hidrologi secara keseluruhan. Setelah air jatuh ke permukaan, sebagian akan mengalir ke sungai dan lautan, sementara yang lain akan meresap ke dalam tanah, memberi kelembaban pada tanah dan membantu pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, presipitasi bukan hanya sekadar proses meteorologis, tetapi juga merupakan komponen vital dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan keberlanjutan sumber daya air di bumi (Crowther, 2022).

**Tabel 2. 1 Proses Terbentuknya Hujan**

<b>Tahap</b>	<b>Deskripsi</b>
Evaporasi	Proses penguapan air dari permukaan bumi (seperti laut, sungai, danau) akibat panas matahari.
Kondensasi	Pembentukan awan di atmosfer karena pendinginan uap air hingga membentuk tetesan air kecil.
Presipitasi	Jatuhnya tetesan air dari awan ke permukaan bumi sebagai hujan setelah tetesan air cukup besar dan berat.

(Sumber: Lingkar Edukasi Indonesia, 2023; Meteorology Today, Ahrens, 2019)

#### **4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Pembentukan Hujan**

Proses pembentukan hujan merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh berbagai faktor atmosferis dan geofisik. Menurut penelitian oleh Sutrisno et al. (2020), terdapat beberapa faktor utama yang mempengaruhi pembentukan hujan, termasuk suhu, kelembaban, tekanan udara, topografi, dan aktivitas manusia.

Salah satu faktor utama adalah suhu. Suhu yang tinggi meningkatkan kemampuan udara untuk menampung uap air. Penelitian menunjukkan bahwa saat suhu permukaan meningkat, laju evaporasi dari lautan dan badan air lainnya juga meningkat, sehingga lebih banyak uap air tersedia di atmosfer untuk proses kondensasi. Ketika suhu menurun, uap air mulai mengembun menjadi tetesan air, yang kemudian dapat membentuk awan.

Selain suhu, kelembaban udara juga sangat penting. Kelembaban tinggi di atmosfer memfasilitasi terjadinya kondensasi, yang merupakan langkah awal dalam pembentukan awan. Penelitian menemukan bahwa daerah dengan kelembaban relatif yang tinggi cenderung mengalami curah hujan yang lebih banyak. Ini karena udara jenuh dengan uap air akan lebih mudah membentuk awan dan akhirnya presipitasi.

Tekanan udara juga memainkan peran signifikan dalam pembentukan hujan. Sistem tekanan rendah, seperti yang terjadi pada siklon tropis, biasanya diikuti oleh naiknya udara yang lembab. Ketika udara ini naik, ia mendingin dan mengakibatkan kondensasi. Sebaliknya, daerah dengan tekanan tinggi cenderung menghalangi pembentukan awan, sehingga mengurangi kemungkinan

hujan. Penelitian ini menunjukkan bahwa fluktuasi tekanan udara dapat secara langsung mempengaruhi pola curah hujan di suatu wilayah

Topografi adalah faktor lain yang tidak kalah penting. Daerah pegunungan sering mengalami hujan yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah dataran rendah karena proses orografis. Ketika udara lembab bertemu dengan pegunungan, udara tersebut terpaksa naik, mendingin, dan mengakibatkan presipitasi. Hal ini menciptakan perbedaan signifikan dalam distribusi hujan antara sisi yang terkena angin dan sisi yang terlindung dari angin (Sutrisno et al., 2020).

Terakhir, aktivitas manusia, termasuk perubahan penggunaan lahan dan pemanasan global, juga memengaruhi pola curah hujan. Perubahan ini dapat menyebabkan perubahan dalam suhu dan kelembaban udara, serta mempengaruhi dinamika atmosfer. Penelitian menyarankan bahwa pemanasan global dapat meningkatkan frekuensi dan intensitas hujan di beberapa wilayah, meskipun di tempat lain dapat mengakibatkan kekeringan (Sutrisno et al., 2020).

### **C. Jenis-Jenis Hujan**

Hujan adalah fenomena meteorologi yang memiliki berbagai jenis, tergantung pada mekanisme pembentukannya. Tiga jenis hujan yang umum diidentifikasi dalam studi meteorologi adalah hujan orografis, hujan frontal, dan hujan konvektif. Setiap jenis hujan memiliki proses pembentukan dan karakteristik yang berbeda, yang penting untuk dipahami dalam konteks cuaca dan iklim.

## 1. Hujan Orografis

Hujan orografis terjadi ketika udara lembab terpaksa naik karena adanya pegunungan atau elevasi. Proses ini dimulai saat udara yang mengandung uap air bergerak menuju pegunungan. Ketika udara ini naik, suhu udara akan turun, dan pada titik tertentu, uap air akan mulai mengalami kondensasi, membentuk awan. Penelitian oleh Kusumastuti et al., (2021) menunjukkan bahwa daerah pegunungan sering kali menerima curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah dataran rendah di sekitarnya, terutama di sisi yang terkena angin. Fenomena ini juga menciptakan efek bayangan hujan di sisi gunung yang berlawanan, di mana curah hujan cenderung lebih rendah. Hujan orografis sangat penting bagi ekosistem lokal karena menyediakan sumber air yang vital bagi *flora* dan *fauna* di daerah tersebut.

## 2. Hujan Frontal

Hujan frontal muncul ketika dua massa udara dengan suhu dan kelembapan yang berbeda bertemu. Biasanya, hujan ini terjadi di daerah perbatasan antara udara hangat dan udara dingin. Ketika massa udara hangat yang lebih ringan bertemu dengan massa udara dingin yang lebih berat, massa udara hangat akan terdorong ke atas. Penelitian oleh Syamsuddin et al (2020) menjelaskan bahwa saat udara hangat ini naik, ia akan mendingin dan menyebabkan uap air di dalamnya mengembun menjadi tetesan air, yang kemudian membentuk awan. Hujan frontal sering kali menghasilkan curah hujan yang merata dan berlangsung lama, berbeda dengan hujan konvektif yang biasanya bersifat singkat. Hujan ini juga sering dihubungkan dengan sistem cuaca, seperti siklon, yang dapat mempengaruhi pola curah hujan secara luas di suatu wilayah.

### 3. Hujan Konvektif

Hujan konvektif adalah jenis hujan yang terbentuk akibat pemanasan permukaan yang intens, yang biasanya terjadi di daerah tropis. Saat permukaan bumi terpapar sinar matahari, udara di atasnya menjadi hangat dan naik. Penelitian oleh Pramono et al (2019) menunjukkan bahwa saat udara hangat ini naik, ia akan mengalami pendinginan pada ketinggian tertentu, menyebabkan kondensasi uap air dan pembentukan awan. Hujan konvektif biasanya terjadi dalam bentuk hujan lebat yang bersifat singkat, sering disertai dengan petir dan guntur. Jenis hujan ini sering terlihat pada siang hari di musim panas dan dapat berkontribusi terhadap fenomena cuaca ekstrem, seperti badai petir.

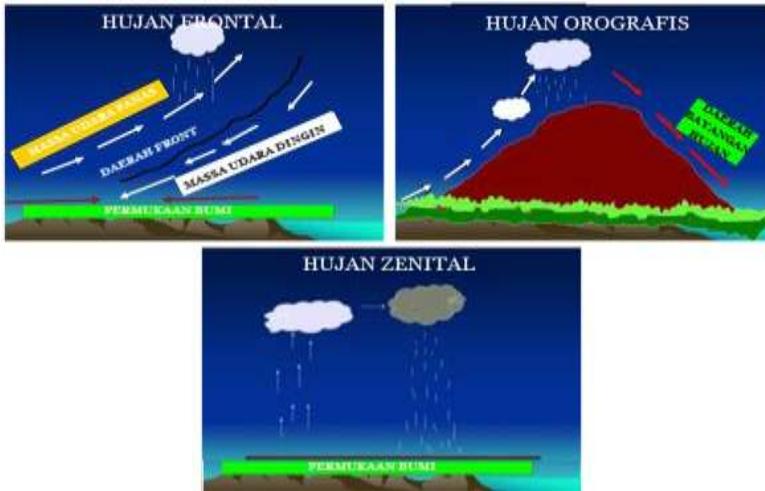
### 4. Karakteristik dan dampak dari masing-masing jenis hujan

Hujan merupakan bagian penting dari siklus hidrologi dan berperan krusial dalam kehidupan di Bumi. Jenis hujan yang berbeda memiliki karakteristik dan dampak yang unik terhadap lingkungan dan masyarakat. Berikut ini adalah penjelasan singkat mengenai karakteristik dan dampak dari masing-masing jenis hujan: hujan orografis, hujan frontal, dan hujan konvektif.

**Tabel 2. 2 Karateristik dan Dampak Jenis-jenis Hujan**

Jenis Hujan	Karateristik	Dampak
Hujan Orografis	Terjadi saat udara lembab naik dipegunungan. Curah Hujan lebih Tinggi di sisi	Menyediakan sumber air bagi Ekosistem pegunungan. Dapat Menyebabkan Erosi tanah dan longsor di Daerah

	Gunung yang terkena angin.	yang tidak memiliki Vegetasi.
Hujan Frontal	Terjadi saat dua masa udara bertemu (Udara hangat dan angin). Curah hujan merata dan berlangsung lama.	Menyediakan Air untuk Pertanian dan sumber Daya Air. Resiko Banjir dan Perubahan cuaca drastis.
Hujan Konvektif	Terjadi akibat pemanasan permukaan yang Intens. Hujan Lebat bersifat sementara, sering disertai petir	Menyediakan air bagi Pertanian di Daerah Tropis. Dapat menyebabkan banjir Lokal dan meningkatkan Risiko penyakit yang ditularkan Vektor.



**Tabel 2. 3 Proses Hujan**

(©2021 Merdeka.com/Encyclopedia Britannica)

## 5. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Curah Hujan

Curah hujan merupakan salah satu unsur penting dalam sistem iklim yang memiliki peran krusial dalam mengatur ketersediaan air di permukaan bumi. Curah hujan terbentuk melalui proses kompleks yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang bersifat alami maupun yang diakibatkan oleh aktivitas manusia. Beberapa faktor utama yang memengaruhi curah hujan antara lain adalah:

### a. Suhu dan Kelembaban Udara.

Kelembaban udara yang tinggi dan suhu yang hangat sangat mendukung pembentukan awan dan terjadinya hujan. Udara hangat cenderung mengangkut lebih banyak uap air. Ketika udara hangat ini naik dan mendingin, uap air tersebut akan mengembun menjadi tetes-tetes air yang membentuk awan.

Pada kondisi tertentu, awan tersebut kemudian menghasilkan curah hujan.

b. Tekanan Atmosfer dan Sistem Cuaca

Tekanan atmosfer berperan dalam menentukan kondisi cuaca yang akan terjadi di suatu wilayah. Tekanan rendah biasanya dikaitkan dengan cuaca mendung dan hujan, karena massa udara yang naik akan mendingin dan menghasilkan awan. Sebaliknya, tekanan tinggi cenderung membawa cuaca cerah karena udara yang turun menghambat pembentukan awan.

c. Angin dan Gerak Massa Udara

Angin berperan sebagai penggerak massa udara dari satu wilayah ke wilayah lain. Angin yang bertiup dari laut ke daratan, misalnya, membawa kelembaban yang kemudian menyebabkan hujan di daratan tersebut. Selain itu, fenomena angin muson di beberapa wilayah di Asia juga menyebabkan musim hujan yang intens.

d. Topografi

Kondisi topografi, seperti pegunungan, juga mempengaruhi curah hujan. Wilayah pegunungan cenderung mendapatkan lebih banyak hujan karena udara yang membawa kelembaban dipaksa naik ketika melewati gunung. Saat naik, udara ini mendingin dan menyebabkan kondensasi yang berujung pada curah hujan. Fenomena ini dikenal sebagai hujan orografis.

e. Urbanisasi dan Aktivitas Manusia

Aktivitas manusia, seperti urbanisasi dan deforestasi, juga memiliki dampak pada pola curah hujan. Urbanisasi dapat meningkatkan suhu di daerah perkotaan (fenomena pulau panas perkotaan) yang berpotensi mengubah pola cuaca setempat, termasuk curah hujan. Deforestasi mengurangi proses

transpirasi, yang menurunkan kelembaban di suatu wilayah dan dapat berdampak pada penurunan curah hujan.

f. Fenomena Iklim Global (*El Nino* dan *La Nina* )

Fenomena iklim seperti *El Nino* dan *La Nina* juga memengaruhi curah hujan secara global. El Niño seringkali menyebabkan kondisi kering di beberapa wilayah karena adanya perubahan suhu permukaan laut di Samudra Pasifik, sedangkan *La Nina* cenderung meningkatkan curah hujan di beberapa wilayah akibat pendinginan suhu laut.

g. Kondisi Laut dan Samudra

Suhu permukaan laut yang hangat dapat meningkatkan penguapan, sehingga udara di sekitarnya lebih lembap. Wilayah-wilayah yang berada dekat dengan laut atau samudra biasanya memiliki curah hujan lebih tinggi karena kelembaban yang tinggi akibat proses penguapan dari perairan tersebut.

Pemahaman terhadap faktor-faktor ini sangat penting untuk perencanaan dan pengelolaan sumber daya air, serta sebagai upaya mitigasi perubahan iklim yang kini kian mengubah pola curah hujan di berbagai wilayah. Pengetahuan mengenai faktor-faktor ini juga membantu dalam prediksi cuaca dan pengembangan strategi adaptasi untuk menghadapi fluktuasi iklim.

## **D. Manfaat dan Tantangan Hujan dalam Hidrologi Terapan**

Dalam hidrologi terapan, hujan berperan penting dalam pengelolaan sumber daya air, irigasi, serta mitigasi bencana air seperti banjir dan longsor. Sebagai salah satu komponen utama dalam siklus hidrologi, hujan memiliki berbagai manfaat yang mendukung keberlanjutan kehidupan dan lingkungan. Namun,

di sisi lain, intensitas dan distribusi hujan yang berubah-ubah menimbulkan tantangan yang memerlukan solusi berbasis ilmu dan teknologi hidrologi.

## **1. Manfaat Hujan dalam Hidrologi Terapan**

### **a. Sumber Pengisian Air Tanah**

Air hujan menjadi sumber utama pengisian kembali akuifer atau lapisan air tanah melalui proses infiltrasi. Ketersediaan air tanah ini sangat penting bagi pasokan air bersih di banyak wilayah, terutama di daerah dengan sumber air permukaan terbatas. Pengelolaan air tanah yang baik, didukung oleh pasokan air hujan yang cukup, membantu memenuhi kebutuhan air domestik, pertanian, dan industri.

### **b. Pendukung Sistem Irigasi untuk Pertanian**

Hujan memberikan pasokan air alami yang penting untuk irigasi, terutama bagi pertanian di wilayah tropis yang memiliki curah hujan cukup tinggi. Dengan pasokan air yang memadai, siklus pertanian dapat berjalan optimal, meningkatkan produksi pangan, dan mendukung ketahanan pangan. Irigasi yang bergantung pada hujan ini menjadi salah satu solusi pengelolaan air yang berkelanjutan di bidang pertanian.

### **c. Mengisi Kembali Sumber Air Permukaan**

Hujan berfungsi mengisi ulang sungai, danau, dan waduk yang merupakan sumber utama air untuk masyarakat dan industri. Pengisian ini juga berperan dalam pengelolaan sumber daya air jangka panjang, termasuk mendukung pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Dengan demikian, hujan membantu menjaga ketersediaan air permukaan sebagai sumber utama kebutuhan sehari-hari dan infrastruktur energi.

d. Pemeliharaan Ekosistem dan Keanekaragaman Hayati

Hujan sangat penting bagi keberlanjutan ekosistem seperti hutan, rawa, dan lahan basah, yang mendukung keanekaragaman hayati. Hutan yang sehat dan lahan basah yang terpelihara berfungsi sebagai habitat bagi berbagai spesies, serta membantu mengatur siklus hidrologi lokal dengan menyimpan dan melepaskan air secara alami.

**2. Tantangan Hujan dalam Hidrologi Terapan**

a. Banjir dan Pengelolaan Risiko

Curah hujan yang tinggi dalam waktu singkat sering kali menyebabkan banjir, terutama di wilayah dengan sistem drainase yang kurang memadai. Tantangan dalam hidrologi terapan adalah mengelola risiko banjir melalui perencanaan dan pengelolaan sistem drainase serta penerapan teknologi seperti kanal, bendungan, dan tanggul. Penanganan ini bertujuan mengendalikan dan mengurangi dampak banjir yang merugikan.

b. Risiko Longsor di Daerah Lereng

Curah hujan yang berlebihan dapat meningkatkan risiko longsor di daerah dengan kemiringan curam atau kondisi tanah yang tidak stabil. Kondisi tanah yang jenuh oleh air lebih mudah tergerus dan mengakibatkan longsor, sehingga membahayakan pemukiman dan infrastruktur di daerah perbukitan atau pegunungan. Hidrologi terapan membantu memitigasi risiko ini melalui pendekatan konservasi tanah, seperti pembuatan terasering dan penanaman vegetasi penahan tanah.

c. Variabilitas Curah Hujan Akibat Perubahan Iklim

Perubahan iklim meningkatkan variabilitas pola hujan, sehingga sulit untuk memprediksi curah hujan jangka panjang. Perubahan ini menyebabkan meningkatnya risiko bencana air seperti banjir dan kekeringan yang memerlukan adaptasi dan mitigasi. Dalam hidrologi terapan, penggunaan teknologi prediksi cuaca dan iklim sangat penting untuk membantu perencanaan dan pengelolaan sumber daya air yang lebih baik.

d. Erosi Tanah akibat Hujan Deras

Hujan deras di daerah dengan vegetasi minim berpotensi menyebabkan erosi, yang mengakibatkan hilangnya lapisan tanah subur. Erosi ini merusak lahan pertanian dan memperburuk degradasi lingkungan. Dalam hidrologi terapan, teknik konservasi tanah, seperti pembuatan terasiring dan reforestasi, sangat penting untuk mengurangi dampak erosi.

e. Ketidakpastian dalam Prediksi Hidrologi

Model hidrologi yang digunakan untuk memprediksi curah hujan dan aliran air memiliki tantangan ketidakpastian akibat variabilitas cuaca dan perubahan iklim. Ketidakpastian ini dapat mempengaruhi perencanaan sumber daya air dan pengambilan keputusan dalam pengelolaan bencana air. Penggunaan teknologi terbaru dan metode statistik yang lebih canggih dapat membantu meningkatkan akurasi prediksi hidrologi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (Bapedal), 2009  
Laporan Tingkat Daya Dukung lingkungan. Propinsi Bali
- Darmono, 2001. Lingkungan hidup dan Pencemaran. Penerbit  
Universitas Indonesia
- Gilbert, Y., Le Bihan, Y., Aubry, G., Veillette, M., Duchaine, C., &  
Lessard, P. (2008). Microbiological and molecular  
characterization of denitrification in biofilters treating pig  
manure. *Bioresource Technology*, 99(10), 4495-4502.
- Hazen, T. C., Prince, R. C., & Mahmoudi, N. (2016). Marine oil  
biodegradation.
- INDONESIA, P. R. (2000). Peraturan Pemerintah Republik  
Indonesia Nomor 150 Tahun 2000 tentang Pengendalian  
Kerusakan Tanah untuk Produksi Biomassa.
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.  
02/MENLH/10/1998 Tentang Baku Tentang Pengukuran  
Kriteria Mutu Lingkungan Hidup Undang-Undang Nomor  
32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan  
Lingkungan Hidup, pencemaran lingkungan
- Pushkar, B., Sevak, P., Parab, S., & Nilkanth, N. (2021). Chromium  
pollution and its bioremediation mechanisms in bacteria:  
A review. *Journal of Environmental Management*, 287,  
112279.

# BAB 3

## ANALISIS DATA HUJAN

Oleh Ir. M. Agusalm, S.T., M.T

### A. Pendahuluan

Analisis data hujan merupakan langkah awal yang sangat penting dalam studi hidrologi, terutama dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya air. Data hujan yang akurat dan representatif memberikan dasar yang kuat untuk memahami pola hujan, intensitas, serta distribusi temporal dan spasialnya. Informasi ini sangat berguna dalam berbagai aplikasi, seperti perencanaan infrastruktur drainase, pengelolaan banjir, serta estimasi ketersediaan air. Menurut (Chow, 1988), analisis data hujan tidak hanya mencakup pengumpulan data, tetapi juga melibatkan evaluasi kualitas data dan identifikasi pola-pola hidrologi yang relevan.

Dalam konteks perencanaan hidrologi, data hujan memiliki peran penting sebagai input utama untuk berbagai model hidrologi. Model-model ini digunakan untuk memprediksi aliran sungai, curah hujan maksimum, dan dampak perubahan iklim terhadap ketersediaan air. Seperti yang dijelaskan oleh Ward dan Robinson (2000), ketepatan prediksi model sangat bergantung pada kualitas data hujan yang digunakan. Oleh karena itu, analisis yang komprehensif terhadap data hujan diperlukan untuk meningkatkan akurasi model hidrologi.

Di sisi lain, ketersediaan data hujan sering kali menjadi tantangan, terutama di wilayah yang memiliki jaringan stasiun

pengamatan yang terbatas. Dalam situasi seperti ini, pendekatan alternatif, seperti penggunaan data satelit dan pemodelan berbasis statistik, dapat digunakan untuk melengkapi kekurangan data. Penelitian oleh Huffman et al. (2007) menunjukkan bahwa data hujan berbasis satelit dapat memberikan estimasi yang cukup baik, terutama untuk wilayah dengan keterbatasan infrastruktur pengamatan.

Selain itu, analisis data hujan juga penting dalam konteks mitigasi bencana hidrometeorologi, seperti banjir dan kekeringan. Pemahaman terhadap pola hujan ekstrem dapat membantu dalam pengembangan strategi mitigasi yang lebih efektif. Misalnya, studi oleh (Trenberth et al., 2003) menunjukkan bahwa perubahan pola hujan akibat fenomena perubahan iklim dapat meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian ekstrem, yang memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan mitigasi.

Dengan demikian, analisis data hujan bukan hanya sebuah proses teknis, tetapi juga bagian integral dari pengambilan keputusan berbasis data di bidang hidrologi. Penelitian yang terus berkembang di bidang ini memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Sebagaimana diungkapkan oleh (Wheater & Gober, 2015), pemanfaatan data hujan yang optimal dapat menjadi salah satu kunci dalam menghadapi tantangan global di bidang hidrologi dan pengelolaan sumber daya air.

## **B. Pengukuran Hujan**

Di Indonesia, data hujan ditakar dan dikumpulkan oleh beberapa instansi antaranya adalah Dinas Pengairan sekarang Dinas PSDA, Dinas pertanian dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Jenis dan tipe alat penakar hujan yang

digunakan tentu berbeda-beda. Secara umum, penakar hujan dapat dibedakan atas 2 jenis yaitu, penakar hujan manual dan penakar hujan otomatis.

### **1. Penakar Hujan Manual**

Penakar hujan jenis ini menampung hujan selama 24 jam. Biasanya alat ini dibuka dan diukur secara teratur jumlah hujannya pada jam 07.00 - 09.00 pagi dan dicatat sebagai hujan yang terjadi sehari sebelumnya pada formulir yang ditetapkan. Dengan cara ini, kedalaman hujan yang diperoleh adalah kedalaman hujan total yang terjadi selama satu hari (24 jam). Berapa lama dan jam berapa terjadinya hujan tidak diketahui. Penakar hujan manual merupakan penakar hujan yang paling banyak digunakan. Alat ini terdiri dari corong dan bejana. Ukuran diameter dan tinggi sangkar bervariasi dari satu negara dengan negara lain dan hasilnya tidak dapat diperbandingkan. Oleh karena itu, alat yang digunakan serta aturan pemasangannya harus seragam. Di Indonesia alat yang banyak digunakan adalah alat penakar hujan “*Hellmann*” dengan tinggi pasangan 120 cm di atas muka tanah, dengan dengan luas corong 200 cm<sup>2</sup>. Jumlah air hujan yang tertampung diukur dengan gelas ukur atau bila ukur (*graduated stick*).

Alat ukur hujan harus memperlihatkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Corong harus dibuat sedemikian rupa, sehingga dapat menghindari terjadinya percikan keluar corong atau sebaliknya.
- b. Corong harus mempunyai lubang sekecil mungkin untuk mencegah terjadinya radiasi dan penguapan.

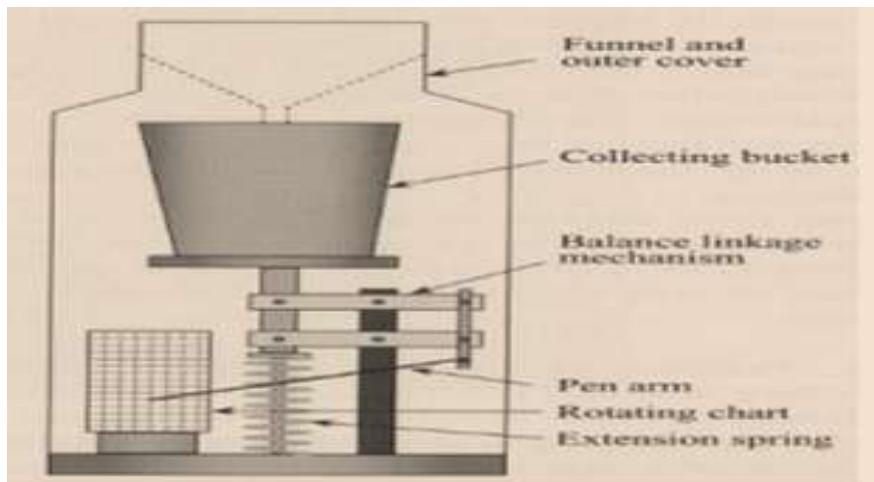
## 2. Penakar Hujan Otomatis

Penakar hujan otomatis dikenal dengan nama ARR (*Automatic Rainfall Recorder*). Dengan alat ini hujan tidak perlu dicatat tiap hari karena alat ini dilengkapi dengan dengan pencatat jumlah akumulasi hujan terhadap waktu dalam bentuk grafik. Ada tiga macam alat penakar hujan otomatis yaitu:

ARR dengan *weighing bucket*, merupakan alat penakar hujan dengan bejana tampung (*receiver*) yang dapat menampung air hujan secara kumulatif. Perekaman hujan dilakukan secara terus menerus, hingga semua hujan yang jatuh seluruhnya akan tertimbang dan terekam. Alat ini tidak dilengkapi dengan pengurusan otomatis.

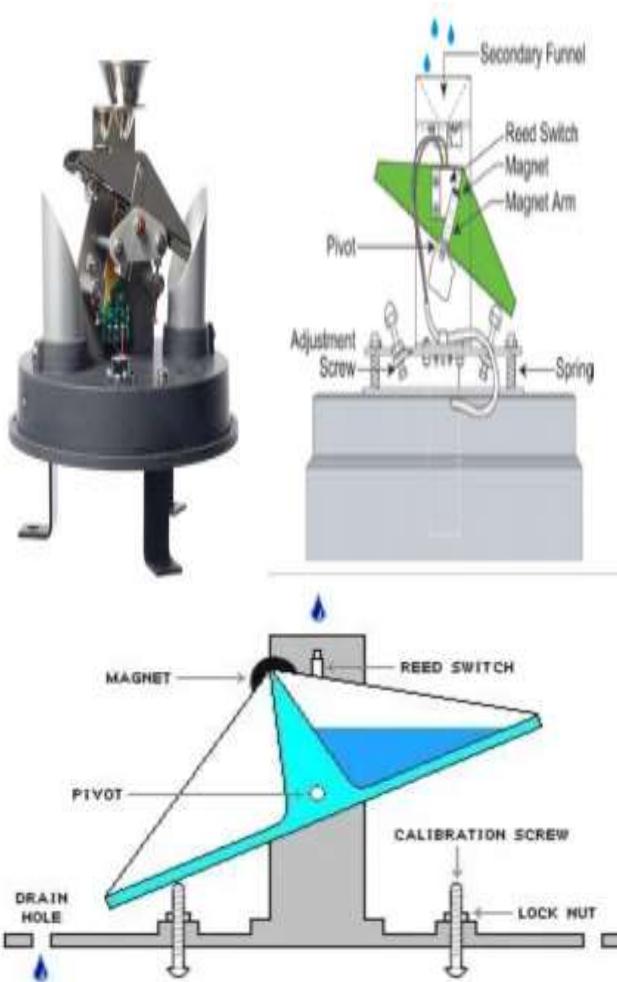
ARR dengan *Tipping bucket* (bejana goyang). Alat ini dilengkapi dengan saringan, dua bejana yang sama (kembar), dan saluran pembuang. Air hujan yang jatuh ke dalam corong dan melewati saringan masuk ke dalam bejana. Makin tinggi muka air dalam bejana, maka titik berat bejana bergeser perlahan-lahan sampai pada saat bejana penuh akan terjungkir dan menumpahkan semua air hujan yang tertampung. Kapasitas penuh bejana setara dengan 0.5 mm air hujan. Setiap kali tipping arus listrik akan terhenti dan signal ini diteruskan ke perekam yang menggambarkan grafik hujan.

ARR dengan *float* (pelampung), sesuai dengan namanya, alat ini dilengkapi dengan pelampung dalam suatu bejana yang dihubungkan dengan corong penangkap hujan melalui pipa. Gerakan pelampung akibat penambahan air dalam dalam tabung diteruskan dengan mekanisme khusus yang dapat menggerakkan pena di atas kertas perekam. Alat ini dilengkapi dengan alat penguras. Pada saat pelampung mencapai posisi tertinggi, maka air akan terbuang secara otomatis melalui pembuang dan pelampung kembali pada posisi paling bawah.

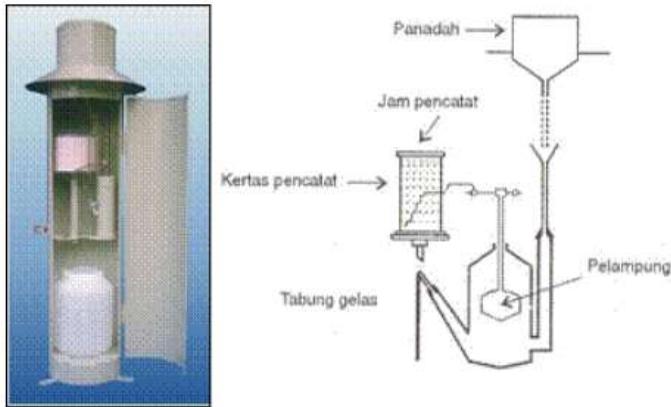


**Gambar 3. 1 ARR Weighing Bucket**

(Sumber:[https://civilmint.com/rain-gauge/?utm\\_source=chatgpt.com](https://civilmint.com/rain-gauge/?utm_source=chatgpt.com))



**Gambar 3.2 ARR Tipping Bucket**  
(Sumber: [https://civilmint.com/rain-gauge/?utm\\_source=chatgpt.com](https://civilmint.com/rain-gauge/?utm_source=chatgpt.com))



**Gambar 3.3 ARR dengan float (Pelampung)**

(Sumber: [https://civilmint.com/raingauge/?utm\\_source=chatgpt.com](https://civilmint.com/raingauge/?utm_source=chatgpt.com))

### C. Curah Hujan Maksimum Harian Rata-rata

Perhitungan data curah hujan harian maksimum suatu wilayah harus dilakukan dengan benar agar dapat menganalisis frekuensi curah hujan. Dalam kenyataannya, sering dijumpai perhitungan yang kurang pas, yaitu dengan mencari hujan harian maksimum setiap pos hujan dalam suatu periode, kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan curah hujan wilayah. Cara ini dianggap tidak masuk akal karena rata-rata hujan dilakukan atas hujan masing-masing pos hujan yang terjadi pada hari berlainan. Hasil pengukuran tersebut akan jauh menyimpang dari hasil yang seharusnya. Cara yang seharusnya ditempuh untuk mendapatkan hujan maksimum harian rata-rata DAS adalah sebagai berikut (Suripin, 2004).

1. Tentukan hujan maksimum harian pada tahun tertentu disalah satu pos hujan
2. Cari besarnya curah hujan yang tanggal, bulan dan tahun yang sama untuk pos hujan yang lain.

3. Hitung hujan DAS dengan salah satu cara yang dipilih.
4. Tentukan hujan maksimum harian (seperti langkah 1) pada tahun yang sama untuk pos hujan yang lain.
5. Ulangi langkah 2 dan 3 untuk setiap tahun.

Dari hasil rata-rata yang diperoleh, dipilih yang tertinggi setiap tahun. Data hujan yang terpilih setiap tahun, merupakan hujan maksimum harian DAS untuk tahun yang bersangkutan.

## **D. Analisa Hujan Rata-rata Derah**

Untuk menentukan besarnya curah hujan daerah, biasanya ada 3 metode yang digunakan yaitu:

- a. Cara rata-rata hitung atau cara Aljabar.
- b. Cara *polygon thiessen*.
- c. Cara *isohyet*.

### **1. Cara Rata-rata Hitung (Al- Jabar)**

Cara ini adalah cara yang paling sederhana, karena perhitungannya yang sangat sederhana maka hasil perhitungannya pun dianggap kurang teliti. Hal ini disebabkan karena setiap stasiun dianggap mempunyai bobot yang sama. Hal ini hanya dapat dilakukan jika hujan yang terjadi di dalam DAS homogeny dan variasi tahunannya tidak terlalu besar. (Sri Harto, analisis Hidrologi, 1993). Pengukuran yang dilakukan di beberapa stasiun dalam waktu yang bersamaan dijumlahkan dan kemudian dibagi jumlah stasiun. Stasiun hujan yang digunakan dalam hitungan adalah yang berada dalam DAS, tetapi stasiun di luar DAS tangkapan yang masih berdekatan juga bisa diperhitungkan. Metode rata-rata aljabar memberikan hasil yang baik apabila: (Triatmodjo, 2008).

1. Stasiun hujan tersebar secara merata di DAS,
2. Distribusi hujan relatif merata pada seluruh DAS.

Untuk menghitung hujan rata-rata dengan metode rata-rata hitung, dapat dilakukan dengan formula sebagai berikut:

$$R_t = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{n}$$

Dimana:

$R_t$  = Tinggi hujan rata-rata daerah (mm)

$R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$  = Curah hujan yang tercatat pada pos penakar 1, 2, 3, n

n = banyaknya pos penakar

## 2. Cara *polygon thiessen*

Metode *Thiessen* memperhitungkan bobot dari masing-masing stasiun yang mewakili luasan di sekitarnya. Pada suatu luasan di dalam DAS dianggap bahwa hujan adalah sama dengan yang terjadi pada stasiun yang terdekat, sehingga hujan yang tercatat pada suatu stasiun mewakili luasan tersebut. Metode ini digunakan apabila penyebaran stasiun hujan di daerah yang ditinjau tidak merata, pada metode ini stasiun hujan minimal yang digunakan untuk perhitungan adalah tiga stasiun hujan. Hitungan curah hujan rata-rata dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh dari tiap stasiun. Metode *poligon Thiessen* banyak digunakan untuk menghitung hujan rata-rata kawasan. *Poligon Thiessen* adalah tetap untuk suatu jaringan stasiun hujan tertentu. Apabila terdapat perubahan jaringan stasiun hujan seperti pemindahan atau penambahan stasiun, maka harus dibuat lagi poligon yang baru (Triatmodjo, 2008).

Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah yang bersangkutan, bukan curah hujan pada titik

tertentu. Curah hujan ini disebut curah hujan wilayah atau curah hujan daerah yang dinyatakan dalam millimeter (mm).

Curah hujan ini harus diperkirakan dari beberapa titik pengamatan curah hujan, untuk mengetahui luas areal hujan setiap stasiun curah hujan digunakan metode *poligon thiessen* dengan rumus :

$$R_t = \frac{A_1.R_1 + A_2.R_2 + A_3.R_3 + \dots \dots A_n.R_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots \dots A_n}$$

Dimana :

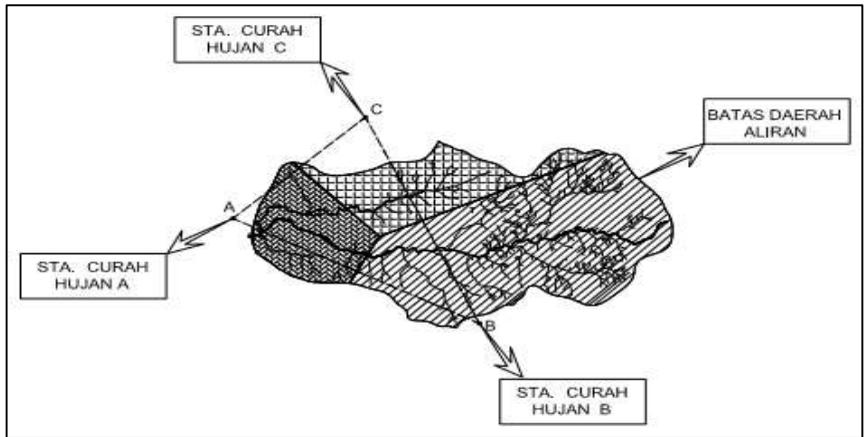
$R_1, R_2, R_3, \dots R_n$  = Curah hujan yang tercatat pada pos penakar 1, 2, 3, n

$A_1, A_2, A_3, \dots A_n$  = Luas areal poligon 1, 2, 3, .....n

n = Banyaknya pos penakar hujan

Cara ini merupakan bobot tertentu untuk stasiun hujan dengan pengertian bahwa setiap stasiun hujan dianggap mewakili hujan dalam daerah dengan luas tertentu, dan luas tersebut merupakan faktor koreksi bagi hujan yang bersangkutan. Luas masing-masing daerah tersebut diperoleh dengan cara:

1. Semua stasiun yang terjadi terdapat didalam (di luar) DAS dihubungkan dengan garis sehingga terbentuk jaringan segitiga. Pada masing-masing segitiga ditarik garis sumbunya, semua garis sumbu tersebut membentuk poligon.
2. Luas daerah yang hujannya diwakili oleh salah satu stasiun yang bersangkutan adalah daerah yang dibatasi garis-garis poligon tersebut atau dengan batas DAS luas relatif daerah ini merupakan faktor koreksinya.



**Gambar 3. 4 Poligon thiennes**

Sumber: (Suripin, 2004)

### 3. Cara *Isohyet*

Metode *Isohyet* adalah garis yang menghubungkan titik-titik dengan kedalaman hujan yang sama. Pada metode *Isohyet*, dianggap bahwa hujan pada suatu daerah di antara dua garis *Isohyet* adalah merata dan sama dengan nilai rata-rata dari kedua garis *Isohyet* tersebut. Metode *Isohyet* merupakan cara paling teliti untuk menghitung kedalaman hujan rata-rata di suatu daerah, pada metode ini stasiun hujan harus banyak dan tersebar merata, metode *Isohyet* membutuhkan pekerjaan dan perhatian yang lebih banyak dibanding dua metode lainnya (Triatmodjo, 2008).

Metode ini menggunakan pembagian DAS dengan garis-garis yang menghubungkan tempat-tempat dengan curah hujan yang sama besar (*isohyet*). Curah hujan rata-rata di daerah aliran sungai didapatkan dengan menjumlahkan perkalian antara curah hujan rata-rata di antara garis-garis *isohyet* dengan luas daerah yang dibatasi oleh garis batas DAS dan dua garis *isohyet*,

kemudian dibagi dengan luas seluruh DAS. Cara ini mempunyai kelemahan yaitu apabila dikerjakan secara manual, dimana setiap kali harus menggambarkan garis *isohyet* yang tentunya hasilnya sangat tergantung pada masing-masing pembuat garis. Unsur subyektivitas ini dapat dihindarkan dengan penggunaan perangkat lunak komputer yang dapat menghasilkan gambar garis *isohyet* berdasarkan sistem *intrpolasi grid*, sehingga hasilnya akan sama untuk setiap input data di masing-masing stasiun hujan. Persamaan dalam hitungan hujan rata-rata dengan metode *isohyet* dapat kita rumuskan seperti berikut:

$$P = \left( \frac{A_1}{A_{\text{Total}}} \times \frac{P_1 + P_2}{2} \right) + \left( \frac{A_2}{A_{\text{Total}}} \times \frac{P_2 + P_3}{2} \right) \dots \left( \frac{A_n}{A_{\text{Total}}} \times \frac{P_n + P_{n+1}}{2} \right)$$

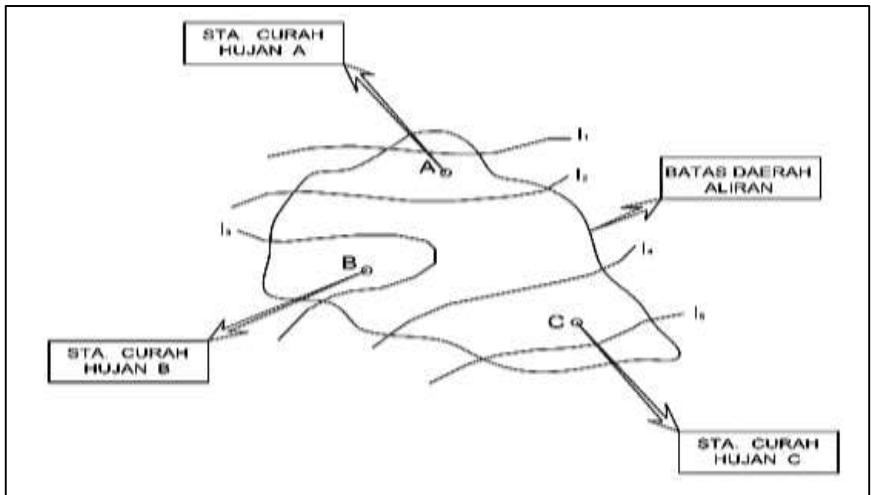
Dimana:

$P$  = Curah hujan rata-rata,

$P_1, P_2, \dots, P_n$  = Besaran curah hujan yang sama pada setiap garis *sohyet*

$A_{\text{Total}}$  = Luas total DAS ( $A_1 + A_2 + \dots + A_n$ )

Dalam praktek pemakaian hitungan hujan DAS tersebut, banyak digunakan cara kedua atau metode *Poligon thiessen* karena dipandang lebih praktis dengan hasil yang cukup baik.



**Gambar 3.5 Cara isohyet**

Sumber: (Suripin, 2004)

Contoh Pembuatan secara manual adalah pembuatan peta isohiet hanya dengan mengandalkan alat tulis standar tanpa menggunakan *software* apapun. Apabila kita akan membuat peta isohiet secara manual, alat dan bahan yang dibutuhkan adalah:

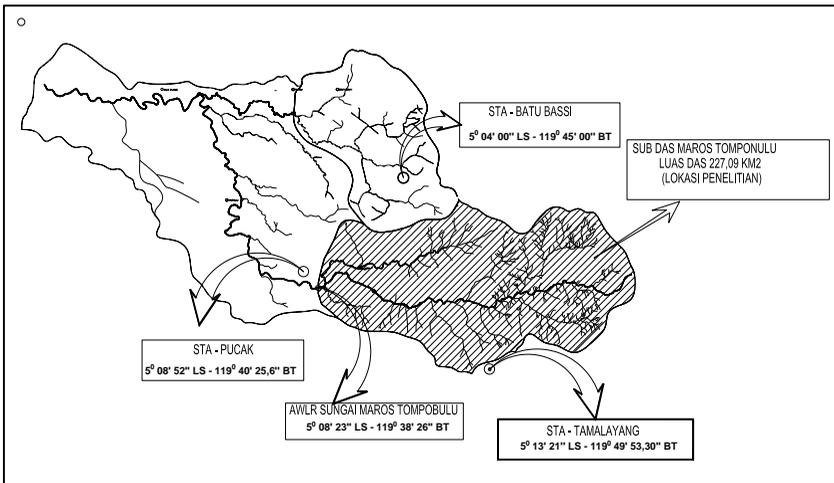
1. Peta DAS atau WS yang akan dibuat *isohiet* nya (Harus sudah di *print*)
2. Data stasiun hujan yang meliputi koordinat dan besaran curah hujan, bisa curah hujan tahunan, bulanan ataupun harian
3. Alat tulis seperti pensil, balpoint, penghapus maupun alat tulis lainnya yang sekiranya anda perlukan
4. Mistar/penggaris dengan panjang mistar tergantung besaran ukuran kertas yang digunakan. Jika hanya menggunakan kertas A4 atau A3 sebagai media gambarnya, maka cukup dengan menggunakan mistar 30 cm, tapi jika ukurannya A1 atau A0 maka bisa menggunakan

mistar yang memiliki ukuran lebih panjang seperti 50 cm, 100 cm atau lebih

Tahapan pembuatan peta *isohiet* secara manual adalah:

1. Ploting Stasiun Hujan Pada Peta DAS atau WS

Daftar stasiun hujan yang sudah tersedia, letaknya harus di ploting pada peta DAS atau WS yang akan dibuat peta isohietnya, tampilkan juga nama stasiun serta angka curah hujannya. misalnya akan membuat peta isohiet pada DAS dengan menggunakan data 3 stasiun hujan, yakni stasiun Batu Bassi, Tamalayang, dan Pucak. Jika lokasi stasiun hujan sudah di ploting maka akan terlihat seperti berikut:

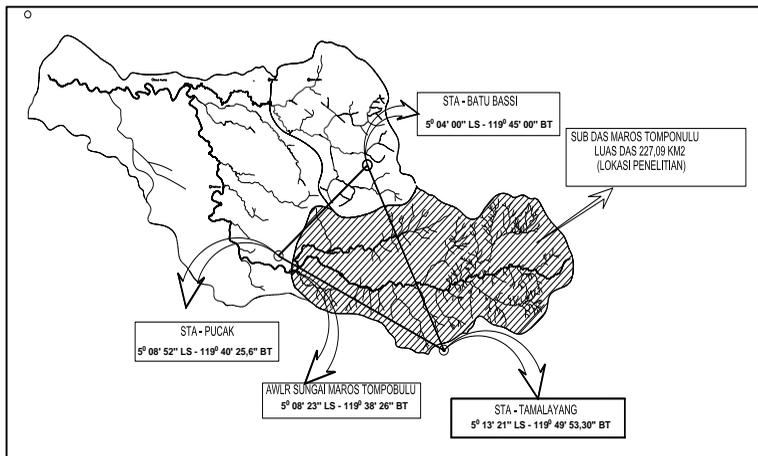


**Gambar 3. 6 DAS sungai Maros**

2. Menghubungkan Setiap Stasiun dengan Garis Khayal

Setiap stasiun hujan harus dihubungkan oleh garis khayal sebagai garis bantu untuk melakukan penentuan titik *isohiet* pada tahap berikutnya. Pastikan antar stasiun sudah dihubungkan oleh garis khayal, jika ada yang terlewat maka

pada saat penarikan garis *isohiet* akan ada salah satu garis yang tidak bisa dihubungkan secara sempurna. Setelah ditarik garis antar stasiun, biasanya akan membentuk segitiga dan penarikan garis khayal tersebut tergantung keinginan anda yang penting jangan ada garis yang bersilangan. Jika penarikan garis antar stasiun sudah selesai maka akan seperti berikut:

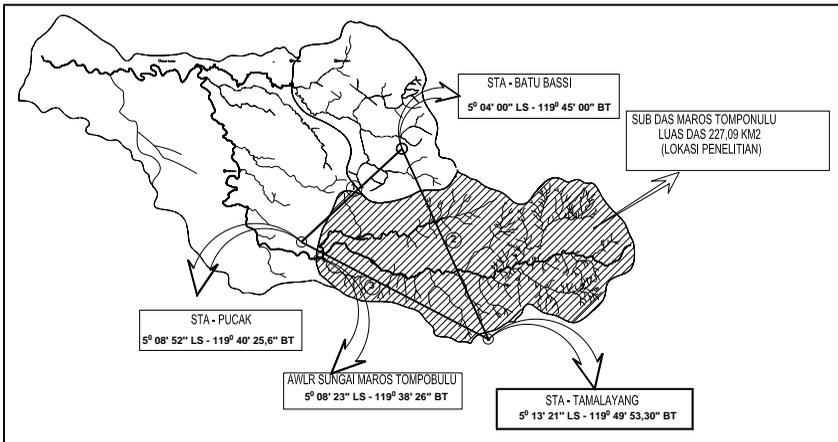


**Gambar 3. 7** Garis Hayal Pada DAS Maros (Tompobulu)

### 3. Penentuan Titik *Isohiet* Pada Garis Khayal

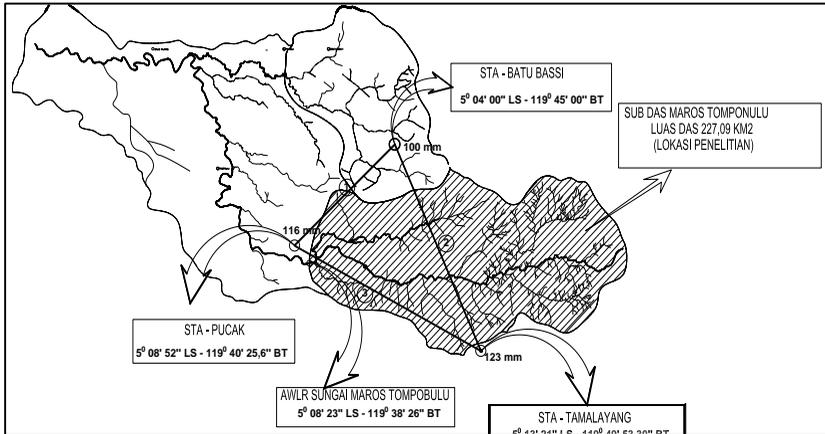
Tahap yang paling rumit dalam pembuatan peta *isohiet* secara manual adalah menentukan titik *isohiet* pada semua garis khayal yang menghubungkan tiap stasiun. Pertama-tama anda harus menentukan interval garis *isohiet* yang akan dibuat, semakin besar interval nya, maka proses interpolasi akan semakin cepat tetapi tingkat akurasi hujan wilayah nya akan semakin kecil, sebaliknya jika interval nya semakin kecil, maka proses interpolasi nya akan semakin lama, tetapi akurasi hujan wilayah nya akan semakin tinggi.

Pada contoh kali ini kita akan membuat peta isohiet dengan interval setiap 500 mm. Artinya curah hujan yang harus dicari titik isohiet nya hanya untuk curah hujan setiap kelipatan 10, seperti 50, 100, 150, 200, dst. Adapun jumlah garis khayal yang harus dilakukan interpolasi adalah sebanyak 3 buah garis khayal, perhatikan gambar berikut:



**Gambar 3. 8 Jumlah Garis Hayal Pada DAS Maros (Tompobulu)**

Sebagai contoh, kita akan menentukan titik isohiet pada garis khayal 1 yang menghubungkan stasiun hujan Stasiun Pucak dan Stasiun Batu Bassi. Dengan memperhatikan data curah hujan pada setiap stasiun pada tahun yang sama, maka diperoleh data seperti pada gambar 4.9. Sebagai berikut:



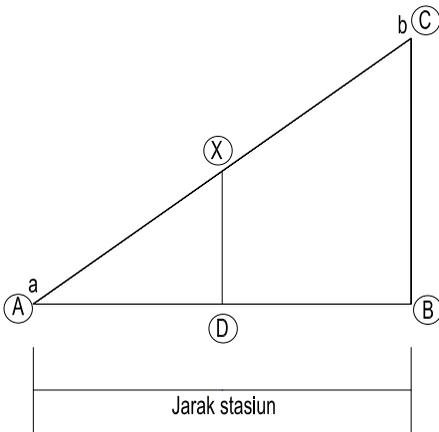
**Gambar 3. 9 Jumlah Garis Hayal Pada DAS Maros (Tompobulu)**

Cara menentukan titik *isohiet* pada semua garis khayal pada prinsipnya adalah sama, hanya input angkanya saja yang berbeda. Misalnya, Stasiun Tamalayang Adalah Pucak (A), Batu Bassi (B) dan Tamalayang (C)

Maka garis isohyetya dapat dibuat untuk masing-masing stasiun yang bersangkutan. Dengan memperhatikan gambar 4.9. Diketahui Curah Hujan Maksimum yang terjadi di stasiun A= 116 mm, B= 100mm dan C= 123 mm untuk menggambar titik titik isohyet maka hal yang dilakukan yang pertama adalah mengukur jarak di peta antara titik A (Pucak) dan B (Batu Bassi) setelah diketahui maka dilakukan interpolasi antara titik tersebut.

Karena curah hujan dititik A= 116 dan B= 100, maka dilakukan interpolasi diantara nilai tersebut. Berarti nilai yang ada diantara nilai tersebut adalah 104, 108, 112 (interval 4).

Jadi untuk menentukan titik-titik isohyetya kita dapat menggunakan rumus interpolasi metode perbandingan segitiga sebagai berikut:



Dengan memperhatikan Gambar segitiga diatas maka dapat dibuat rumus sebagai berikut:

$$X = \frac{X-a}{b-a} = \frac{D-A}{B-A}$$

Keterangan:

X = Titik Isohyet yang dicari

A, B = Stasiun n (yang ditinjau)

A - C = Jarak Stasiun

D = Interval Curah hujan

a = titik awal pengukuran

b = titik akhir pengukuran

Analisa Data Hujan yang Hilang

Data yang ideal adalah data yang untuk dan sesuai dengan apa yang dibutuhkan. Tetapi dalam praktek sangat sering dijumpai data yang tidak lengkap (*incomplete record*) hal ini dapat

disebabkan beberapa hal, antara lain yaitu kerusakan alat, kelalaian petugas, penggantian alat, bencana (pengrusakan) dan sebagainya. Keadaan tersebut menyebabkan pada bagian-bagian tertentu dari data runtut waktu terdapat data yang kosong (*missing record*). Dalam memperkirakan besarnya data yang hilang, harus diperhatikan pula pola penyebaran hujan pada stasiun yang bersangkutan maupun stasiun-stasiun sekitarnya.

Keadaan data hujan hilang ini untuk kepentingan tertentu dapat mengganggu. Misalnya pada suatu saat terjadi banjir, sedangkan data hujan pada satu atau beberapa stasiun pada saat yang bersamaan tidak tersedia (karena berbagai sebab). Keadaan demikian tidak terasa merugikan bila data tersebut tidak tercatat pada saat yang di pandang tidak penting.

Menurut Soewarno (2000) dalam bukunya Hidrologi Operasional Jilid Kesatu, analisis hidrologi memang tidak selalu diperlukan pengisian data yang kosong atau hilang. Misal terdapat data kosong pada musim kemarau sedang analisis data hidrologi tersebut menghitung debit banjir musim penghujan maka dipandang tidak perlu melengkapi data pada periode kosong musim kemarau tersebut, tetapi bila untuk analisis kekeringan maka data kosong pada musim kemarau tersebut harus diusahakan untuk melengkapi.

Data hujan yang hilang dapat diestimasi apabila di sekitarnya ada stasiun penakar hujan (minimal 2 stasiun) yang lengkap datanya atau stasiun penakar yang datanya hilang diketahui hujan rata-rata tahunannya. (Lily, 2010).

Menghadapi keadaan ini, terdapat dua langkah yang dapat dilakukan yaitu:

1. Membiarkan saja data yang hilang tersebut, karena dengan cara apapun data tersebut tidak akan diketahui dengan tepat.
2. Bila dipertimbangkan bahwa data tersebut mutlak diperlukan maka perkiraan data tersebut dapat dilakukan dengan cara-cara yang dikenal.

### **E. Metode Estimasi Data Hujan yang Hilang**

Beberapa metode yang dapat digunakan dalam mengestimasi data yang hilang yakni, (Mengenal Dasar-dasar Hidrologi, Joyce Martha dan Ir. Wanny Adidarma, Dipl.HE):

1. *Normal Ratio Method*.
2. *Inversed Square Distance*.
3. Cara rata-rata aljabar.

Sedangkan menurut Soewarno dalam bukunya Hidrologi Operasional Jilid Kesatu halaman 202, ada 3 metode yang digunakan untuk memperkirakan data hujan periode kosong diantaranya:

1. Rata-rata aritmatik (*arithmetical average*),
2. Perbandingan normal (*normal ratio*), dan
3. Kantor cuaca Nasional Amerika Serikat (*US.National Weather service*).

Ada kesamaan metode perhitungan dari buku Hidrologi Operasional Jilid Kesatu dengan buku Mengenal Dasar – dasar Hidrologi, yaitu Metode rata – rata aritmatik dengan rata – rata aljabar, dan *Normal Ratio Method* dengan perbandingan normal (*normal ratio*) yang terdapat dibuku Soewarno. Yang berbeda adalah metode Kantor Cuaca Amerika Serikat.

## 1. Normal Ratio Method

(K Lin Ley, 1958) menyarankan satu metode yang disebut "Normal Ratio Method" sebagai berikut:

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \frac{A_{n_x}}{A_{n_i}}$$

Dengan :

$D_x$  = Data tinggi hujan harian maksimum di stasiun x

n = Jumlah stasiun di sekitar x untuk mencari data di x

$d_i$  = Data tinggi hujan harian maksimum di stasiun i

$A_{n_x}$  = Tinggi hujan rata-rata tahunan di stasiun x

$A_{n_i}$  = Tinggi hujan rata-rata tahunan di stasiun sekitar x

Cara *Inversed Square Distance*:

Persamaan yang digunakan dalam cara *Inversed Square Distance* adalah:

$$P_x = \frac{\frac{1}{(dXA)^2} P_A + \frac{1}{(dXB)^2} P_B + \frac{1}{(dXC)^2} P_C}{\frac{1}{(dXA)^2} + \frac{1}{(dXB)^2} + \frac{1}{(dXC)^2}}$$

Dengan:

$P_x$  = Tinggi hujan yang dipertanyakan

$P_A, P_B, P_C$  = Tinggi hujan pada stasiun disekitarnya

$dXA, dXB, dXC$  = Jarak stasiun X terhadap masing masing Stasiun A, B, C

Rata - rata Aljabar

Rata-rata aljabar ini digunakan apabila kekurangan data kurang dari 10%. Misalnya diketahui: Hujan rata – rata tahunan di A = 750 mm =  $\bar{X}_A$ , hujan rata – rata tahunan di B = 725 mm =  $\bar{X}_B$ . Ditanya: bagaimana mengisi data hujan di A pada suatu tahun tertentu, bila pada tahun yang Sama di B jumlah hujan = 710 mm. Penyelesaiannya adalah:

$$X_A = \frac{\bar{X}_A}{\bar{X}_B} \cdot X_B = \frac{750}{725} \cdot 710 \text{ mm} \\ = 735 \text{ mm}$$

Jadi besarnya data hujan di A adalah 735 mm.

## 2. Metode Kantor Cuaca Amerika Serikat

Metode ini memerlukan data dari 4 (empat) pos hujan sebagai pos indeks (*index station*) yaitu misalnya pos hujan A, B, C dan D yang berlokasi disekeliling pos hujan X yang diperkirakan data hujannya. Bila pos indeks itu lokasinya berada disetiap kuadran dari garis yang menghubungkan utara-selatan dan timur-barat melalui titik pusat dipos hujan X. Persamaannya adalah:

$$H_x = \frac{\sum(H_i / Li^2)}{\sum\left(\frac{1}{Li^2}\right)}$$

Dimana

- $H_x$  = tebal hujan dipos X yang akan diperkirakan
- $H_i$  = tebal hujan dipos A, B, C, dan D.
- $Li$  = Menunjukkan jarak pos hujan A, B, C dan D terhadap pos hujan X.

Misalnya: dari suatu DPS (Daerah Pengaliran Sungai) luas 140 Km<sup>2</sup> terdapat 5 buah pos hujan X, A, B, C, dan D. Pada suatu bulan pos hujan X rusak. Tentukan tebal hujan di X bila pos itu

dikelilingi pos hujan A, B, C, dan D sebagai pos indeks yang terletak di setiap kuadran dengan data:

Kuadran	Pos Indeks	Hujan (mm)	Jarak dari X (Km)
I	B	100	5
II	C	90	10
III	A	110	8
IV	D	120	6

Data pos hujan X dapat dihitung dengan persamaan diatas:

Kuadran	Pos Indeks	Hujan (mm)	Jarak dari X (Km)	$L^2$	$1/L$	$H/L^2$
I	B	100	5	25	0,0400	4
II	C	90	10	100	0,0100	0,9
III	A	110	8	64	0,0156	1,72
IV	D	120	6	36	0,0278	3,33
Jumlah					0,0933	9,952

Penyelesaiannya adalah:

$$H_x = \frac{\sum(H_i / Li^2)}{\sum\left(\frac{1}{Li^2}\right)}$$

$$H_x = (9,9520) / (0,09339)$$

$$H_x = 106,56 \text{ mm}$$

Jadi besarnya data hujan di pos X adalah 106,56 mm

## F. Teori Uji Konsistensi Data

Soewarno dalam Hidrologi Operasional Jilid Kesatu, data hujan yang diperlukan untuk analisis disarankan minimal 30 tahun data runtut waktu. Data itu harus tidak mengandung kesalahan dan harus dicek sebelum digunakan untuk analisis hidrologi lebih lanjut. Agar tidak mengandung kesalahan (*error*) dan harus tidak mengandung data kosong (*missing record*). Oleh karena itu harus dilakukan pengecekan kualitas data (*data quality control*). Beberapa kesalahan yang mungkin terjadi dapat disebabkan oleh faktor manusia, alat dan faktor lokasi. Bila terjadi kesalahan maka data itu dapat disebut tidak konsisten (*inconsistency*). Uji konsistensi (*consistency test*) berarti menguji kebenaran data. Data hujan disebut konsisten (*consistent*) berarti data yang terukur dan dihitung adalah teliti dan benar serata sesuai dengan fenomena saat hujan itu terjadi.

Beberapa cara untuk mengecek kualitas data hujan antara lain:

1. Melaksanakan pengecekan lapangan.
2. Melaksanakan pengecekan ke kantor pengolahan data.
3. Membandingkan data hujan dengan data iklim untuk lokasi yang sama.
4. Analisis kurva masa ganda (lengkung masa ganda).

## 5. Analisis statistik.

Salah satu cara untuk menguji konsistensi data hujan dengan menggunakan analisis kurva masa ganda (*double mass curve analysis*). Pengujian tersebut dapat diketahui apakah terjadi perubahan lingkungan atau perubahan cara menakar. Jika hasil uji menyatakan data hujan disuatu stasiun konsisten berarti pada daerah pengaruh system tersebut tidak terjadi perubahan lingkungan dan tidak terjadi perubahan cara menakar selama pencatatan data tersebut dan sebaliknya.

Ketelitian hasil perhitungan dalam ramalan Hidrologi sangat diperlukan, yang tergantung dari konsistensi data itu sendiri. Dalam suatu rangkaian data pengamatan hujan, dapat timbul non-homogenitas dan ketidaksesuaian, yang dapat mengakibatkan penyimpangan dalam perhitungan.

*Non-homogenitas* ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antarlain:

1. Perubahan letak stasiun.
2. Perubahan system pendataan.
3. Perubahan iklim.
4. Perubahan dalam lingkungan sekitar.

Uji konsistensi ini dapat diselidiki dengan cara membandingkan curah hujan tahunan kumulatif dari stasiun yang diteliti dengan harga kumulatif curah hujan rata-rata dari suatu jaringan stasiun dasar yang bersesuaian. Pada umumnya, metode ini disusun dengan urutan kronologis mundur dan dimulai dari tahun yang terakhir atau data yang terbaru hingga data terakhir.

Jika data hujan tidak konsisten karena perubahan atau gangguan lingkungan di sekitar tempat penakar hujan dipasang, misalnya, penakar hujan terlindung oleh pohon, terletak

berdekatan dengan gedung tinggi, perubahan penakaran dan pencatatan, pemindahan letak penakar dan sebagainya, memungkinkan terjadi penyimpangan terhadap *trend* semula. Hal ini dapat diselidiki dengan menggunakan lengkung massa ganda.

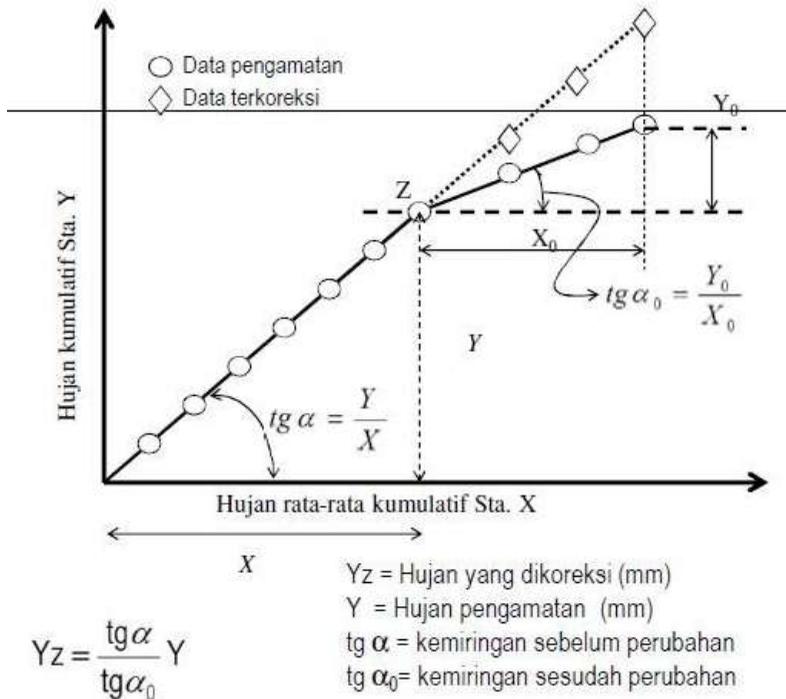
Kalau tidak ada perubahan terhadap lingkungan maka akan diperoleh garis ABC berupa garis lurus dan tidak terjadi patahan arah garis, maka data hujan tersebut adalah konsisten. Tetapi apabila pada tahun tertentu terjadi perubahan lingkungan, didapat garis patah ABC'. Penyimpangan tiba-tiba dari garis semula menunjukkan adanya perubahan tersebut, yang bukan disebabkan oleh perubahan iklim atau keadaan hidrologis yang dapat menyebabkan adanya perubahan *trend*. Sehingga data hujan tersebut dapat dikatakan tidak konsisten dan harus dilakukan koreksi.

Apabila data hujan tersebut tidak konsisten, maka dapat dilakukan koreksi dengan menggunakan rumus :

$$Yz = Fk x y$$
$$Fk = \left( \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_c} \right)$$

Keterangan:

- Yz : Data hujan yang diperbaiki, mm
- Y : Data hujan hasil pengamatan, mm
- Tg $\alpha$  : Kemiringan sebelum ada perubahan
- Tg  $\alpha_c$  : Kemiringan setelah ada perubahan



**Gambar 3. 10 Lengkung Massa Ganda**

Keterangan:

1. Pola yang terjadi berupa garis lurus dan tidak terjadi patahan arah garis itu, maka data hujan pos X adalah konsisten.
2. Pola yang terjadi berupa garis lurus dan terjadi patahan arah garis itu, maka data hujan pos X adalah tidak konsisten dan harus dilakukan koreksi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chow, . V. T. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co, Singapore for manufacture and export.
- K Lin Ley, R. Y. (1958). *HYDROLOGY FOR ENGINEERS*. McGRA W-HILL BOOK COMMPANY, New York, Toronto London.
- Suripin. (2004). *Sistem-Drainase-Perkotaan-Yang-Berkelanjutan*. Andi, Yogyakarta.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 84, Issue 9, pp. 1205-1217+1161). <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>
- Wheater, H. S., & Gober, P. (2015). Water security and the science agenda. *Water Resources Research*, 51(7), 5406–5424. <https://doi.org/10.1002/2015WR016892>

# **BAB 4**

## **EVAPORASI DAN TRANSPIRASI: PENGARUH TERHADAP KETERSEDIAAN AIR**

Oleh Dr. Ir. H. Apriyanto, S.E., M.Si., M.M

### **A. Pengertian Evaporasi dan Transpirasi**

Evaporasi adalah proses perubahan air dari bentuk cair menjadi uap akibat pemanasan oleh sinar matahari. Proses ini terjadi di permukaan air seperti sungai, danau, laut, dan tanah yang basah. Energi panas yang diterima oleh air menyebabkan molekul-molekul air bergerak lebih cepat dan akhirnya berubah menjadi gas yang naik ke atmosfer. Faktor-faktor yang mempengaruhi laju evaporasi antara lain suhu udara, kelembapan, tekanan udara, serta kecepatan angin. Semakin tinggi suhu dan semakin rendah kelembapan udara, maka semakin cepat laju evaporasi terjadi.

Sementara itu, transpirasi adalah proses penguapan air dari jaringan tumbuhan melalui stomata atau pori-pori kecil yang terdapat di permukaan daun. Air yang terserap dari tanah melalui akar akan bergerak ke seluruh bagian tumbuhan dan sebagian akan dilepaskan ke atmosfer dalam bentuk uap air. Proses ini berperan penting dalam siklus air dan membantu menjaga keseimbangan suhu tumbuhan. Selain itu, transpirasi juga mendukung penyerapan nutrisi dari tanah serta menjaga tekanan osmotik dalam sel tumbuhan.

Baik evaporasi maupun transpirasi merupakan bagian dari siklus hidrologi yang berperan dalam pergerakan air di bumi. Evaporasi terjadi di permukaan bebas air, sedangkan transpirasi terjadi pada tumbuhan. Kedua proses ini sering dikombinasikan dalam istilah evapotranspirasi, yang mengacu pada total kehilangan air dari suatu ekosistem melalui penguapan dari tanah dan transpirasi dari vegetasi. Evapotranspirasi sangat penting dalam mengatur ketersediaan air di suatu wilayah dan sering digunakan dalam perhitungan kebutuhan irigasi pertanian.

Proses evaporasi dan transpirasi dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti intensitas cahaya matahari, suhu udara, kelembapan relatif, angin, dan ketersediaan air di tanah. Misalnya, pada musim kemarau dengan suhu tinggi dan kelembapan rendah, laju evaporasi dan transpirasi akan meningkat secara signifikan. Sebaliknya, saat musim hujan dengan kelembapan tinggi, laju penguapan akan lebih rendah karena udara sudah jenuh dengan uap air. Oleh karena itu, pemahaman tentang kedua proses ini sangat penting dalam bidang pertanian, meteorologi, dan pengelolaan sumber daya air.

Dalam konteks ekosistem, evaporasi dan transpirasi memiliki peran ekologis yang sangat besar. Evaporasi membantu dalam pembentukan awan dan curah hujan yang mendukung kehidupan di bumi, sedangkan transpirasi berperan dalam keseimbangan suhu tumbuhan dan sirkulasi air dalam ekosistem darat. Selain itu, tumbuhan dengan tingkat transpirasi tinggi dapat membantu mendinginkan lingkungan sekitarnya serta meningkatkan kelembapan udara, yang pada akhirnya berdampak pada iklim mikro suatu daerah. Oleh karena itu, pemahaman tentang evaporasi dan transpirasi tidak hanya bermanfaat dalam ilmu pengetahuan alam, tetapi juga dalam

penerapan praktis di berbagai bidang, termasuk pertanian, kehutanan, dan perencanaan lingkungan.

Selain peranannya dalam siklus hidrologi, evaporasi dan transpirasi juga berdampak pada keseimbangan energi di atmosfer. Evaporasi membutuhkan energi panas dari lingkungan, sehingga membantu mengurangi suhu permukaan tanah dan air. Hal ini dapat dirasakan terutama di daerah perairan, di mana suhu udara cenderung lebih sejuk dibandingkan daerah daratan yang kering. Demikian pula, transpirasi dari tumbuhan dapat menurunkan suhu lingkungan sekitarnya karena proses pelepasan uap air dari daun menyerap panas dari atmosfer. Oleh karena itu, daerah dengan vegetasi yang lebat seperti hutan hujan cenderung memiliki suhu yang lebih rendah dibandingkan daerah yang gundul atau mengalami deforestasi.

Selain itu, evaporasi dan transpirasi juga berperan dalam ketersediaan air tanah. Saat air menguap dari permukaan tanah dan melalui tumbuhan, terjadi perubahan kelembapan di dalam tanah. Jika laju evaporasi dan transpirasi lebih tinggi daripada curah hujan yang masuk ke tanah, maka tanah akan menjadi kering dan berisiko mengalami kekeringan. Inilah mengapa dalam bidang pertanian, pengelolaan evapotranspirasi sangat penting untuk memastikan tanaman mendapatkan pasokan air yang cukup. Petani sering menggunakan teknik irigasi yang efisien untuk mengurangi kehilangan air akibat evaporasi, seperti sistem irigasi tetes yang langsung mengalirkan air ke akar tanaman.

Evaporasi juga berperan dalam pembentukan awan dan pola cuaca di suatu wilayah. Saat air menguap ke atmosfer, uap air akan mengalami kondensasi dan membentuk awan yang akhirnya dapat menghasilkan hujan. Siklus ini sangat penting

dalam mendukung keberlanjutan kehidupan di bumi, karena air yang menguap akan kembali dalam bentuk presipitasi yang menyuplai kebutuhan air bagi manusia, hewan, dan tumbuhan. Faktor-faktor seperti pola angin, tekanan udara, dan suhu permukaan bumi mempengaruhi laju evaporasi dan distribusi curah hujan, sehingga mempengaruhi pola cuaca dan iklim di berbagai belahan dunia.

Di sisi lain, perubahan iklim global turut berdampak pada evaporasi dan transpirasi. Peningkatan suhu akibat pemanasan global mempercepat laju evaporasi dan transpirasi, yang dapat menyebabkan berkurangnya ketersediaan air di beberapa wilayah. Beberapa daerah yang sebelumnya memiliki keseimbangan air yang stabil kini mengalami kekeringan berkepanjangan akibat meningkatnya penguapan dan menurunnya curah hujan. Selain itu, deforestasi yang masif juga mengurangi jumlah pohon yang melakukan transpirasi, sehingga menyebabkan ketidakseimbangan dalam siklus air dan meningkatkan suhu di suatu wilayah. Oleh karena itu, upaya konservasi hutan dan pengelolaan sumber daya air yang bijak menjadi sangat penting untuk menjaga keseimbangan alam.

Secara keseluruhan, evaporasi dan transpirasi adalah proses alami yang memiliki dampak besar terhadap siklus air, iklim, dan keseimbangan ekosistem. Kedua proses ini tidak hanya berkontribusi terhadap pembentukan awan dan curah hujan, tetapi juga membantu dalam menjaga keseimbangan suhu dan ketersediaan air di lingkungan. Dalam praktiknya, pemahaman tentang evaporasi dan transpirasi sangat penting dalam berbagai bidang, seperti meteorologi, pertanian, kehutanan, dan perencanaan tata ruang. Dengan memahami dan mengelola kedua proses ini secara bijak, manusia dapat mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air serta

mengurangi dampak negatif dari perubahan iklim dan degradasi lingkungan.

## **B. Keterkaitan Evaporasi, Transpirasi, dan Ketersediaan Sumber Daya Air**

Evaporasi, transpirasi, dan ketersediaan sumber daya air merupakan tiga aspek yang saling berkaitan dalam siklus hidrologi dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Evaporasi adalah proses penguapan air dari permukaan terbuka seperti danau, sungai, dan tanah yang terkena sinar matahari. Sementara itu, transpirasi adalah proses pelepasan uap air dari jaringan tanaman melalui stomata daun. Kedua proses ini sering disebut sebagai evapotranspirasi, yang berkontribusi terhadap hilangnya air dari permukaan bumi ke atmosfer dan mempengaruhi ketersediaan air di suatu wilayah.

Ketersediaan sumber daya air sangat bergantung pada keseimbangan antara jumlah air yang masuk dan keluar dari suatu sistem hidrologi. Evaporasi dan transpirasi menyebabkan hilangnya air dari permukaan tanah dan vegetasi, sementara curah hujan, limpasan air permukaan, dan infiltrasi ke dalam tanah menjadi sumber utama pengisian kembali cadangan air. Apabila tingkat evaporasi dan transpirasi lebih tinggi daripada curah hujan yang masuk, maka ketersediaan air dalam suatu wilayah akan berkurang, yang dapat menyebabkan kekeringan dan kelangkaan air bagi ekosistem serta kebutuhan manusia.

Vegetasi memiliki peran penting dalam mengatur evaporasi dan transpirasi. Hutan dan tanaman berfungsi sebagai penyimpan air alami yang dapat memperlambat aliran air dan meningkatkan infiltrasi ke dalam tanah, sehingga membantu menjaga keseimbangan air tanah. Namun, jika terjadi deforestasi atau degradasi lahan akibat aktivitas manusia seperti pertanian

intensif dan urbanisasi, maka tingkat evaporasi akan meningkat, sementara transpirasi dari vegetasi berkurang. Hal ini dapat menyebabkan berkurangnya kelembaban tanah dan meningkatkan risiko kekeringan serta menurunkan ketersediaan sumber daya air dalam jangka panjang.

Perubahan iklim juga memainkan peran dalam interaksi antara evaporasi, transpirasi, dan ketersediaan air. Peningkatan suhu global menyebabkan tingkat evaporasi yang lebih tinggi, yang berpotensi mempercepat hilangnya air dari tanah dan badan air. Selain itu, perubahan pola curah hujan dapat mempengaruhi distribusi air, menyebabkan wilayah tertentu mengalami kelebihan air sementara wilayah lain mengalami kekeringan berkepanjangan. Kondisi ini dapat mengancam ketahanan air dan berdampak pada berbagai sektor seperti pertanian, industri, dan kebutuhan domestik.

Untuk menjaga keseimbangan antara evaporasi, transpirasi, dan ketersediaan sumber daya air, diperlukan upaya konservasi dan pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Praktik seperti reboisasi, penerapan teknik irigasi hemat air, dan pembangunan waduk atau sumur resapan dapat membantu mengurangi kehilangan air serta meningkatkan cadangan air tanah. Selain itu, kebijakan pengelolaan air berbasis ekosistem dan adaptasi terhadap perubahan iklim menjadi kunci dalam menjaga ketersediaan air untuk kebutuhan masa kini dan masa depan.

Peningkatan aktivitas manusia juga memiliki dampak besar terhadap hubungan antara evaporasi, transpirasi, dan ketersediaan sumber daya air. Urbanisasi yang pesat menyebabkan berkurangnya daerah resapan air akibat alih fungsi lahan dari hutan dan lahan pertanian menjadi kawasan permukiman dan industri. Permukaan yang tertutup beton dan

aspal meningkatkan laju limpasan air hujan sehingga mengurangi infiltrasi ke dalam tanah. Akibatnya, cadangan air tanah berkurang dan keseimbangan antara evaporasi dan transpirasi terganggu, yang dapat memperburuk kondisi kekeringan di wilayah tertentu.

Selain itu, eksploitasi sumber daya air yang berlebihan, seperti pengambilan air tanah dalam jumlah besar untuk keperluan domestik, pertanian, dan industri, dapat mempercepat penurunan muka air tanah. Dalam kondisi normal, air tanah dapat tetap stabil melalui proses pengisian ulang yang berasal dari infiltrasi air hujan dan aliran permukaan. Namun, jika laju pengambilan air lebih besar daripada laju pengisian ulang, maka cadangan air tanah akan terus menurun, menyebabkan fenomena seperti intrusi air laut di daerah pesisir dan penurunan kualitas air tanah. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara evaporasi, transpirasi, dan sumber daya air sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia dan kebijakan pengelolaan air.

Ekosistem alami, seperti lahan basah dan hutan, memainkan peran penting dalam mengatur siklus hidrologi dengan cara menyimpan air selama musim hujan dan melepaskannya secara perlahan selama musim kemarau. Lahan basah, misalnya, bertindak sebagai spons alami yang menyerap kelebihan air dan mengurangi risiko banjir. Namun, degradasi lahan basah akibat pengeringan untuk pertanian atau pembangunan infrastruktur dapat mengganggu keseimbangan air dalam ekosistem. Ketika lahan basah berkurang, kapasitas retensi air juga menurun, menyebabkan peningkatan evaporasi langsung ke atmosfer dan mengurangi cadangan air yang dapat digunakan oleh tanaman dan manusia.

Teknologi dan inovasi dalam pengelolaan sumber daya air menjadi solusi penting dalam menghadapi tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim dan peningkatan kebutuhan air. Penerapan teknologi seperti desalinasi air laut, pemanenan air hujan, dan sistem irigasi pintar berbasis sensor dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mengurangi ketergantungan pada sumber daya air tanah. Selain itu, pendekatan berbasis ekosistem, seperti agroforestri dan konservasi tanah, dapat meningkatkan infiltrasi air dan mengurangi dampak negatif dari evaporasi yang berlebihan.

Kesadaran dan partisipasi masyarakat dalam menjaga keseimbangan siklus air juga menjadi faktor krusial dalam upaya konservasi sumber daya air. Edukasi tentang pentingnya efisiensi penggunaan air, rehabilitasi daerah aliran sungai (DAS), serta penerapan metode pertanian berkelanjutan dapat membantu mengurangi tekanan terhadap sumber daya air. Dengan langkah-langkah yang tepat dan sinergi antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat, keseimbangan antara evaporasi, transpirasi, dan ketersediaan sumber daya air dapat tetap terjaga demi keberlanjutan kehidupan di masa depan.

### **C. Tantangan dalam Mengelola Evaporasi dan Transpirasi untuk Ketahanan Air**

Mengelola evaporasi dan transpirasi merupakan tantangan besar dalam upaya menjaga ketahanan air, terutama di wilayah dengan curah hujan yang rendah atau musim kemarau yang panjang. Evaporasi adalah proses hilangnya air dari permukaan tanah, danau, serta waduk akibat panas matahari, sementara transpirasi adalah pelepasan uap air dari tanaman ke atmosfer. Kedua proses ini, yang dikenal sebagai evapotranspirasi, dapat menyebabkan defisit air yang signifikan jika tidak dikelola

dengan baik. Faktor-faktor seperti suhu udara yang tinggi, angin kencang, serta rendahnya kelembapan tanah dapat mempercepat laju evapotranspirasi, sehingga meningkatkan risiko kekeringan dan krisis air bagi masyarakat serta sektor pertanian. Oleh karena itu, memahami dan mengendalikan proses ini menjadi langkah penting dalam menjaga ketersediaan air untuk jangka panjang.

Salah satu tantangan utama dalam mengelola evaporasi adalah meningkatnya suhu global akibat perubahan iklim. Peningkatan suhu menyebabkan penguapan air dari permukaan tanah dan sumber daya air lainnya terjadi lebih cepat, sehingga mengurangi cadangan air yang tersedia. Selain itu, deforestasi dan urbanisasi yang tidak terkendali juga memperburuk laju evaporasi, karena menghilangkan vegetasi yang berperan dalam menahan kelembapan tanah. Di daerah pertanian, sistem irigasi yang kurang efisien sering kali menyebabkan air menguap lebih cepat sebelum mencapai akar tanaman, yang pada akhirnya mengurangi efektivitas penggunaan air. Oleh karena itu, strategi seperti penggunaan mulsa, pengelolaan tanah yang lebih baik, serta penerapan teknologi irigasi tetes sangat diperlukan untuk mengurangi laju evaporasi.

Transpirasi juga menjadi tantangan dalam ketahanan air, terutama di sektor pertanian yang sangat bergantung pada tanaman untuk produksi pangan. Meskipun transpirasi penting untuk fotosintesis dan siklus air, tanaman yang memiliki tingkat transpirasi tinggi dapat menguras ketersediaan air lebih cepat, terutama dalam kondisi kekeringan. Selain itu, penggunaan varietas tanaman yang tidak sesuai dengan kondisi iklim setempat dapat memperburuk masalah ini. Untuk mengatasi tantangan ini, pemilihan tanaman yang lebih tahan kekeringan serta penerapan teknik agronomi seperti agroforestri dan rotasi

tanaman dapat membantu mengurangi kehilangan air melalui transpirasi yang berlebihan.

Tantangan lainnya dalam mengelola evaporasi dan transpirasi adalah keterbatasan teknologi dan kebijakan yang belum sepenuhnya mendukung efisiensi penggunaan air. Banyak daerah yang belum memiliki infrastruktur yang memadai untuk mengelola sumber daya air secara optimal, sehingga air terbuang percuma akibat kebocoran irigasi atau penguapan yang tidak terkendali. Selain itu, kebijakan terkait pengelolaan sumber daya air sering kali belum berbasis pada data ilmiah yang akurat, sehingga tidak mampu memberikan solusi yang tepat guna. Oleh karena itu, peningkatan penelitian, pemanfaatan teknologi pemantauan kelembapan tanah, serta penerapan kebijakan berbasis bukti menjadi langkah penting dalam menghadapi tantangan ini.

Untuk mencapai ketahanan air yang berkelanjutan, diperlukan pendekatan holistik yang menggabungkan teknologi, kebijakan, dan partisipasi masyarakat dalam mengelola evaporasi dan transpirasi. Peningkatan kesadaran akan pentingnya konservasi air, penerapan teknik pertanian yang ramah lingkungan, serta pengembangan infrastruktur yang efisien akan sangat membantu dalam menjaga keseimbangan siklus air. Selain itu, kerja sama antara pemerintah, akademisi, dan sektor swasta dalam riset serta implementasi solusi inovatif menjadi kunci utama dalam menghadapi tantangan ini. Dengan langkah-langkah yang tepat, ketahanan air dapat dicapai, sehingga ketersediaan air bagi generasi mendatang tetap terjaga.

Selain faktor iklim dan kebijakan, tantangan dalam mengelola evaporasi dan transpirasi juga berkaitan dengan keterbatasan sumber daya manusia dan teknologi dalam

implementasi strategi konservasi air. Banyak petani dan pengelola sumber daya air yang belum memiliki pemahaman yang cukup tentang teknik mitigasi evaporasi dan transpirasi yang efektif. Kurangnya edukasi mengenai metode irigasi efisien, seperti irigasi tetes dan sistem pemanenan air hujan, menyebabkan praktik penggunaan air yang boros masih sering terjadi. Di sisi lain, pengembangan teknologi pemantauan kelembapan tanah dan atmosfer memerlukan investasi yang tidak sedikit, sehingga sulit diterapkan di daerah yang memiliki keterbatasan ekonomi. Untuk mengatasi tantangan ini, pelatihan dan penyuluhan yang berkelanjutan kepada petani dan pengelola air sangat diperlukan guna meningkatkan efektivitas penggunaan air dalam berbagai sektor.

Selain itu, aspek ekologi juga memainkan peran penting dalam pengelolaan evaporasi dan transpirasi. Perubahan ekosistem alami akibat deforestasi, urbanisasi, dan konversi lahan pertanian mengubah pola evapotranspirasi yang ada, sering kali dengan dampak negatif terhadap ketersediaan air. Hilangnya tutupan hutan menyebabkan berkurangnya kelembapan tanah dan meningkatnya aliran permukaan, yang pada akhirnya mempercepat hilangnya air dari suatu daerah. Di wilayah perkotaan, penggunaan permukaan kedap air seperti beton dan aspal meningkatkan suhu permukaan dan mempercepat penguapan, yang semakin memperburuk krisis air. Oleh karena itu, pendekatan berbasis ekosistem, seperti restorasi hutan, pengelolaan lanskap berkelanjutan, dan peningkatan ruang hijau perkotaan, dapat menjadi solusi untuk menyeimbangkan siklus air secara alami.

Dalam sektor industri dan perkotaan, pengelolaan evaporasi dan transpirasi juga menghadapi tantangan dalam hal efisiensi penggunaan air dan pengolahan limbah. Banyak industri yang masih menggunakan air dalam jumlah besar untuk

proses produksi tanpa adanya sistem daur ulang yang optimal. Selain itu, air limbah yang tidak diolah dengan baik dapat mencemari sumber daya air yang ada, sehingga memperburuk ketahanan air di suatu wilayah. Penggunaan teknologi hemat air dalam industri, seperti sistem pendingin berbasis udara dan teknologi daur ulang air limbah, dapat membantu mengurangi tingkat evaporasi yang tidak terkendali dan memastikan pasokan air yang lebih stabil. Pemerintah dan sektor swasta perlu berkolaborasi dalam menciptakan regulasi yang lebih ketat terkait penggunaan dan pengolahan air agar keseimbangan ekosistem tetap terjaga.

Perubahan pola cuaca akibat pemanasan global juga semakin memperumit pengelolaan evaporasi dan transpirasi, terutama dalam sektor pertanian yang bergantung pada pola musim yang stabil. Pergeseran musim hujan dan musim kemarau yang semakin tidak menentu menyebabkan sulitnya merencanakan irigasi yang efisien, sehingga meningkatkan risiko gagal panen akibat kekeringan. Selain itu, fenomena gelombang panas yang semakin sering terjadi mempercepat penguapan air dari tanah dan tanaman, yang dapat berdampak buruk pada ketahanan pangan global. Oleh karena itu, diperlukan sistem prediksi cuaca yang lebih canggih dan adaptasi strategi pertanian berbasis iklim agar sektor pertanian dapat lebih siap menghadapi perubahan lingkungan yang dinamis.

Secara keseluruhan, pengelolaan evaporasi dan transpirasi untuk ketahanan air memerlukan pendekatan yang terpadu dan berbasis ilmiah. Sinergi antara teknologi, kebijakan, edukasi, serta konservasi ekosistem menjadi kunci utama dalam mengatasi tantangan ini. Selain inovasi dalam sistem irigasi dan pemantauan kelembapan tanah, penting juga untuk memperkuat kesadaran masyarakat dalam menjaga

keseimbangan penggunaan air di berbagai sektor. Dengan langkah-langkah yang komprehensif dan berkelanjutan, diharapkan ketahanan air dapat terwujud, sehingga ketersediaan air bersih untuk generasi mendatang tetap terjaga.

#### **D. Evaporasi dan Transpirasi dalam Konteks Pengelolaan Sumber Daya Air di Daerah Tropis**

Evaporasi dan transpirasi merupakan dua proses utama dalam siklus hidrologi yang memiliki peran penting dalam pengelolaan sumber daya air di daerah tropis. Evaporasi adalah proses penguapan air dari permukaan tanah, sungai, danau, serta lautan akibat pemanasan oleh sinar matahari, sedangkan transpirasi adalah penguapan air yang terjadi melalui stomata pada daun tumbuhan. Di daerah tropis yang memiliki suhu tinggi dan intensitas radiasi matahari yang besar, laju evaporasi cenderung tinggi, menyebabkan kehilangan air yang signifikan dari permukaan perairan dan tanah. Faktor lain seperti kelembaban udara, kecepatan angin, dan tutupan vegetasi juga berkontribusi terhadap besarnya tingkat evaporasi dan transpirasi di suatu wilayah.

Dalam konteks pengelolaan sumber daya air, tingginya laju evaporasi di daerah tropis menjadi tantangan utama, terutama bagi ketersediaan air permukaan dan tanah untuk kebutuhan pertanian, industri, dan konsumsi rumah tangga. Kehilangan air akibat evaporasi yang tinggi dapat mempercepat pengeringan waduk, sungai, dan lahan pertanian yang bergantung pada sistem irigasi. Oleh karena itu, strategi untuk mengurangi laju evaporasi, seperti penerapan mulsa pada lahan pertanian, penggunaan teknologi irigasi tetes, serta penanaman tanaman penutup tanah, menjadi penting dalam menjaga efisiensi penggunaan air. Selain itu, pembuatan bendungan dan embung juga dapat membantu mengurangi dampak negatif evaporasi

dengan menahan air dalam sistem yang lebih terlindungi dari sinar matahari langsung.

Transpirasi, di sisi lain, berperan dalam siklus air dan keseimbangan ekosistem, terutama melalui proses evapotranspirasi, yaitu kombinasi antara evaporasi dan transpirasi yang berkontribusi terhadap kelembaban udara serta pembentukan awan dan curah hujan. Di daerah tropis, vegetasi yang lebat, seperti hutan hujan, memiliki peran penting dalam mempertahankan keseimbangan hidrologi melalui transpirasi yang membantu siklus air berjalan dengan baik. Namun, deforestasi dan konversi lahan untuk keperluan pertanian dan perkotaan dapat mengurangi tingkat transpirasi secara signifikan, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi pola curah hujan serta meningkatkan risiko kekeringan di beberapa wilayah.

Untuk memastikan ketersediaan air yang berkelanjutan, pengelolaan sumber daya air di daerah tropis harus memperhitungkan keseimbangan antara evaporasi dan transpirasi. Upaya konservasi hutan dan reforestasi sangat diperlukan untuk mempertahankan peran transpirasi dalam siklus hidrologi, sekaligus mengurangi risiko erosi tanah dan banjir akibat perubahan pola curah hujan. Selain itu, penggunaan tanaman yang lebih efisien dalam menggunakan air, seperti tanaman yang memiliki tingkat transpirasi lebih rendah tetapi tetap produktif, dapat menjadi strategi dalam pertanian berkelanjutan. Kombinasi antara pendekatan ekologi dan teknologi menjadi kunci utama dalam menghadapi tantangan pengelolaan air di daerah tropis yang rentan terhadap fluktuasi iklim.

Secara keseluruhan, pemahaman terhadap evaporasi dan transpirasi dalam konteks pengelolaan sumber daya air di

daerah tropis sangatlah penting dalam menjaga keseimbangan antara kebutuhan air dan kelestarian lingkungan. Langkah-langkah mitigasi untuk mengurangi kehilangan air akibat evaporasi, serta upaya mempertahankan peran transpirasi melalui konservasi vegetasi, harus menjadi bagian dari strategi pengelolaan air yang terpadu. Dengan pendekatan yang berbasis ilmiah dan berkelanjutan, kesejahteraan masyarakat yang bergantung pada sumber daya air dapat tetap terjaga, sekaligus melindungi ekosistem dari dampak negatif perubahan lingkungan.

Selain peran langsung dalam siklus air, evaporasi dan transpirasi juga memengaruhi suhu dan kelembaban di daerah tropis. Laju evaporasi yang tinggi berkontribusi terhadap pendinginan permukaan tanah dan badan air, sementara transpirasi dari vegetasi membantu menjaga keseimbangan kelembaban udara. Ketika tanaman melepaskan uap air ke atmosfer melalui stomata, proses ini menyerap panas dari lingkungan, menciptakan efek pendinginan alami yang membantu mengurangi suhu ekstrem di daerah tropis. Oleh karena itu, penurunan tutupan vegetasi akibat deforestasi tidak hanya mengurangi jumlah air yang dikembalikan ke atmosfer melalui transpirasi tetapi juga meningkatkan suhu lingkungan, yang dapat memperparah dampak gelombang panas dan perubahan iklim.

Di sektor pertanian, pemahaman tentang evaporasi dan transpirasi sangat penting dalam mengembangkan strategi irigasi yang efisien dan adaptif terhadap kondisi iklim tropis. Petani perlu memperhitungkan kebutuhan air tanaman berdasarkan tingkat evapotranspirasi, sehingga penggunaan air dapat lebih optimal tanpa pemborosan. Penggunaan teknologi seperti sensor kelembaban tanah dan model prediksi cuaca dapat membantu menentukan kapan dan berapa banyak air

yang perlu diberikan pada tanaman untuk menghindari kekurangan atau kelebihan air. Selain itu, penerapan teknik agroforestri, yang mengombinasikan tanaman pertanian dengan pepohonan, dapat meningkatkan efisiensi air dengan mengurangi evaporasi dari tanah sekaligus mempertahankan peran transpirasi dalam siklus hidrologi.

Dalam konteks perkotaan, pengelolaan air juga harus mempertimbangkan efek evaporasi dan transpirasi untuk menciptakan lingkungan yang lebih nyaman dan berkelanjutan. Kota-kota di daerah tropis sering menghadapi fenomena "*urban heat island*" (UHI), di mana suhu di daerah perkotaan lebih tinggi dibandingkan dengan daerah sekitarnya akibat dominasi permukaan beton dan aspal yang menyerap panas. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah peningkatan ruang hijau perkotaan, seperti taman kota, atap hijau, dan hutan kota, yang dapat meningkatkan transpirasi dan mengurangi panas berlebih melalui efek pendinginan alami. Penggunaan permukaan permeabel yang memungkinkan air meresap ke dalam tanah juga dapat mengurangi kehilangan air akibat evaporasi yang berlebihan dari permukaan yang kedap air.

Lebih jauh lagi, perubahan iklim global telah membawa tantangan baru dalam pengelolaan sumber daya air di daerah tropis, terutama dalam menghadapi pola curah hujan yang semakin tidak menentu. Peningkatan suhu global dapat mempercepat laju evaporasi, yang berpotensi memperburuk kekurangan air di wilayah yang sudah rentan terhadap kekeringan. Sementara itu, pergeseran pola hujan dapat menyebabkan curah hujan yang lebih ekstrem dalam periode tertentu, yang dapat meningkatkan risiko banjir serta mengganggu keseimbangan antara evaporasi dan transpirasi. Oleh karena itu, pendekatan adaptasi yang berbasis pada peningkatan ketahanan ekosistem, efisiensi penggunaan air,

serta penerapan teknologi ramah lingkungan menjadi semakin krusial dalam menghadapi perubahan iklim.

Dengan mempertimbangkan seluruh faktor yang telah dijelaskan, pengelolaan sumber daya air di daerah tropis tidak dapat dilakukan secara terpisah dari dinamika evaporasi dan transpirasi. Keseimbangan antara kedua proses ini harus tetap dijaga agar siklus air berjalan optimal dan ekosistem tetap sehat. Melalui kombinasi kebijakan yang mendukung konservasi air, penerapan teknologi hemat air, serta perlindungan terhadap vegetasi alami, masyarakat dapat memastikan bahwa air tetap tersedia untuk berbagai kebutuhan tanpa merusak keseimbangan lingkungan. Dengan demikian, pendekatan holistik dan berbasis ilmu pengetahuan sangat dibutuhkan untuk menjamin keberlanjutan sumber daya air di daerah tropis, terutama dalam menghadapi tantangan yang semakin kompleks akibat perubahan iklim dan pertumbuhan populasi.

### **E. Evaporasi dan Transpirasi dalam Konteks Kebijakan Pengelolaan Sumber Daya Alam**

Evaporasi dan transpirasi adalah dua proses yang berperan penting dalam siklus air di alam. Evaporasi adalah proses penguapan air dari permukaan tanah, air laut, dan badan air lainnya yang terjadi akibat pemanasan oleh sinar matahari. Proses ini mengubah air menjadi uap air yang kemudian naik ke atmosfer. Sementara itu, transpirasi adalah proses pelepasan uap air melalui stomata (lubang kecil) pada daun tanaman. Kedua proses ini bekerja secara sinergis dalam siklus hidrologi, mengatur jumlah uap air yang ada di atmosfer dan berperan dalam pembentukan awan serta presipitasi.

Dalam konteks kebijakan pengelolaan sumber daya alam (SDA), pemahaman tentang evaporasi dan transpirasi sangat

penting untuk merancang strategi pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Kebijakan yang memperhitungkan faktor-faktor tersebut dapat membantu dalam menjaga keseimbangan air di ekosistem, terutama di daerah-daerah yang rawan kekeringan atau banjir. Misalnya, kebijakan yang mendorong penghijauan dan penanaman tanaman yang efisien dalam melakukan transpirasi dapat meningkatkan kelembaban udara dan memperbaiki ketersediaan air di daerah tersebut.

Proses evaporasi yang berlangsung di badan air, seperti sungai, danau, atau waduk, memiliki dampak langsung terhadap ketersediaan air untuk kebutuhan manusia, pertanian, dan ekosistem. Kebijakan pengelolaan sumber daya air harus memperhitungkan jumlah air yang hilang melalui evaporasi untuk menghindari *over-eksploitasi* sumber daya air. Pengelolaan yang bijaksana termasuk pemeliharaan danau dan waduk, serta pengendalian polusi yang dapat meningkatkan laju evaporasi yang tidak terkendali.

Sementara itu, transpirasi tanaman memiliki peran dalam menjaga kesuburan tanah dan mendukung ketahanan air dalam sistem pertanian. Kebijakan pengelolaan sumber daya alam yang efektif harus mempromosikan pertanian yang ramah lingkungan, yang memanfaatkan tanaman yang memiliki kemampuan transpirasi yang optimal. Misalnya, tanaman yang dapat bertahan dalam kondisi kekeringan atau tanaman yang memiliki akar dalam untuk menyerap air secara efisien dapat membantu dalam konservasi air dan meningkatkan ketahanan pangan.

Selain itu, dampak perubahan iklim juga perlu dipertimbangkan dalam kebijakan pengelolaan SDA. Kenaikan suhu global dapat meningkatkan laju evaporasi, sementara transpirasi tanaman juga dipengaruhi oleh perubahan pola

curah hujan dan suhu. Oleh karena itu, kebijakan yang mengintegrasikan mitigasi perubahan iklim, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca, serta adaptasi terhadap perubahan iklim yang mempengaruhi pola evaporasi dan transpirasi, menjadi bagian yang tak terpisahkan dalam strategi pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan.

Kebijakan pengelolaan sumber daya alam juga perlu memperhatikan interaksi antara evapotranspirasi dan penggunaan lahan. Konversi lahan untuk tujuan pertanian, pemukiman, atau industri dapat mempengaruhi keseimbangan alami antara evaporasi dan transpirasi. Alih fungsi lahan, seperti deforestasi, mengurangi jumlah tanaman yang dapat melakukan transpirasi, sementara peningkatan area permukaan terbuka atau penggunaan bahan buatan dapat meningkatkan evaporasi. Kebijakan yang mengatur penggunaan lahan dan memperkenalkan praktek-praktek konservasi, seperti agroforestry atau pertanian berkelanjutan, dapat membantu memelihara atau bahkan meningkatkan kapasitas transpirasi tanaman dan mengurangi dampak negatif dari evaporasi berlebih.

Selain itu, pemantauan dan evaluasi yang terus-menerus terhadap pola evaporasi dan transpirasi menjadi sangat penting dalam pengelolaan sumber daya alam. Teknologi pemantauan berbasis satelit dan sensor cuaca dapat memberikan data yang lebih akurat tentang tingkat evaporasi di berbagai wilayah, serta memperkirakan kebutuhan air di masa depan. Pemerintah dan lembaga terkait perlu bekerja sama dalam menyusun kebijakan yang berbasis data, dengan mempertimbangkan variasi musiman dan lokal yang mempengaruhi proses-proses ini. Kebijakan tersebut juga harus disesuaikan dengan kondisi iklim setempat agar pengelolaan air dapat dilakukan secara optimal.

Di banyak negara, khususnya yang bergantung pada pertanian sebagai sumber utama penghidupan, pengelolaan evaporasi dan transpirasi menjadi aspek krusial dalam perencanaan pertanian. Kebijakan yang memberikan insentif bagi petani untuk mengadopsi teknik irigasi yang efisien, seperti irigasi tetes atau irigasi berbasis teknologi, dapat membantu mengurangi evaporasi yang tidak perlu dan meningkatkan efisiensi penggunaan air. Penggunaan tanaman yang membutuhkan sedikit air dan memiliki kapasitas transpirasi yang tinggi juga dapat mengurangi tekanan terhadap sumber daya air, terutama di wilayah yang mengalami kekeringan atau kurangnya pasokan air.

Perubahan penggunaan lahan yang tidak terkontrol dan eksploitasi berlebihan terhadap sumber daya alam juga dapat mengganggu proses alami yang mengatur distribusi air melalui evaporasi dan transpirasi. Oleh karena itu, kebijakan pengelolaan SDA harus mencakup prinsip-prinsip keberlanjutan yang memastikan bahwa aktivitas manusia tidak menghambat proses alam ini, tetapi justru mendukungnya. Misalnya, dengan menanam lebih banyak vegetasi di daerah perkotaan dan menjaga keberagaman ekosistem alami di kawasan hutan, dapat tercipta keseimbangan yang lebih baik antara kebutuhan manusia dan kelestarian alam.

Kesadaran masyarakat tentang pentingnya evaporasi dan transpirasi juga perlu ditingkatkan. Melalui pendidikan lingkungan, masyarakat dapat diajarkan untuk lebih menghargai peran tanaman dalam mempertahankan kualitas air dan iklim lokal. Selain itu, kebijakan yang mengedepankan peran serta masyarakat dalam menjaga vegetasi dan konservasi tanah dapat memperkuat pengelolaan air yang lebih ramah lingkungan. Oleh karena itu, kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat sangat diperlukan untuk

memastikan pengelolaan sumber daya alam yang adil, efisien, dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang semakin mendesak.

## **F. Peran Evaporasi dan Transpirasi dalam Ketahanan Air Global**

Evaporasi dan transpirasi merupakan dua proses penting dalam siklus hidrologi yang berperan besar dalam ketahanan air global. Evaporasi adalah proses penguapan air dari permukaan tubuh air seperti danau, sungai, laut, dan tanah, sementara transpirasi merujuk pada pelepasan uap air melalui pori-pori tanaman. Kedua proses ini bekerja bersama untuk menggerakkan siklus air, mengembalikan uap air ke atmosfer, dan memungkinkan pembentukan awan yang akhirnya menyebabkan presipitasi. Keduanya sangat penting dalam distribusi air di bumi, yang mempengaruhi keberlanjutan sumber daya air untuk kehidupan manusia, ekosistem, dan pertanian.

Secara langsung, evaporasi berfungsi untuk mengurangi jumlah air yang tersedia di permukaan tanah. Proses ini terjadi karena pemanasan matahari yang menyebabkan air berubah menjadi uap dan terangkat ke atmosfer. Meskipun begitu, evaporasi juga menciptakan keseimbangan bagi suplai air di bumi dengan mengembalikan uap air ke udara, yang nantinya akan menghasilkan hujan di tempat yang berbeda. Selain itu, evaporasi juga berperan dalam menurunkan suhu lingkungan karena energi panas dibutuhkan untuk menguapkan air dari permukaan.

Sementara itu, transpirasi oleh tanaman juga berkontribusi besar dalam mengatur ketahanan air di tingkat global. Tanaman menyerap air dari tanah melalui akarnya, kemudian menguapkannya melalui stomata atau pori-pori daun.

Proses ini tidak hanya membantu tanaman dalam mendinginkan dirinya, tetapi juga berfungsi sebagai bagian dari proses respirasi tanaman. Transpirasi ini berperan dalam siklus air karena air yang terlepas ke atmosfer pada akhirnya akan berbaur dengan uap air dari proses evaporasi dan membentuk awan yang dapat menurunkan hujan.

Kombinasi antara evaporasi dan transpirasi dikenal sebagai evapotranspirasi. Total evapotranspirasi memberikan gambaran penting tentang keseimbangan air di suatu wilayah. Wilayah dengan tingkat evapotranspirasi yang tinggi biasanya memiliki lebih sedikit air yang tersedia untuk digunakan dalam kegiatan manusia, sedangkan wilayah dengan tingkat evapotranspirasi yang rendah mungkin mengalami kelebihan air yang bisa menyebabkan banjir. Oleh karena itu, pemahaman yang baik mengenai peran keduanya dalam siklus hidrologi dapat membantu dalam pengelolaan sumber daya air yang lebih efisien, baik di tingkat lokal maupun global.

Secara keseluruhan, evaporasi dan transpirasi memainkan peran yang sangat besar dalam ketahanan air global dengan memengaruhi distribusi air di atmosfer, tanah, dan tubuh air. Tanpa adanya proses ini, air yang ada di bumi tidak akan bersirkulasi dengan baik, yang dapat mempengaruhi ketersediaan air bersih, produktivitas pertanian, dan ekosistem secara keseluruhan. Dengan perubahan iklim yang semakin nyata, penting untuk memahami bagaimana kedua proses ini dapat dipengaruhi oleh suhu global dan pola cuaca, sehingga strategi konservasi dan pengelolaan sumber daya air dapat dilakukan dengan lebih baik.

Evaporasi dan transpirasi juga berperan penting dalam pengendalian suhu global. Ketika uap air menguap dari permukaan air atau melalui proses transpirasi, energi panas

diperlukan untuk mengubah air menjadi uap. Proses ini dikenal sebagai "pendinginan evaporatif," yang membantu menurunkan suhu lingkungan sekitar. Misalnya, pada daerah dengan vegetasi yang lebat, seperti hutan hujan tropis, transpirasi tanaman yang tinggi dapat berfungsi untuk menurunkan suhu udara sekitar, menciptakan kondisi yang lebih stabil dan mendukung keberlanjutan kehidupan di sana. Sebaliknya, pengurangan vegetasi atau deforestasi dapat mengurangi transpirasi, yang pada gilirannya dapat meningkatkan suhu lingkungan dan mengganggu keseimbangan iklim regional serta global.

Peran evaporasi dan transpirasi juga berhubungan dengan ketersediaan air di wilayah-wilayah pertanian. Di daerah yang mengalami kekeringan, proses transpirasi dari tanaman bisa mengurangi kadar air yang tersedia dalam tanah, memperburuk masalah kelangkaan air. Oleh karena itu, proses ini menjadi faktor penting dalam strategi pengelolaan sumber daya air di sektor pertanian, terutama untuk tanaman yang membutuhkan banyak air. Sebaliknya, di daerah yang memiliki curah hujan tinggi, evaporasi yang besar juga bisa menjadi masalah, karena akan mengurangi air yang terkandung dalam tanah yang dapat digunakan oleh tanaman. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana evapotranspirasi mempengaruhi kebutuhan air tanaman dan bagaimana hal ini bisa dioptimalkan untuk keberlanjutan pertanian.

Dari sudut pandang lingkungan, kehilangan air yang berlebihan akibat evaporasi dan transpirasi dapat memperburuk masalah degradasi tanah, seperti erosi atau penurunan kualitas tanah. Proses evaporasi yang tinggi di daerah dengan curah hujan rendah atau tanah yang tandus dapat menyebabkan peningkatan salinitas tanah, yang menghambat kemampuan tanah untuk menahan air. Di sisi lain, transpirasi tanaman yang baik dapat membantu menjaga

kelembapan tanah dan mengurangi risiko erosi. Oleh karena itu, pemeliharaan vegetasi yang sehat, seperti hutan atau padang rumput, sangat penting untuk menjaga keseimbangan air tanah dan mencegah kerusakan ekosistem.

Selain itu, perubahan iklim yang sedang berlangsung memiliki dampak langsung terhadap pola evaporasi dan transpirasi di berbagai wilayah. Suhu global yang lebih tinggi dapat meningkatkan tingkat evaporasi di sebagian besar wilayah, menyebabkan peningkatan kehilangan air di permukaan. Dalam jangka panjang, hal ini dapat mempengaruhi ketersediaan air untuk ekosistem dan manusia, terutama di daerah yang sudah kekurangan air. Tanaman yang terpapar suhu yang lebih tinggi juga akan mengalami peningkatan transpirasi, yang mengarah pada berkurangnya cadangan air tanah. Oleh karena itu, memahami dampak perubahan iklim terhadap proses ini sangat penting untuk merencanakan langkah-langkah mitigasi yang efektif.

Secara keseluruhan, evaporasi dan transpirasi berfungsi sebagai dua mekanisme alami yang mengatur distribusi air di bumi. Proses-proses ini tidak hanya berperan dalam menjaga keberlanjutan siklus hidrologi tetapi juga memiliki dampak yang besar terhadap iklim, pertanian, dan lingkungan secara keseluruhan. Pengelolaan yang bijak terhadap kedua proses ini sangat penting, terutama dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim dan krisis air. Dengan demikian, penelitian lebih lanjut dan pemahaman yang mendalam tentang bagaimana faktor-faktor eksternal dapat mempengaruhi proses-proses ini akan sangat membantu dalam menjaga ketahanan air global di masa depan.

---

## DAFTAR PUSTAKA

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications*. Springer Science & Business Media.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Academic Press.
- Jackson, R.B., & Schenk, H.J. (2007). *Hydraulic lift and its influence on the soil water balance in natural ecosystems*. *Ecology*, 88(8), 2214-2222.
- Monteith, J.L. (1965). *Evaporation and environment*. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- Penman, H.L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145.
- Shuttleworth, W.J., & Wallace, J.S. (1985). *Evaporation from sparse crops – an energy combination theory*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(468), 839-855.
- Sorensen, R., & Hillel, D. (1983). *Water Movement in Soil: Mathematical Modelling and Applications*. Springer.
- van de Giesen, N., & Savenije, H.H.G. (2004). *The role of evapotranspiration in the water cycle of semi-arid regions*. Springer.
- Ahrens, C.D. (2009). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Cengage Learning.

- Alpert, P., & Shafir, H. (1991). *The evaporation of water from soil and the response of plants*. Springer-Verlag.
- Baker, M.L., & Boudrias, V. (2005). *Introduction to Hydrology*. McGraw-Hill.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley-Blackwell.
- Bouvier, C. (2002). *Soil-water relations in agriculture*. Elsevier Science.
- Brunsell, N.A., & Tolk, J.A. (2015). *Advances in Hydroinformatics*. Springer.
- Cai, W., & Cowan, T. (2006). *Evaporation and its contribution to water scarcity in semi-arid environments*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 123-133.
- Choudhury, B.J., & Shukla, J. (1995). *Evapotranspiration and water balance*. Springer.
- Craig, J. (2000). *The role of vegetation in the hydrological cycle*. Springer.
- Farquhar, G.D., & Sharkey, T.D. (1982). *Stomatal control of transpiration*. *Journal of Experimental Botany*, 33(5), 1023-1032.
- Flesch, T.K., & Wilson, J.A. (1994). *Evaporation from lake surfaces: Physics and applications*. *Water Resources Research*, 30(7), 2151-2159.
- Green, W.H., & Perry, R.H. (2007). *Engineering Fluid Mechanics*. Wiley.
- Jackson, R.B., & Canadell, J.G. (2006). *A synthesis of climate and biogeochemistry: Interactions between water, plants, and the atmosphere*. Springer.
- Kappen, L. (1950). *The role of transpiration in the moisture balance of ecosystems*. In *Ecology of Water Bodies* (pp. 50-68). Springer.
- Keller, A., & Bliesner, R.D. (1990). *Sprinkler and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold.

- Koren, V., & Liao, J. (1999). *Evaporation and transpiration in forests and their relation to climate and hydrological cycles*. Environmental Geology, 37(1), 65-72.
- Kremer, A. (2010). *Water balance in crop fields*. Springer.
- Monteith, J.L., & Unsworth, M.H. (1990). *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold.
- Mott, K.A., & Peak, D. (2007). *The significance of stomatal conductance in ecosystem water and carbon fluxes*. Advances in Ecological Research, 36, 103-130.
- Oke, T.R., & Lauer, M. (1994). *Evaporation processes in the urban environment*. Urban Climate, 12(3), 1-18.
- Pomeroy, J.W., & Gray, D.M. (1995). *Snowcover: The Interactions of Snow, Climate, and Water Resources*. Springer.
- Robinson, M., & Miller, L. (2009). *The hydrological cycle and its impacts on vegetation*. Journal of Hydrology, 366(1-4), 141-151.
- Singh, V.P. (2003). *Hydrology and Water Resources in the Tropics*. Springer Science & Business Media.
- Strain, B.R. (1990). *Transpiration and its role in ecosystem dynamics*. In Advances in Ecological Research, 20, 85-114.
- Turner, N.C. (1986). *Evapotranspiration from crops and trees in arid climates*. Elsevier.
- U.S. Geological Survey. (1997). *Hydrology of the Water Cycle*. U.S. Geological Survey Circular 1175.
- Van de Giesen, N., & Savenije, H.H.G. (2004). *The role of evapotranspiration in water cycles in tropical environments*. Journal of Hydrology, 291(3-4), 256-270.
- Wang, L., & Wang, H. (2011). *Hydrological modelling in the environment: Impacts of climate and vegetation*. Springer.
- Waring, R.H., & Schlesinger, W.H. (1985). *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. Academic Press.
- Waterman, L., & Davidson, R. (2003). *The hydrology of wetland ecosystems*. Springer.

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (2011). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ben-Asher, J., & Shani, U. (2007). *Water Conservation and Irrigation Technology*. Springer.
- Bucher, D., & Winfield, A. (2009). *Water Cycle and Transpiration Processes*. Cambridge University Press.
- Cavanaugh, M., & Clark, S. (2005). *Evapotranspiration and Water Stress in Plants*. Wiley-Blackwell.
- Chang, H., & Lee, H. (2011). *Climate Change and Its Impacts on Hydrology*. Springer.
- Collins, J.D. (2004). *Water Flow in Soil and Plants: Role of Transpiration and Evaporation*. Springer.
- Coutts, A.M., & Harris, R. (2014). *Urban Climate and Water Availability: Evapotranspiration in Cities*. Elsevier.
- Dugan, S., & Bowers, S. (2008). *Soil Water Management and Evapotranspiration in Agriculture*. Springer.
- Fearnside, P.M. (2001). *The Impact of Deforestation on Water Resources in the Amazon Basin*. *Environmental Conservation*, 28(1), 26-34.
- Figuroa, M., & Jaramillo, V. (2010). *Transpiration in Tropical and Temperate Ecosystems*. Springer.
- Fisher, J.B., & Salk, R. (2007). *Global Trends in Transpiration and Water Use Efficiency*. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38, 197-218.
- Gupta, A., & Kumar, A. (2007). *Soil Evaporation and Transpiration: Processes and Agricultural Impacts*. Springer.
- Houghton, R.A. (2003). *The Role of Transpiration in Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jones, H.G., & McCree, K.J. (1990). *The Influence of Transpiration on the Water Budget in Agro-Ecosystems*. Elsevier Science.

- Kendy, E., & Miao, Y. (2003). *Managing Water Resources for Ecosystem Sustainability: The Role of Evapotranspiration*. Springer.
- Kirkham, M.B. (2005). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Elsevier.
- Koller, A., & Madsen, M. (2011). *Evapotranspiration and its Impacts on Agricultural Water Use*. Elsevier.
- Liang, J., & Dhiagarajan, S. (2012). *Sustainable Water Management and Hydrology: Evapotranspiration Approaches*. Springer.
- Rigon, R., & Brasington, J. (2008). *The Hydrology of Catchment Systems and the Role of Evapotranspiration*. Cambridge University Press.
- Tanaka, K., & Ohta, T. (1996). *Water Resources Management and the Role of Evapotranspiration in Arid Zones*. Springer.



# **BAB 5**

## **PRESIPITASI: JENIS, POLA, DAN PENGUKURAN CURAH HUJAN**

Oleh Ir. Zulharnah, M.T

### **A. Pendahuluan**

Hidrologi adalah cabang ilmu bumi yang mempelajari pergerakan, distribusi, dan kualitas air di Bumi. Air merupakan sumber daya alam yang sangat penting bagi kehidupan manusia, hewan, dan tumbuhan. Siklus hidrologi menggambarkan pergerakan air secara terus-menerus dari atmosfer ke bumi dan kembali lagi ke atmosfer. Salah satu komponen penting dalam siklus hidrologi adalah presipitasi. Presipitasi adalah semua bentuk air yang jatuh dari atmosfer ke permukaan bumi. Bentuk presipitasi yang umum kita temui adalah hujan, salju, dan hujan es. Presipitasi terjadi ketika uap air di atmosfer mengalami kondensasi dan menjadi cukup berat untuk jatuh ke permukaan bumi. Selain hujan, salju, dan hujan es, ada juga jenis presipitasi lain seperti butiran hujan, embun, dan kabut. Jenis presipitasi yang terjadi dipengaruhi oleh kondisi atmosfer, seperti suhu dan kelembaban.

Pola presipitasi sangat bervariasi dan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti letak geografis, iklim, dan topografi. Ada pola presipitasi musiman, harian, dan spasial. Pola musiman misalnya, di daerah tropis sering terjadi musim hujan dan kemarau. Pola harian, curah hujan cenderung lebih tinggi pada siang hari. Pola spasial, curah hujan bervariasi dari satu tempat

ke tempat lain, misalnya daerah pegunungan cenderung memiliki curah hujan yang lebih tinggi. Pengukuran Curah Hujan: Untuk mengukur curah hujan, digunakan alat yang disebut rain gauge atau penakar hujan. Ada beberapa jenis rain gauge, seperti rain gauge biasa, tipping bucket rain gauge, dan recording rain gauge. Data curah hujan yang diperoleh dari rain gauge sangat penting untuk berbagai keperluan, seperti prakiraan cuaca, pengelolaan sumber daya air, dan perencanaan tata ruang.

Pengaruh faktor fisiografis wilayah Indonesia dan sekitarnya terhadap unsur-unsur iklim/cuaca telah menghasilkan 3 (tiga) tipe curah hujan, yakni: tipe ekuatorial, tipe monsun dan tipe lokal. Ada beberapa faktor fisis penting yang ikut berperan terhadap proses terjadinya hujan di wilayah Indonesia, di antaranya adalah: posisi lintang, ketinggian tempat, pola angin (angin pasat dan monsun), sebaran bentang darat dan perairan, serta pegunungan dan gunung-gunung yang tinggi (Tukidi, 2010).

## **B. Jenis-Jenis Presipitasi**

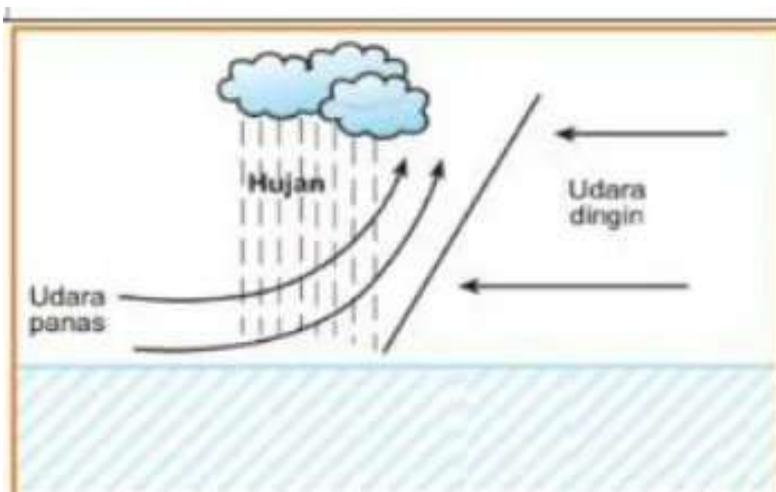
Presipitasi, atau lebih dikenal sebagai hujan dan segala bentuk turunannya, merupakan komponen penting dalam siklus hidrologi. Proses jatuhnya air dari atmosfer ke permukaan bumi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk pemanasan, pergerakan massa udara, dan topografi (Harris, 2021). Berdasarkan mekanisme pembentukannya, presipitasi dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis yang dirangkum dari beberapa sumber.

### **1. Presipitasi Konvektif: Hujan Lebat Akibat Pemanasan**

Presipitasi konvektif adalah jenis hujan yang paling umum kita temui, terutama di daerah tropis. Bayangkan ketika permukaan

bumi, seperti tanah atau aspal, dipanaskan oleh sinar matahari dalam waktu yang cukup lama. Udara di atas permukaan tersebut akan ikut memanas dan menjadi lebih ringan. Udara yang hangat ini kemudian akan naik ke atas dengan cepat, membawa uap air yang terkandung di dalamnya.

Saat udara naik semakin tinggi, suhunya akan turun drastis. Udara yang dingin tidak dapat menampung uap air sebanyak saat kondisi hangat. Akibatnya, uap air akan mengembun dan membentuk tetesan air yang kemudian bergabung menjadi awan cumulonimbus. Awan ini memiliki bentuk yang menjulang tinggi dan berwarna gelap, seringkali disertai kilatan petir. Ketika tetesan air di dalam awan menjadi terlalu berat untuk ditahan, hujan lebat pun turun dengan deras. Hujan konvektif biasanya bersifat lokal dan terjadi dalam waktu yang singkat, namun intensitasnya sangat tinggi .



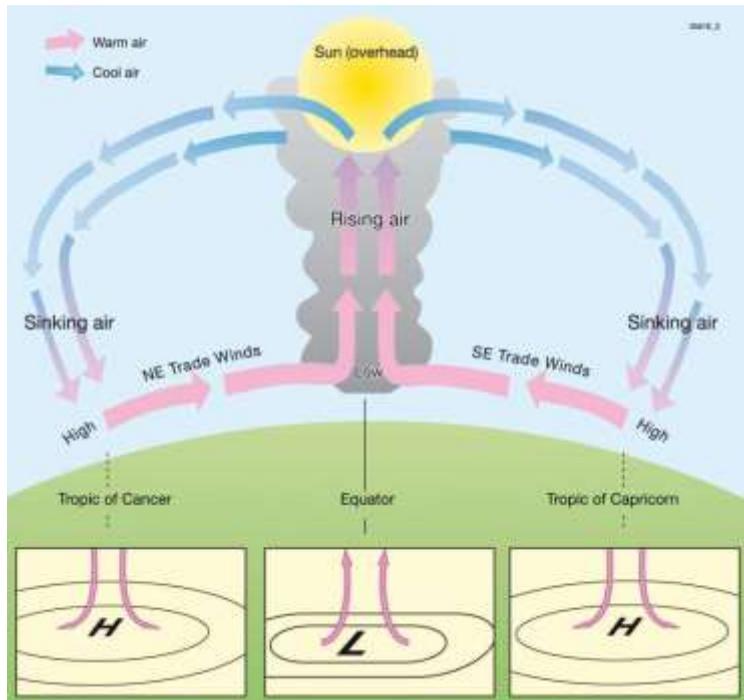
**Gambar 5. 1 Prensipitasi Konvekti**  
(Sumber : Roboguru, 2022)

Hujan konvektif sering kali disertai dengan fenomena cuaca ekstrem lainnya seperti angin kencang, petir, dan bahkan puting beliung. Hal ini disebabkan oleh adanya arus udara yang kuat di dalam awan cumulonimbus. Hujan konvektif juga dapat menyebabkan banjir bandang jika intensitas hujan sangat tinggi dan durasi hujan cukup lama. Oleh karena itu, penting bagi kita untuk selalu waspada dan mengikuti peringatan dini cuaca yang dikeluarkan oleh lembaga terkait.

## **2. Presipitasi Frontal: Pertemuan Massa Udara yang Berbeda**

Presipitasi frontal adalah salah satu jenis hujan yang terjadi akibat pertemuan antara dua massa udara yang berbeda sifatnya. Massa udara ini memiliki karakteristik yang berbeda-beda, seperti suhu, kelembaban, dan tekanan. Ketika dua massa udara yang berbeda ini bertemu, terjadilah interaksi yang kompleks dan menghasilkan berbagai fenomena cuaca, termasuk hujan. Ciri-ciri Hujan Frontal diantaranya:

- a. Bersifat Merata: Hujan yang dihasilkan oleh sistem frontal cenderung turun secara merata di area yang luas.
- b. Berlangsung Lama: Hujan frontal dapat berlangsung selama beberapa jam hingga beberapa hari.
- c. Disertai Fenomena Cuaca Lain: Selain hujan, sistem frontal juga sering disertai dengan angin kencang, perubahan suhu yang drastis, dan perubahan tekanan udara.



**Gambar 5. 2 Presipitasi Frontal**  
(Sumber : Pambudi, 2017)

Bayangkan dua massa udara yang memiliki sifat yang sangat berbeda, seperti udara hangat dan lembab dari lautan bertemu dengan udara dingin dan kering dari daratan. Ketika kedua massa udara ini bertemu, mereka tidak akan langsung bercampur secara sempurna. Sebaliknya, udara yang lebih hangat dan ringan akan dipaksa naik ke atas oleh udara yang lebih dingin dan berat.

Proses naiknya udara hangat ini disebut dengan *front*. Saat udara hangat naik, suhunya akan turun dan uap air di dalamnya akan mengembun menjadi tetesan-tetesan air. Tetesan air ini kemudian membentuk awan stratus atau nimbostratus yang

luas dan berwarna kelabu. Awan-awan inilah yang kemudian menghasilkan hujan. Hujan yang disebabkan oleh sistem frontal biasanya bersifat merata dan berlangsung dalam waktu yang cukup lama, berbeda dengan hujan konvektif yang cenderung lebih deras dan singkat.

Terdapat beberapa jenis *front*, antara lain (Nining, 2018):

- a. *Front* Dingin: Terjadi ketika massa udara dingin menggantikan massa udara hangat. *Front* dingin biasanya bergerak lebih cepat dan menghasilkan hujan yang lebih deras serta disertai petir dan angin kencang.
- b. *Front* Hangat: Terjadi ketika massa udara hangat menggantikan massa udara dingin. *Front* hangat biasanya bergerak lebih lambat dan menghasilkan hujan yang lebih ringan dan berlangsung lebih lama.
- c. *Front* Oklusi: Terjadi ketika *front* dingin menyusul *front* hangat. *Front* oklusi dapat menghasilkan hujan yang lebat dan berlangsung dalam waktu yang lama.

Hujan frontal sering terjadi di daerah subtropis dan daerah lintang tengah. Jenis hujan ini juga sering dikaitkan dengan perubahan musim. Misalnya, di Indonesia, hujan frontal sering terjadi pada saat peralihan musim kemarau ke musim hujan. Hujan frontal dapat membawa manfaat bagi pertanian karena dapat menyuburkan tanah, namun juga dapat menyebabkan bencana seperti banjir jika intensitasnya terlalu tinggi.

### **3. Presipitasi Orografik: Hujan di Pegunungan**

Presipitasi orografik terjadi ketika massa udara yang mengandung uap air dipaksa naik oleh bentang alam yang tinggi, seperti pegunungan. Saat udara naik, suhunya menurun dan uap air mengembun membentuk awan. Sisi gunung yang menghadap angin akan menerima curah hujan yang lebih tinggi

dibandingkan dengan sisi yang terlindung dari angin. Fenomena ini sering disebut sebagai "*efek fohn*". Hujan orografik sangat penting bagi ketersediaan air di daerah pegunungan dan hilirnya.



### **Gambar 5. 3 Presipitasi Orografik**

(Sumber : Roboguru, 2022)

Daerah pegunungan umumnya memiliki curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan daerah dataran rendah. Fenomena ini, yang dikenal sebagai presipitasi orografik, terjadi ketika massa udara lembap dipaksa naik oleh lereng gunung. Pendinginan adiabatik yang terjadi menyebabkan uap air mengembun dan membentuk awan, sehingga meningkatkan potensi terjadinya hujan.

Awan yang terbentuk di sisi gunung yang menghadap angin akan terus menerima pasokan uap air dari udara yang terus naik. Akibatnya, awan akan semakin tebal dan menghasilkan hujan yang lebat. Sisi gunung yang menghadap angin ini sering disebut sebagai sisi angin atau windward side.

Sebaliknya, sisi gunung yang terlindung dari angin atau leeward side akan menerima curah hujan yang lebih sedikit. Udara yang telah kehilangan sebagian besar uap airnya saat melewati gunung akan menjadi lebih kering dan hangat saat turun ke sisi yang lain. Fenomena ini dikenal sebagai efek fohn.

Hujan orografik memiliki peran yang sangat penting dalam siklus hidrologi. Air hujan yang jatuh di pegunungan akan meresap ke dalam tanah dan menjadi sumber air bagi sungai-sungai. Selain itu, hujan orografik juga berperan dalam menjaga kelembaban udara di sekitar pegunungan dan mempengaruhi iklim regional. Namun, hujan orografik juga dapat menyebabkan bencana alam seperti banjir bandang jika intensitasnya sangat tinggi.

### **C. Pola Presipitasi**

Presipitasi, atau curah hujan, merupakan fenomena alam yang sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan. Pola-pola tertentu muncul sebagai hasil interaksi kompleks antara berbagai faktor lingkungan. Letak geografis suatu wilayah, misalnya, sangat menentukan jumlah dan frekuensi hujan yang turun. Daerah dekat khatulistiwa umumnya menerima curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan daerah kutub akibat intensitas sinar matahari yang lebih tinggi. Selain itu, topografi juga memainkan peran penting. Pegunungan sering menjadi penghalang bagi massa udara yang membawa uap air, sehingga daerah di sisi angin pegunungan cenderung lebih basah. Iklim, dengan variasi suhu dan tekanan udara, turut mempengaruhi pola presipitasi. Misalnya, daerah monsun mengalami musim hujan dan kemarau yang sangat kontras.

### **1. Pola Musiman: Ritme Hujan Sepanjang Tahun**

Salah satu pola presipitasi yang paling jelas adalah pola musiman. Curah hujan di berbagai wilayah di dunia menunjukkan variasi yang signifikan sepanjang tahun. Di daerah tropis, misalnya, curah hujan terkonsentrasi pada musim hujan dan sangat sedikit pada musim kemarau. Hal ini disebabkan oleh pergerakan semu matahari yang menyebabkan perubahan musim dan pola angin. Pada musim hujan, udara hangat dan lembab dari laut membawa banyak uap air yang kemudian jatuh sebagai hujan. Sebaliknya, pada musim kemarau, udara cenderung lebih kering sehingga curah hujan sangat rendah.

### **2. Pola Harian: Siklus Hujan dalam Sehari**

Selain pola musiman, curah hujan juga menunjukkan variasi harian. Umumnya, curah hujan cenderung lebih tinggi pada siang hari dibandingkan malam hari. Hal ini disebabkan oleh pemanasan matahari yang menyebabkan udara di permukaan bumi menjadi hangat dan naik. Udara yang naik tersebut membawa uap air yang kemudian mengembun dan membentuk awan. Akibatnya, sering terjadi hujan pada siang atau sore hari. Namun, pola harian ini dapat bervariasi tergantung pada kondisi cuaca lokal dan faktor-faktor lainnya.

### **3. Pola Spasial: Variasi Curah Hujan dari Satu Tempat ke Tempat Lain**

Pola spasial merujuk pada variasi curah hujan dari satu tempat ke tempat lain. Curah hujan dapat bervariasi secara signifikan bahkan dalam jarak yang relatif dekat. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi pola spasial curah hujan adalah topografi. Daerah pegunungan, misalnya, umumnya memiliki curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan daerah dataran rendah. Hal ini disebabkan oleh efek orografis, yaitu ketika udara yang

mengandung uap air dipaksa naik oleh pegunungan sehingga terjadi kondensasi dan hujan.

#### **D. Pengukuran Curah Hujan**

Curah hujan, sebagai komponen penting dalam siklus hidrologi, memiliki peran yang sangat krusial dalam kehidupan manusia. Dalam modul Hidrometeorologi yang dirangkum oleh (Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan Fakultas Kehutanan Ugm Universitas Gadjah Mada, 2020) Untuk mengukur jumlah air hujan yang jatuh dalam suatu periode tertentu, kita memerlukan alat khusus yang disebut rain gauge atau penakar hujan. Alat ini berfungsi untuk mengumpulkan dan mengukur volume air hujan yang jatuh pada suatu permukaan dalam satuan waktu tertentu.

Ada beberapa jenis rain gauge yang digunakan untuk mengukur curah hujan, masing-masing memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri. Beberapa jenis rain gauge yang umum digunakan antara lain (Agung, 2024):

1. *Rain Gauge* Biasa: Jenis *rain gauge* yang paling sederhana terdiri dari sebuah wadah berbentuk silinder atau kerucut yang dilengkapi dengan skala pengukuran. Air hujan yang jatuh akan tertampung dalam wadah tersebut. Setelah pengukuran, volume air hujan dapat dibaca langsung dari skala yang tertera pada wadah. Meskipun sederhana, rain gauge biasa masih banyak digunakan karena mudah digunakan dan perawatannya relatif mudah.
2. *Tipping Bucket Rain Gauge*: Jenis rain gauge ini bekerja berdasarkan prinsip timbangan. Wadah penampung air hujan pada rain gauge ini terbagi menjadi dua bagian yang seimbang. Ketika air hujan tertampung hingga mencapai volume tertentu, salah satu bagian wadah akan terbalik dan menghitung jumlah kejadian terbalik. Jumlah kejadian

terbalik ini kemudian dikonversi menjadi jumlah curah hujan. *Tipping bucket rain gauge* lebih akurat dalam mengukur intensitas hujan dibandingkan rain gauge biasa.

3. *Recording Rain Gauge*: Jenis rain gauge ini mampu merekam curah hujan secara kontinu dalam bentuk grafik atau data digital. Data curah hujan yang dihasilkan oleh *recording rain gauge* dapat digunakan untuk menganalisis pola curah hujan dalam jangka waktu yang panjang. Ada beberapa jenis *recording rain gauge*, antara lain:
  4. *Recording rain gauge mekanik*: Merekam data curah hujan pada kertas grafik menggunakan pena yang digerakkan oleh mekanisme jam.
  5. *Recording rain gauge digital*: Merekam data curah hujan secara digital dan dapat diunduh ke komputer untuk analisis lebih lanjut.

Pengukuran curah hujan menggunakan rain gauge memiliki berbagai manfaat, antara lain (Pratiwi and Nurhuda, 2021):

1. *Meteorologi*: Data curah hujan digunakan untuk membuat prakiraan cuaca, menganalisis iklim, dan memahami fenomena cuaca ekstrem.
2. *Hidrologi*: Data curah hujan digunakan untuk mengelola sumber daya air, memprediksi banjir, dan menganalisis siklus hidrologi.
3. *Agrikultura*: Data curah hujan digunakan untuk menentukan waktu tanam yang tepat, mengelola irigasi, dan memperkirakan hasil panen.
4. Perencanaan Tata Ruang: Data curah hujan digunakan untuk perencanaan tata ruang, seperti pembangunan pemukiman, infrastruktur, dan *sistem drainase*.

Agar data curah hujan yang diperoleh akurat, *rain gauge* harus dipasang dengan benar. Beberapa hal yang perlu diperhatikan saat memasang *rain gauge* antara lain (Hidayat and Empung, 2016):

1. Lokasi: Pilih lokasi yang datar dan terbuka, jauh dari bangunan atau pohon yang dapat menghalangi jatuhnya hujan.
2. Ketinggian: Pasang *rain gauge* pada ketinggian yang sesuai dengan standar yang berlaku.
3. Arah: Pastikan mulut *rain gauge* menghadap ke atas secara horizontal.

Untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif tentang pola curah hujan suatu wilayah, diperlukan jaringan pengamatan curah hujan yang luas dan merata. Data curah hujan dari berbagai stasiun pengamatan dapat digunakan untuk membuat peta isohyet, yaitu peta yang menunjukkan garis-garis yang menghubungkan titik-titik dengan curah hujan yang sama. Peta isohyet sangat berguna untuk menganalisis distribusi spasial curah hujan (Pratiwi and Nurhuda, 2021).

## **E. Kesimpulan**

Curah hujan merupakan fenomena alam yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor interaktif. Beberapa faktor utama yang berperan dalam menentukan jumlah dan distribusi curah hujan di suatu wilayah antara lain suhu, kelembaban, tekanan udara, topografi, dan vegetasi. Suhu udara yang tinggi akan meningkatkan laju evaporasi, mengubah air dari bentuk cair menjadi uap air yang kemudian dapat terkondensasi menjadi awan dan turun sebagai hujan. Kelembaban udara yang tinggi menunjukkan adanya kandungan uap air yang cukup banyak di atmosfer, sehingga potensi terjadinya hujan akan semakin besar. Perbedaan tekanan udara menyebabkan

terjadinya angin yang membawa uap air dari satu tempat ke tempat lain. Topografi, seperti keberadaan pegunungan, dapat memaksa udara lembab naik dan mendingin, sehingga memicu terjadinya hujan orografis. Sementara itu, vegetasi melalui proses evapotranspirasi dapat meningkatkan kelembaban udara di sekitar dan mempengaruhi pembentukan awan.

Selain faktor-faktor di atas, ada pula faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi curah hujan, seperti radiasi matahari, arus laut, dan aktivitas manusia. Radiasi matahari memberikan energi yang dibutuhkan untuk proses evaporasi. Arus laut dapat mempengaruhi suhu permukaan laut dan kelembaban udara di sekitarnya, sehingga berdampak pada pola curah hujan. Aktivitas manusia, seperti deforestasi dan urbanisasi, juga dapat mengubah pola curah hujan secara lokal. Interaksi kompleks antara berbagai faktor ini menyebabkan distribusi curah hujan di permukaan bumi sangat bervariasi, baik secara spasial maupun temporal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agung (2024) *Jenis Alat Ukur Curah Hujan, Testindo*. Available at: <https://testindo.co.id/mengenal-berbagai-jenis-alar-ukur-curah-hujan/>.
- Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan Fakultas Kehutanan Ugm Universitas Gadjah Mada (2020) 'MODUL HIDROMETEOROLOGI'.
- Harris, M. (2021) *Pengertian Presipitasi: Proses, Sejarah, dan Jenis-Jenisnya*, Gramedia.com. Available at: <https://www.gramedia.com/literasi/pengertian-presipitasi/>.
- Hidayat, A. K. and Empung (2016) 'Analisis Curah Hujan Efektif Dan Curah Hujan Dengan Berbagai Periode Ulang Untuk Wilayah Kota Tasikmalaya Dan Kabupaten Garut', *Jurnal Siliwangi*, 2(2), pp. 121–126.
- Nining (2018) *Pengertian, Ciri, Klasifikasi dan Dampak Front Cuaca*. Available at: <https://niningsw.wordpress.com/2018/03/07/pengertian-ciri-klasifikasi-dan-dampak-front-cuaca/>.
- Pambudi, A. (2017) *Pengertian Curah Hujan dan Klasifikasi Hujan*, geografi.org. Available at: <https://www.geografi.org/2017/11/pengertian-curah-hujan-dan-klasifikasi.html>.
- Pratiwi, A. and Nurhuda, W. (2021) 'Analisis Perbandingan Data Pengukuran Curah Hujan Metode Otomatis (Automatic Rain Gauge) dan Metode Observasi', *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, pp. 116–128. Available at: <https://fisika.fmipa.unesa.ac.id/proceedings/index.php/snf/article/view/162%0Ahttps://fisika.fmipa.unesa.ac.id/proceedings/index.php/snf/article/download/162/156>.
- Roboguru (2022) *Prensipitasi Konvekti, Roboguru by ruangguru*.

Available at:  
[https://roboguru.ruangguru.com/forum/gambar-diatas-menunjukkan-jenis-hujan-a-frontal-b-zenital-c-orografis-d\\_FRM-IYDQS1AZ?tenantName=roboguru](https://roboguru.ruangguru.com/forum/gambar-diatas-menunjukkan-jenis-hujan-a-frontal-b-zenital-c-orografis-d_FRM-IYDQS1AZ?tenantName=roboguru).

Tukidi (2010) 'Karakter Curah Hujan Di Indonesia', *Jurnal Geografi*, 7(2), pp. 136–145. Available at:  
<http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JG/article/view/84>.



# BAB 6

## INFILTRASI DAN PERKOLASI

Oleh Amalia Nurdin, S.T., M.T

### A. Pendahuluan

#### 1. Definisi infiltrasi dan perkolasi

Infiltrasi merupakan proses masuknya air ke dalam tanah melalui permukaan tanah (Aryanto and Hardiman, 2017). Air hujan atau sumber air lainnya yang mencapai tanah akan meresap ke dalam pori-pori tanah, dipengaruhi oleh faktor seperti tekstur tanah, kandungan air awal, vegetasi, dan kemiringan permukaan. Infiltrasi merupakan langkah awal dalam siklus hidrologi untuk mengisi cadangan air tanah sedangkan perkolasi adalah pergerakan air yang telah masuk ke dalam tanah melalui lapisan-lapisan tanah yang lebih dalam. Proses ini terjadi di bawah pengaruh gravitasi dan gaya kapilaritas. Perkolasi berfungsi untuk membawa air ke zona saturasi atau lapisan akuifer, berkontribusi pada pengisian ulang air tanah (*groundwater recharge*). Kedua proses ini saling berhubungan, di mana infiltrasi merupakan tahap awal sebelum air mengalami perkolasi ke lapisan tanah yang lebih dalam.

#### 2. Pentingnya proses *infiltrasi* dan perkolasi

*Infiltrasi* dan perkolasi adalah proses penting dalam siklus hidrologi yang mempengaruhi ketersediaan air tanah, kualitas air, serta pengendalian banjir dan erosi. *Infiltrasi* berperan dalam mengurangi aliran permukaan, sehingga

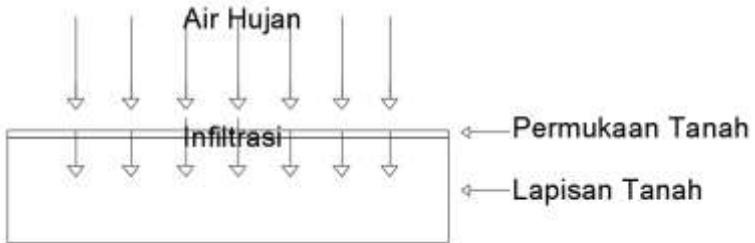
membantu mencegah banjir dan erosi tanah. Selain itu, *infiltrasi* mengisi kembali kelembaban tanah yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman dan perkolasi berperan dalam mengisi ulang sumber air tanah dan *akuifer*, yang merupakan sumber utama air bagi sumur dan mata air. Proses ini juga berfungsi sebagai penyaring alami, karena saat air bergerak melalui tanah, partikel-partikel tanah dan mikroorganisme dapat menyaring kontaminan, sehingga meningkatkan kualitas air yang mencapai akuifer.

Kedua proses ini saling berhubungan dan krusial dalam menjaga keseimbangan siklus air, ketersediaan air bersih, serta kesehatan ekosistem. Aktivitas manusia, seperti urbanisasi dan perubahan penggunaan lahan, dapat mempengaruhi laju infiltrasi dan perkolasi, yang pada gilirannya dapat menyebabkan masalah seperti banjir, penurunan kualitas air, dan penurunan muka air tanah. Infiltrasi dan perkolasi adalah proses kritis untuk keberlanjutan sumber daya air. Keduanya memastikan keseimbangan air tanah, kualitas air, dan keberlanjutan ekosistem. Dengan meningkatnya urbanisasi dan perubahan iklim, pengelolaan proses ini menjadi semakin penting untuk mencegah bencana lingkungan.

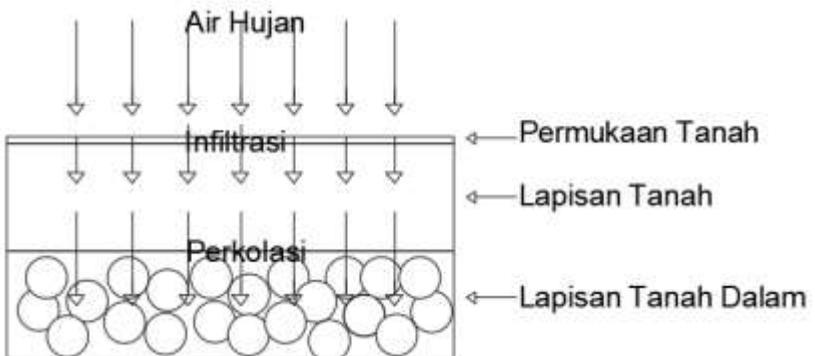
### **3. Tujuan mempelajari infiltrasi dan perkolasi**

Mempelajari infiltrasi dan perkolasi adalah bagian penting dari pengelolaan sumber daya air, tanah, dan lingkungan. Tujuan mempelajari kedua proses ini mencakup aspek ilmiah, teknis, dan praktis yang berkaitan dengan keberlanjutan ekosistem, mitigasi bencana, dan optimalisasi penggunaan air. Dengan mempelajari kedua hal ini maka kita akan memahami beberapa hal diantaranya:

- a. Dinamika siklus hidrologi.
- b. Pengelolaan sumber daya air.
- c. Pencegahan dan mitigasi bencana.
- d. Perlindungan kualitas air.
- e. Perencanaan tataguna lahan.
- f. Mendukung keberlanjutan ekosistem.
- g. Memitigasi perubahan iklim.
- h. Meningkatkan efisiensi pertanian.
- i. Pengembangan model matematis atau simulasi untuk prediksi laju infiltrasi dan perkolasi.



**Gambar 6. 1 Ilustrasi Proses infiltrasi**



**Gambar 6. 2 Ilustrasi Proses perkolasi**

## **B. Proses Infiltrasi**

*Infiltrasi* adalah proses masuknya air ke dalam tanah melalui pori-pori di permukaan tanah akibat gravitasi dan kapilaritas. Proses ini sangat penting dalam siklus hidrologi, karena berperan dalam mengisi cadangan air tanah, mengurangi limpasan permukaan (*runoff*), dan mendukung ekosistem. Ada beberapa tahapan dalam proses infiltrasi yaitu:

1. Penetrasi awal dimana air mulai menembus lapisan atas tanah.
2. Distribusi lateral yaitu proses dimana air menyebar secara horizontal di sepanjang lapisan tanah.
3. Proses perkolasi dimana air bergerak ke lapisan tanah yang lebih dalam menuju akuifer.

Pada proses infiltrasi ini faktor yang penting adalah kecepatan infiltrasinya yang dipengaruhi oleh tekstur tanah, vegetasi, dan kondisi air tanah dan waktu hujan yang berkepanjangan akan sangat mempengaruhi kecepatan infiltrasi akibat pori-pori tanah yang mengalami kejenuhan.

## **C. Faktor-faktor yang mempengaruhi *infiltrasi***

Menurut Irawan and Yuwono, 2016, ada beberapa faktor-faktor yang memengaruhi tingkat dan kecepatan infiltrasi diantaranya:

### **1. Tekstur Tanah**

Tekstur tanah adalah proporsi partikel pasir, debu, dan liat dalam tanah. Tekstur memengaruhi ukuran pori-pori tanah, yang menentukan kapasitas tanah untuk menyerap air, (Musdalipa, A. 2018).

Tanah berpasir memiliki infiltrasi tinggi karena pori-porinya besar, memungkinkan air bergerak dengan cepat. Tanah berpasir memiliki kecepatan infiltrasi  $> 10$  mm/jam.

Tanah liat memiliki *infiltrasi* rendah karena pori-porinya kecil, yang menyebabkan pergerakan air lambat. Tanah liat sering kali kecepatan infiltrasinya kurang dari 1 mm/jam. Tanah dengan campuran pasir, debu, dan liat (*loam*) memiliki tingkat infiltrasi sedang.

## 2. Kandungan Air Tanah Awal

Kandungan air tanah awal memengaruhi kapasitas tanah untuk menyerap air baru. Tanah kering akan menyerap air lebih cepat dibandingkan tanah yang sudah jenuh. Saat tanah dalam kondisi kering, air akan terserap lebih cepat karena gaya kapilaritas lebih tinggi sedangkan tanah yang sudah jenuh akan menyebabkan limpasan permukaan karena tidak ada lagi ruang untuk air tambahan.

## 3. Vegetasi

Vegetasi berpengaruh besar terhadap infiltrasi melalui perlindungan permukaan tanah dan peningkatan struktur tanah. Beberapa fungsi dari vegetasi diantaranya:

- a. Mengurangi limpasan dengan melindungi tanah dari dampak turunnya hujan secara langsung.
- b. Akar tanaman menciptakan makropori yang meningkatkan infiltrasi.
- c. Serasah daun memperlambat aliran air permukaan dan memberi waktu lebih banyak bagi tanah untuk menyerap air.

Fakta yang sering terlihat adalah area dengan vegetasi lebat memiliki infiltrasi 50% lebih tinggi dibandingkan lahan tandus, hilangnya vegetasi lebih sering menyebabkan peningkatan limpasan dan mengalami erosi.

#### 4. Kemiringan Permukaan Tanah

Kemiringan tanah mempengaruhi waktu interaksi air dengan permukaan tanah. Tanah yang lebih datar memungkinkan air terserap lebih baik, sementara tanah curam meningkatkan limpasan, tingkat infiltrasi dinyatakan tinggi pada kemiringan 0-8%, sedangkan di kemiringan 8%-23% tingkat infiltrasi sedang. (Qur'ani, Harisuseno and Fidari, 2022)

### **D. Metode pengukuran infiltrasi**

Pengukuran infiltrasi penting untuk mengetahui seberapa cepat air meresap ke dalam tanah. Data ini digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pengelolaan sumber daya air, desain irigasi, dan mitigasi banjir. Metode pengukuran infiltrasi mencakup alat langsung seperti *double-ring infiltrometer* dan pendekatan teoritis menggunakan model empiris seperti *Horton* dan *Green-Ampt*.

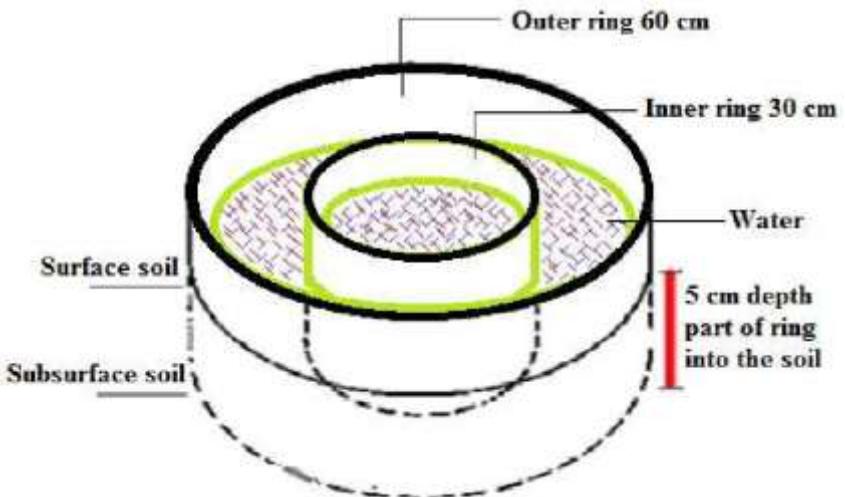
#### **1. Double-ring infiltrometer**

Infiltrometer yang umumnya digunakan adalah infiltrometer cincin ganda (*double ring infiltrometer*), yaitu alat yang terdiri dari sebuah silinder kecil yang diletakkan di dalam silinder lain berukuran lebih besar (Rafsan, Nugraha and Rusydy, 2024). Alat ini terdiri dari dua cincin konsentris biasanya terbuat dari logam yang ditanamkan ke dalam tanah, cincin bagian dalam digunakan untuk mengukur infiltrasi air secara langsung, sedangkan cincin luar berfungsi untuk mengurangi efek aliran lateral air. Cara kerja dari alat ini yaitu:

- a. Dua cincin dengan diameter yang berbeda (misalnya, 30 cm dan 60 cm) ditanam ke tanah hingga kedalaman tertentu.
- b. Air diisi di dalam kedua cincin, dan waktu yang dibutuhkan air untuk meresap diukur secara periodik.

- c. Hasil pengukuran dari cincin bagian dalam memberikan laju infiltrasi yang lebih akurat karena pengaruh lateral telah diminimalkan.

Alat yang digunakan ini hasilnya cukup akurat untuk kondisi tanah tertentu, cocok untuk pengukuran infiltrasi secara langsung dilapangan, namun alat ini memerlukan waktu dan tenaga yang cukup banyak dan kurang cocok digunakan pada tanah berbatu atau sangat padat, untuk standar pengukuran infiltrasi dengan *double ring infiltrometer* ini dapat dilihat pada ASTM D3385-03.



**Gambar 6. 3 Penggunaan *Double Ring Infiltrometer***

(Sumber: Usman, S. 2024)



**Gambar 6. 4 Alat *Double Ring Infiltrometer***  
(Sumber: Jitka chromíková, et al, 2017)

## **2. *Empirical models (Horton, Green-Ampt).***

Pendekatan empiris digunakan untuk memperkirakan laju *infiltrasi* berdasarkan parameter tanah dan curah hujan. Dua model utama adalah:

### **a. *Horton's Equation***

Horton (1940) mengembangkan model yang menggambarkan bahwa laju *infiltrasi* berkurang secara eksponensial seiring waktu hingga mencapai laju *infiltrasi* konstan. Model matematis ini sering digunakan dalam simulasi aliran air permukaan dan desain irigasi, (Eka Bagaskara and Khairun Nisa Program Studi Kehutanan, 2023).

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}$$

dan

$$V(t) = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{K} (1 - e^{-kt})$$

Keterangan :

- $f_c$  : Infiltrasi konstan (mm/jam)
- $f_0$  : Infiltrasi saat awal (mm/jam)
- $f$  : Kapasitas infiltrasi (mm/jam)
- $V(t)$  : Volume infiltrasi (mm<sup>3</sup>)
- $t$  : Waktu (jam)
- $k$  : Konstan
- $e$  : Bilangan dasar ( 2,718 )

### b. *Green-Ampt*

Besarnya intensitas hujan sangatlah berpengaruh terhadap laju infiltrasi yang terjadi. Perhitungan laju infiltrasi menggunakan model *Green-Ampt* dimana laju infiltrasi dipengaruhi oleh konduktivitas tanah, hisapan tanah, kadar air tanah dan kenaikan hujan perkejadian hujan (*incremental*) yang dijumlahkan (akumulasi hujan), (Ardiani, Devianti and Munawar, 2021). *Model Green dan Ampt (1911) mengembangkan model infiltrasi* berbasis fisik yang memperhitungkan tekanan kapiler dan kelembapan tanah.

$$F = K \cdot \left( t + \frac{\Psi \cdot \Delta\theta}{K} \right)$$

Di mana:

- $F$ : infiltrasi kumulatif,
- $K$ : konduktivitas hidraulik tanah,
- $\Psi$ : tekanan kapiler efektif,
- $\Delta\theta$ : perbedaan kelembapan volumetrik.

## **E. Perkolasi: Gerakan Air di Lapisan Bawah**

Perkolasi merupakan proses penting dalam siklus hidrologi yang menggambarkan pergerakan air dari lapisan tanah bagian atas ke lapisan bawah tanah. Proses ini berperan besar dalam pengisian ulang air tanah (*groundwater recharge*) dan pemurnian air secara alami.

### **1. Definisi perkolasi**

Perkolasi adalah pergerakan air secara vertikal dan horizontal melalui pori-pori tanah menuju lapisan tanah yang lebih dalam, biasanya hingga mencapai akuifer atau lapisan air tanah, ciri utama dari perkolasi yaitu air bergerak melalui ruang antar partikel tanah (pori-pori) akibat gaya gravitasi dan kapilaritas. Proses perkolasi ini berlangsung setelah infiltrasi terjadi, ketika air telah memasuki lapisan permukaan tanah.

### **2. Proses perkolasi melalui pori-pori tanah**

Air yang meresap ke dalam tanah selama proses infiltrasi terus bergerak lebih dalam melalui ruang antar partikel tanah dalam proses perkolasi.

- a. Tahapan Proses
  1. Infiltrasi Awal: Air masuk ke tanah dari permukaan.
  2. Gerakan Vertikal: Air bergerak secara vertikal mengalir melalui pori-pori tanah karena gravitasi.
  3. Penyimpanan di Lapisan Jenuh: Air mencapai lapisan jenuh (zona saturasi) di mana air tanah disimpan.
- b. Faktor yang Mempengaruhi Proses Perkolasi:
  1. Jenis tanah (tanah liat, pasir, lempung).
    - a) Tanah Liat: Memiliki partikel yang sangat kecil dan saling berlekatan, sehingga pori-porinya sangat

sempit. Hal ini menghambat perkolasi karena air sulit melewati.

- b) Pasir: Partikel besar dengan pori-pori lebar, memungkinkan air mengalir dengan cepat sehingga perkolasi sangat tinggi.
- c) Lempung: Kombinasi antara pasir, lanau, dan tanah liat. Porositasnya sedang, sehingga laju perkolasi lebih moderat dibanding pasir dan tanah liat.

## 2. Kandungan bahan organik.

Kandungan bahan organik yang tinggi meningkatkan kemampuan tanah menyerap dan menyimpan air. Bahan organik juga meningkatkan agregasi tanah, sehingga memperbesar ruang pori makro dan memperlancar perkolasi.

## 3. Kepadatan tanah dan struktur tanah.

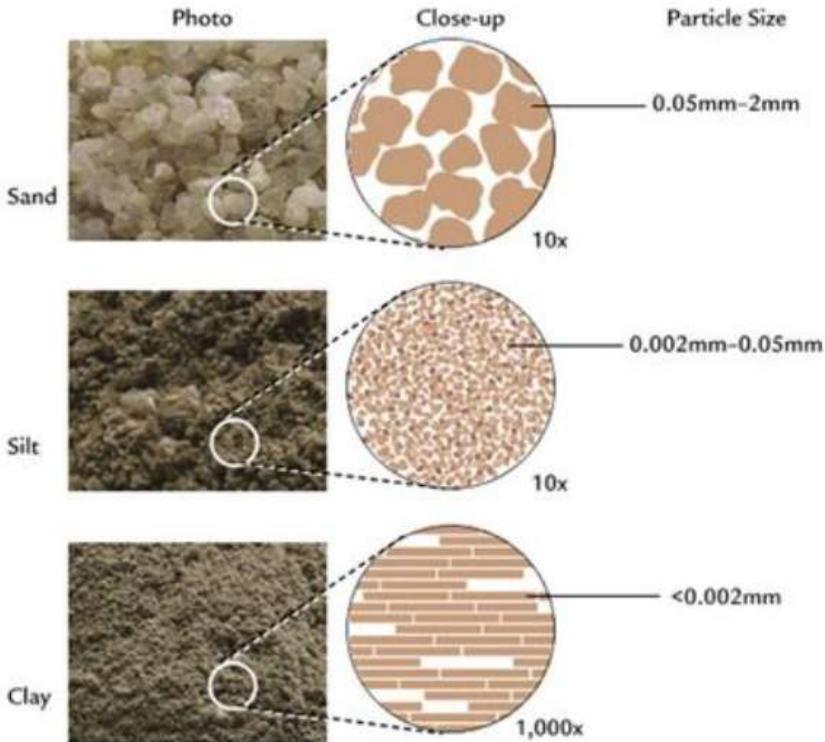
Tanah yang padat memiliki pori-pori kecil sehingga perkolasi menjadi lambat. Struktur tanah yang buruk (kompak) cenderung menghambat pergerakan air.

Sebaliknya, tanah yang gembur dengan struktur granular mendukung perkolasi karena memiliki banyak pori makro.

## 4. Kecepatan infiltrasi awal.

Kecepatan infiltrasi awal adalah kemampuan tanah menyerap air pada tahap awal. Semakin cepat air terserap, semakin baik pula perkolasi. Faktor ini dipengaruhi oleh kondisi permukaan tanah, kadar air awal, dan intensitas hujan (Jury & Horton, 2004).

# Sand, Silt, and Clay



**Gambar 6. 5 Perbandingan Porositas Jenis Tanah**  
(Sumber: University at Buffalo, Accessed 31 Dec. 2024)

### 3. Peran kapilaritas dan gravitasi

Perkolasi dikendalikan oleh dua gaya utama yaitu kapilaritas dan gravitasi.

a. Kapilaritas

Kapilaritas adalah gaya tarik-menarik antara molekul air dan partikel tanah. Air cenderung bergerak melawan gravitasi dalam tanah dengan pori-pori kecil (seperti tanah liat) karena efek kapiler yang tinggi.

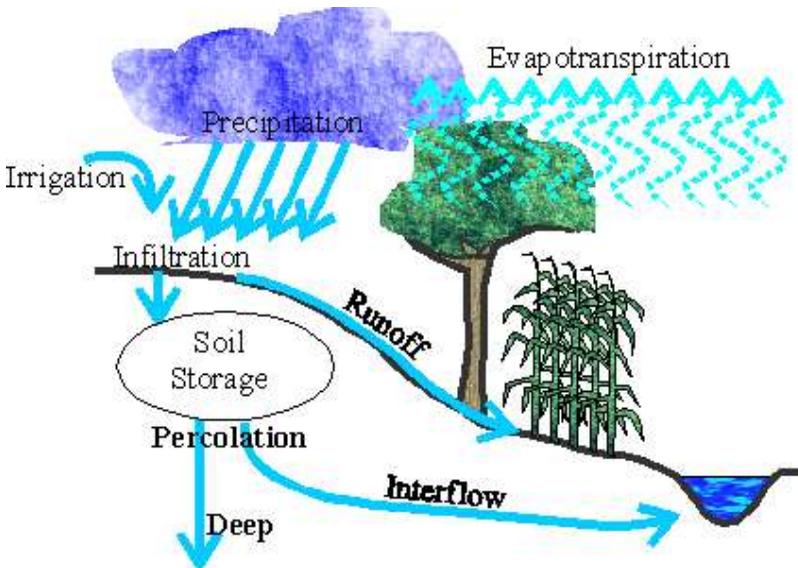
b. Gravitasi

Gravitasi menarik air ke bawah, terutama pada tanah dengan pori-pori besar (seperti pasir). Gravitasi mendominasi pada tanah kering atau tanah berstruktur kasar.

Hubungan Kapilaritas dan Gravitasi di tanah bertekstur kasar, gravitasi lebih dominan, sehingga perkolasi lebih cepat. Di tanah bertekstur halus, kapilaritas memainkan peran lebih besar, memperlambat perkolasi.

c. Hubungan antara infiltrasi dan perkolasi

Infiltrasi dan perkolasi adalah dua proses yang saling berhubungan dalam siklus hidrologi. Laju infiltrasi memengaruhi jumlah air yang tersedia untuk perkolasi. Infiltrasi merupakan langkah awal sebelum perkolasi dapat terjadi. Tanah yang memiliki *infiltrasi* rendah juga akan memiliki perkolasi rendah karena air lebih banyak menjadi limpasan.



Gambar 6. 6 Proses *Infiltrasi* ke Perkolasi

## F. Dampak *Infiltrasi* dan Perkolasi

Kedua proses ini memiliki berbagai dampak, baik pada lingkungan maupun kehidupan manusia diantaranya:

### 1. Pengisian ulang air tanah (*recharge*)

Air yang meresap ke lapisan bawah tanah melalui infiltrasi dan perkolasi berkontribusi pada pengisian ulang *akuifer* (lapisan penyimpanan air bawah tanah), hal ini penting untuk menjaga ketersediaan air tanah sebagai sumber air bersih. Area dengan perkolasi rendah rentan mengalami penurunan muka air tanah (Riastika, 2012)

### 2. Pengaruh pada pertanian

Tanah dengan *infiltrasi* dan perkolasi yang baik dapat mengatur kadar air yang tersedia bagi tanaman, mencegah genangan air,

dan memastikan nutrisi tidak tercuci terlalu cepat. *Infiltrasi* berlebih dapat menyebabkan kehilangan air dari akar tanaman, terutama di tanah berpasir (Wahjunie, Baskoro and Tarigan, 2021).

### **3. Pencegahan banjir**

Infiltrasi mengurangi limpasan permukaan (*surface runoff*), sehingga menurunkan risiko banjir. Tanah dengan kapasitas infiltrasi rendah berkontribusi pada banjir bandang di area tertentu. Daerah urban yang tertutup aspal dan beton menghambat infiltrasi, sehingga perencanaan tata guna lahan perlu mempertimbangkan proses ini (Shafa *et al.*, 2022).

### **4. Implikasi pada manajemen air**

Pemahaman tentang *infiltrasi* dan perkolasi membantu dalam perencanaan sumur, irigasi, dan pengelolaan limpasan air hujan. Wilayah yang memiliki perkolasi tinggi memerlukan strategi konservasi air untuk mencegah kehilangan berlebih ke lapisan bawah tanah (Aryanto and Hardiman, 2017).

## DAFTAR PUSTAKA

- Ardiani, Y., Devianti, D. and Munawar, A.A. (2021) 'Memperhitungkan Laju Infiltrasi Model Green-Ampt Menggunakan Aplikasi Pemrograman Visual Basic', *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, pp. 548–562. Available at: <https://doi.org/10.17969/jimfp.v6i4.18147>.
- Aryanto, D.E. and Hardiman, G. (2017) 'Kajian Multi Varian Faktor yang Berpengaruh terhadap Infiltrasi Air Tanah sebagai Dasar Penentuan Daerah Potensial Resapan Air Tanah', *Proceeding Biology Education Conference*, 14(1), pp. 252–257.
- Eka Bagaskara, A. and Khairun Nisa Program Studi Kehutanan, dan (2023) 'Measurement of Infiltration Rate and Volume at Various Land Cover Classes in The Tabunio Watershed, South Kalimantan Province', *Jurnal Sylva Scientiae*, 06(4), pp. 576–583.
- Irawan, T. and Yuwono, S.B. (2016) 'Infiltrasi Pada Berbagai Tegakan Hutan', *Sylva Lestari*, 4(3), pp. 21–34.
- Jury, W.A. and Horton, R., 2004. *Soil Physics*. 6th ed. Hoboken, NJ: Wiley.
- Musdalipa, A., Suhardi, S., & Faridah, S. N. (2018). Pengaruh Sifat Fisik Tanah dan Sistem Perakaran Vegetasi Terhadap Imbuhan Air Tanah. *Jurnal Agritechno*, 11(1), 35–39. <https://doi.org/10.20956/at.v11i1.85>
- Qur'ani, N.P.G., Harisuseno, D. and Fidari, J.S. (2022) 'Studi Pengaruh Kemiringan Lereng Terhadap Laju Infiltrasi', *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 2(1), pp. 242–254. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2022.002.01.20>.
- Rafsan, T.M.N. El, Nugraha\*, G.S. and Rusydy, I. (2024) 'Pengukuran laju infiltrasi pada tata guna lahan yang

- berbeda (Studi Kasus: Kecamatan Kuta Malaka dan Indrapuri, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh)', *Acta Geoscience, Energy, and Mining*, 3(2), pp. 47–52. Available at: <https://doi.org/10.24815/actagem.v3i2.36744>.
- Riastika, M. (2012) 'PENGELOLAAN AIR TANAH BERBASIS KONSERVASI DI RECHARGE AREA BOYOLALI (Studi Kasus Recharge Area Cepogo, Boyolali, Jawa Tengah)', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 9(2), p. 86. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.9.2.86-97>.
- Shafa, R. *et al.* (2022) 'Dampak Perubahan Infiltrasi Dan Run-Off Terhadap Limpasan Permukaan Dan Banjir Di Kota Cimahi', 12(April 2022), pp. 161–170.
- University at Buffalo, no date. *Porosity*. Available at: <https://soil.evs.buffalo.edu/index.php/Porosity> [Accessed 31 Dec. 2024].
- Wahjunie, E.D., Baskoro, D.P.T. and Tarigan, S.D. (2021) 'The Peranan Pergerakan Air Dalam-Tanah dalam Menurunkan Aliran Permukaan', *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 26(2), pp. 292–300. Available at: <https://doi.org/10.18343/jipi.26.2.292>.



# BAB 7

## ALIRAN PERMUKAAN DAN *DRAINASE*: DINAMIKA ALIRAN DI PERMUKAAN BUMI

Oleh Fitry Hasdanita, S.T., M.T

### A. Pendahuluan

Salah satu dari tiga kebutuhan terpenting bagi kehidupan selain pangan dan papan adalah air. Kehadiran air menjadi alasan utama menjadikan bumi layak huni. Aliran permukaan (*surface runoff*) dan drainase merupakan dua elemen utama pengelolaan sumber daya air, khususnya di perkotaan dan wilayah dengan intensitas hujan tinggi. Aliran permukaan terjadi saat air hujan tidak mampi meresap ke tanah akibat kondisi jenuh tanah, permukaan yang tidak tembus air, atau intensitas hujan yang melebihi kapasitas infiltrasi. Proses ini memegang peran besar dalam siklus hidrologi, terutama dalam hal distribusi dan transportasi air pada permukaan bumi.

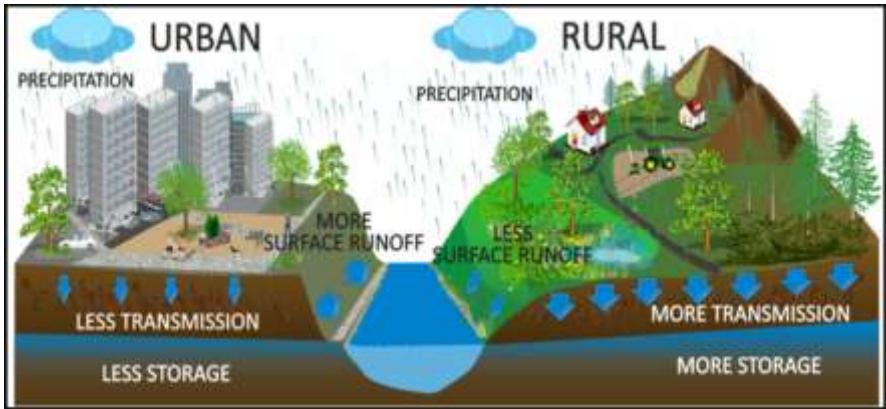
Limpasan permukaan merupakan faktor yang sangat penting dalam proyek pemanenan air dan merupakan salah satu solusi efektif dalam mengurangi kekurangan air, terutama di daerah kering dan semi kering. Limpasan adalah komponen hujan yang mengalir di atas tanah menuju sungai, danau, atau laut. Limpasan terjadi ketika curah hujan lebih besar daripada infiltrasi. Air akan mengalir melalui permukaan tanah ketika laju infiltrasi telah mencapai terpenuhi (R.D Mazalena, Ahmad, 2022). Ketika infiltrasi tercukupi maka air akan menempati

cekungan yang terdapat pada permukaan tanah. Setelah cekungan terpenuhi maka air akan mengalir (melimpas) di atas permukaan tanah (*surface runoff*) (Salsabila and Nugraheni, 2020).

Sistem drainase, di sisi lain, dirancang untuk mengelola aliran permukaan secara efisien. Sistem ini dirancang untuk mengalirkan kelebihan air hujan dari permukaan tanah menuju saluran air. Sehingga mencegah genangan, banjir, dan kerusakan lingkungan. Kegagalan dalam pengelolaan aliran permukaan dan drainase dapat menyebabkan dampak negatif yang signifikan, termasuk kerugian ekonomi, gangguan sosial, serta kerusakan ekosistem. Dalam konteks pembangunan dan pengelolaan wilayah, pemahaman terhadap aliran permukaan dan desain sistem *drainase* yang efektif menjadi aspek yang sangat penting.

## **B. Aliran Permukaan**

Limpasan permukaan adalah air hujan yang tidak bisa disimpan oleh tanah, tumbuhan, dan cekungan, sehingga langsung mengalir ke sungai atau laut. Faktor-faktor yang mempengaruhi jumlah limpasan permukaan meliputi bentuk lahan, tipe tanah dan cara penggunaan tutupan lahan.



**Gambar 7. 1 Proses Aliran Permukaan**

Sumber: (Halecki and Stachura, 2022)

Limpasan permukaan terjadi saat curah hujan melebihi infiltrabilitas tanah, yang menyebabkan kelebihan air yang tidak dapat diserap. Proses ini dipengaruhi oleh sifat tanah, penggunaan lahan, dan kondisi permukaan, menghasilkan aliran air menuju saluran penerima

Terjadinya limpasan permukaan merupakan dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, termasuk intensitas curah hujan, sifat tanah, dan praktik pengelolaan lahan. Limpasan permukaan terjadi ketika curah hujan melebihi kemampuan infiltrasi, sehingga menyebabkan kelebihan air mengalir di atas permukaan tanah.

1. Intensitas Curah Hujan dan Kelembaban Tanah
  - a. Intensitas curah hujan yang tinggi secara signifikan berkontribusi terhadap limpasan permukaan, terutama di tanah berpasir di mana tingkat infiltrasi lebih rendah (Funakawa, 2017).
  - b. Tingkat kelembaban permukaan tanah juga memainkan peran penting; tanah jenuh kurang mampu menyerap

curah hujan tambahan, yang menyebabkan peningkatan limpasan (Vauclin and Kao, 2005).

## 2. Tanah dan Topografi

- a. Tekstur tanah mempengaruhi pembentukan limpasan; tanah berpasir lebih rentan terhadap erosi dan limpasan dibandingkan dengan tanah liat.
- b. Gradien kemiringan tanah mempengaruhi volume limpasan; lereng yang lebih curam cenderung menghasilkan lebih banyak limpasan karena gaya gravitasi.

## 3. Efek Urbanisasi

- a. Di daerah perkotaan, limpasan permukaan dapat meningkat 100-300% dibandingkan dengan daerah kurang berkembang karena permukaan kedap air yang mencegah penyerapan air (SOKUR K., 2021).
- b. Kehadiran sistem drainase buatan juga dapat mengubah pola limpasan, seringkali menyebabkan peningkatan limpasan di daerah dengan drainase buruk.

Sementara limpasan permukaan sering dipandang negatif karena hubungannya dengan erosi tanah dan banjir, itu juga dapat berperan dalam mengisi kembali badan air dan mendukung ekosistem lokal. Memahami keseimbangan antara pembangkitan limpasan dan retensi air sangat penting untuk pengelolaan lahan yang efektif.

## 1. Penyebab aliran permukaan

Hubungan antara limpasan permukaan dan curah hujan berkaitan erat dengan topografi dan karakteristik geomorfologi, kondisi permukaan dasar dan faktor iklim suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) (Miao *et al.*, 2020). Intensitas dan durasi curah hujan memegang peranan penting berperan dalam proses

limpasan permukaan. Daerah berbukit mungkin lebih rumit proses limpasan (Yang, Hou and Cao, 2024).

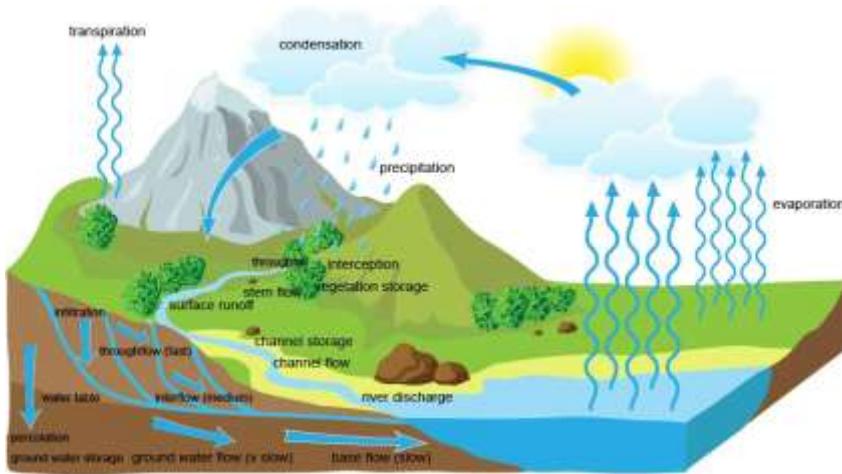
Aliran permukaan dipengaruhi oleh menjadi dua kategori: iklim. Kategori ini mencakup jenis hujan, intensitas, lama, distribusi, curah, emperatur, angin, dan kelembaban. Selain itu, karakteristik DAS termasuk kadar air tanah awal, ukuran dan bentuk DAS, elevasi dan topografi, vegetasi yang tumbuh, geologi, dan tanah (Fahriana and Ridwan, 2023).

## 2. Sumber aliran permukaan

limpasan permukaan meliputi:

- a. Aliran permukaan (*surface runoff*), sebagian air hujan yang mengalir diatas permukaan tanah. Aliran permukaan disebut juga (*direct runoff*). Aliran permukaan menyebabkan banjir karena aliran permukaan dapat cepat menuju sungai.
- b. Aliran antara (*interflow*), aliran antara terjadi di bawah permukaan tanah dalam arah lateral. Aliran antara terdiri dari gerakan air dan lengas tanah secara lateral menuju elevasi yang lebih rendah, dan akhirnya masuk ke sungai. Aliran antara lebih lambat dari aliran permukaan.
- c. Aliran air tanah, air hujan mengalir ke sungai sebagai aliran dasar setelah mengalir melalui permukaan tanah sebagai aliran antara dan sebagian mengalir ke bawah (perkolasi) sampai mencapai muka air tanah, yang memiliki kemiringan yang sangat kecil.

Dalam analisis hidrologi, aliran permukaan dan aliran antara dikategorikan sebagai aliran langsung. Di sisi lain, aliran yang berasal dari tanah dikategorikan sebagai aliran tak langsung. sumber aliran atau limpasan dapat dilihat pada Gambar 7.2.



**Gambar 7. 2 Komponen Aliran Permukaan**

(Sumber: <https://www.geografi.org/2022/04/proses-proses-dalam-siklus-hidrologi.html> )

### 3. Koefisien aliran permukaan

Perencanaan sumber daya air di berbagai negara di dunia didasarkan pada potensi ketersediaan sumber daya permukaan. Perubahan tata guna lahan, khususnya di daerah aliran sungai yang meliputi kota dan pusat pemukiman, sangat mempengaruhi jumlah air. Koefisien limpasan dapat didefinisikan sebagai rasio curah hujan yang dihasilkan sebagai limpasan di suatu daerah, yang bervariasi berdasarkan kemiringan, kondisi permukaan tanah, jenis vegetasi, dan kelompok hidrologi tanah. Koefisien limpasan menunjukkan rasio limpasan terhadap curah hujan total di berbagai area yang berbeda di mana kelembaban tanah sebelumnya tidak dipertimbangkan (Izadifard Hadi, Saeed Rasinezami, Raof Mostafazadeh, 2023). Koefisien limpasan sangat penting dalam

hidrologi, yang menunjukkan hubungan antara curah hujan dan limpasan. Memahami kontrol dan variabilitasnya sangat penting untuk penilaian sumber daya air, strategi pengelolaan, dan perencanaan penggunaan lahan (Xu, Li and Merwade, 2024)

Koefisien aliran hubungan antara puncak aliran permukaan terhadap intensitas hujan ( $I$ ) yang terjadi pada saat waktu konsentrasi ( $T_c$ ). Nilai koefisien aliran permukaan ( $C$ ) berada pada  $0 \leq C \leq 1$ . Laju infiltrasi tanah, kemiringan lahan (slope) yang dipengaruhi oleh tutupan lahan permukaan tanah suatu DAS, dan intensitas hujan yang terjadi selama kejadian hujan di suatu DAS adalah faktor utama yang mempengaruhi nilai koefisien aliran permukaan ( $C$ ). Nilai koefisien aliran permukaan ( $C$ ) di DAS akan beragam karena pengaruh luas DAS (Riswal Karamma, 2020). Koefisien aliran dipengaruhi oleh tutupan lahan. Nilai koefisien aliran permukaan dapat dilihat pada Tabel 7.1.

**Tabel 7. 1 Koefisien Aliran (C)**

<b>Tipe Daerah Aliran</b>	<b>C</b>
<b>Rerumputan</b>	
Tanah Pasir, datar, 2%	0.05 ~ 0.10
Tanah Pasir, sedang, 2-7%	0.10 ~ 0.15
Tanah pasir, Curam, 7%	0.15 ~ 0.20
Tanah gemuk, datar, 2%	0.13 ~ 0.17
Tanah gemuk, sedang, 2-7%	0.18 ~ 0.22
Tanah gemuk, curam, 7%	0.25 ~ 0.35
<b>Perdagangan</b>	
Daerah kota lama	0.75 ~ 0.95

<b>Tipe Daerah Aliran</b>	<b>C</b>
Daerah pinggiran	0.50 ~ 0.70
<b>Perumahan</b>	
Daerah single family	0.30 ~ 0.50
Multi unit terpisah	0.40 ~ 0.60
Multi unit tertutup	0.60 ~ 0.75
Suburban	0.25 ~ 0.40
Daerah Apartemen	0.50 ~ 0.70
<b>Industri</b>	
Daerah ringan	0.50 ~ 0.80
Daerah berat	0.60 ~ 0.90
Taman, kuburan	0.10 ~ 0.25
Tempat bermain	0.20 ~ 0.35
Halaman kereta api	0.20 ~ 0.40
Daerah tidak dikerjakan	0.10 ~ 0.30
<b>Jalan</b>	
Beraspal	0.70 ~ 0.95
Beton	0.80 ~ 0.95
Batu	0.70 ~ 0.85
Atap	0.75 ~ 0.95

Sumber: (Triatmojo, 2010)

### C. *Drainase*

Pengelolaan sistem drainase perkotaan yang efisien sangat penting untuk memahami status drainase dan memfasilitasi peringatan dini banjir perkotaan. Urbanisasi yang cepat dan perubahan iklim telah memperparah frekuensi kejadian curah hujan ekstrem dan dampak banjir perkotaan. Sistem *drainase* merupakan infrastruktur penting yang mengalirkan air hujan yang terkumpul ke badan air penerima untuk mengurangi tingkat keparahan banjir (Yue Zheng, Xiaoming Jin, Jun Wei, Yongchao Zhou, 2025).

Ketika pembangunan berjalan begitu cepat, akan ada masalah baru di tempat tersebut. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya gedung dan permukiman baru, yang mengakibatkan area resapan air hujan yang semakin berkurang. Sebagian besar air hujan tidak dapat meresap secara langsung ke dalam tanah, sehingga menjadi limpasan, juga dikenal sebagai air permukaan (*runoff*). Limpasan air hujan yang tidak tertangani dengan baik akan menyebabkan banyak masalah bagi masyarakat, terutama banjir.

Drainase adalah sistem atau proses pengelolaan air yang bertujuan untuk mengalirkan kelebihan air dari suatu kawasan, baik itu air hujan, limpasan, atau air tanah, menuju saluran pembuangan atau tempat penampungan. Drainase dapat berupa sistem alami (sungai, rawa) maupun buatan (parit, gorong-gorong, saluran beton).

Pembangunan *drainase* adalah tindakan teknis untuk mengurangi jumlah air yang berlebihan yang disebabkan oleh aliran permukaan di suatu area sehingga tidak terjadi permasalahan pada daerah tersebut. Kelebihan air dapat berasal dari rembesan, air hujan, atau kelebihan air irigasi. Saluran di

atas atau di bawah tanah dapat digunakan untuk mengeluarkan kelebihan air tersebut. Tujuan *drainase* adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi Genangan: Mengalirkan kelebihan air dari permukaan tanah untuk mencegah genangan yang mengganggu aktivitas manusia.
2. Mencegah Banjir: Mengelola aliran air agar tidak melimpah di suatu wilayah yang dapat menyebabkan banjir.
3. Melindungi Infrastruktur: Menghindari kerusakan jalan, bangunan, dan fasilitas umum akibat air yang menggenang.
4. Meningkatkan Kesehatan Lingkungan: Mencegah munculnya penyakit akibat genangan air seperti malaria dan demam berdarah.
5. Mendukung Pertanian: Mengatur kadar air di lahan pertanian agar sesuai dengan kebutuhan tanaman.

### **1. Kebijakan *drainase* Indonesia**

Sistem *drainase* sekarang dianggap sebagai infrastruktur publik yang tidak hanya menangani banjir dan kesehatan masyarakat, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan kualitas lingkungan, perlindungan ekosistem, dan keberlanjutan kota. Saat ini, banyak penelitian dan uji coba dilakukan untuk menemukan cara untuk membuat dan membangun sistem *drainase* perkotaan yang berkelanjutan. Hal ini selaras dengan amanat Undang-undang Sumber Daya Air No. 17 tahun 2019 tentang Sumber Daya Air. Beberapa pendekatan pembangunan drainase yang sustainabel saat ini diantaranya adalah (Asmorowati *et al.*, 2021):

#### **a. *Low Impact Development* (LID)**

Urbanisasi telah sangat mengubah kondisi permukaan tanah dan oleh karena itu limpasan air hujan sangat bervariasi. Aliran puncak banjir dan volume banjir meningkat seiring dengan

meningkatnya volume limpasan. Pembangunan Berdampak Rendah (LID) adalah konsep berkelanjutan yang meminimalkan dampak urbanisasi untuk mempertahankan fungsi hidrologis alami di perkotaan dan oleh karena itu semakin penting (Luan, 2015). Elemen LID dapat dilihat pada gambar berikut:



**Gambar 7.3 Elemen kunci LID**

Sumber: (Darsono, 2007)

b. *Sustainable Urban Drainage System (SUDs)*

Pengendalian limpasan air hujan sering kali menjadi perhatian karena urbanisasi dan kejadian curah hujan yang ekstrem. Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan dapat mendukung jaringan hidraulik tradisional dalam pengelolaan air hujan dengan menyediakan pembuangan limpasan lokal dan penggunaan kembali air hujan yang terkumpul (Maglia and Raimondi, 2025).

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 12/PRT/M/2014 tentang Penyelenggaraan Sistem *Drainase* Perkotaan mengatur pengelolaan sistem drainase perkotaan di Indonesia. Peraturan ini menetapkan desain sistem **drainase** perkotaan sebagai drainase ramah lingkungan dengan tujuan untuk menciptakan lingkungan pemukiman yang sehat dan bebas genangan serta meningkatkan konservasi, pendayagunaan, dan pengendalian air.

Peraturan Pemerintah Indonesia No 26 Tahun 2008 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional mengatur tentang penanganan limpasan air hujan. Peraturan ini menyatakan bahwa setiap bangunan harus mematuhi aturan *zero delta Q*, yang berarti bahwa setiap bangunan tidak boleh menyebabkan aliran air meningkat ke sistem saluran drainase atau aliran sungai. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kemungkinan banjir karena meningkatnya tutupan lahan. Beberapa tindakan yang terkait dengan penerapan *aturan zero delta Q* adalah (Ayu and Andajani, 2022):

1. Tersedianya daerah resapan air hujan,
2. pembuatan lubang biopori,
3. perubahanlandsekap,
4. Tempat penyimpanan air hujan,
5. Saluran resapan biopori,

6. Sumur injeksi,
7. Sumur Resapan, dll.

Jumlah limpasan yang disebabkan oleh curah hujan dapat dikurangi dengan signifikan jika kegiatan-kegiatan tersebut di atas dapat dilakukan dengan baik secara teknis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Asmorowati, E.T. *et al.* (2021) 'Drainase Perkotaan', *Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia*, p. 161.
- Ayu, A.W. and Andajani, S.I.H. (2022) 'Penerapan Konsep Zero Delta Run-Off pada Perumahan Tataka Puri , Kabupaten Tangerang', 08(01), pp. 1–12.
- Darsono, S. (2007) 'Sistem pengelolaan air hujan lokal yang ramah lingkungan', 13(4).
- Fahriana, T. and Ridwan, I. (2023) 'Analisis Aliran Permukaan Dan Debit Puncak Di Catchment Area Sungai Hauran Menggunakan Model Agnps ( Agricultural Non Point Source Pollution Model )', 3(1), pp. 9–14.
- Funakawa, S. (2017) 'Process of Runoff Generation at Different Cultivated Sloping Sites in North and Northeast Thailand.', *Process of Runoff Generation at Different Cultivated Sloping Sites in North and Northeast Thailand. Japanese journal of tropical agriculture* [Preprint]. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-4-431-56484-3\\_16](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-4-431-56484-3_16).
- Halecki, W. and Stachura, T. (2022) 'Capacity of River Valleys to Retain Nutrients from Surface Runoff in Urban and Rural Areas ( Southern Poland )', (October). Available at: <https://doi.org/10.3390/w14203259>.
- Izadifard Hadi, Saeed Rasinezami, Raof Mostafazadeh, H.K. (2023) 'Relationship of surface runoff coefficient with land use/land cover change in Samian watershed, Ardabil province', 14(51), pp. 24–41. Available at: <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373960.0>.
- Luan, P.L.J.L.R.F.X.L.Y.Z.M. (2015) 'The performance of LID (low impact development) practices at different locations with an urban drainage system: a case study of Longyan, China'.

- Available at:  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wpt.2015.090>.
- Maglia, N. and Raimondi, A. (2025) 'A new approach on design and verification of integrated sustainable urban drainage systems for stormwater management in urban areas', *Journal of Environmental Management*, 373(June 2024), p. 123882. Available at:  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123882>.
- Miao, C. *et al.* (2020) 'The Changing Relationship Between Rainfall and Surface Runoff on the Loess Plateau , China Journal of Geophysical Research : Atmospheres', pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JD032053>.
- R.D Mazalena, Ahmad, Y.Y. (2022) 'Analysis of run-off potential for flash flood management in Rahakolowu Watershed Analysis of run-off potential for flash flood management in Rahakolowu Watershed'. Available at:  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/986/1/012046>.
- Riswal Karamma, A.S.S. (2020) 'Kajian koefisien aliran terhadap perubahan debit banjir pada das karalloe dengan aplikasi arcgis 1', 6(1), pp. 1–8.
- Salsabila, A. and Nugraheni, I.L. (2020) 'Annisa salsabila irma lusi nugraheni'.
- SOKUR K., P.L. (2021) 'CONDITIONS FOR THE FORMATION OF SURFACE RUNOFF, WHICH IS FORMED AS A RESULT OF HEAVY AND DANGEROUS PRECIPITATION WITHIN URBANIZED AREAS'. Available at: <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.4>.
- Triatmojo, B. (2010) *Hidrologi Terapan*.
- Vauclin, M. and Kao, C. (2005) 'Mechanisms of surface runoff genesis on a subsurface drained soil affected by surface crusting : A field investigation', 30, pp. 598–610. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.07.014>.
- Xu, T., Li, P. and Merwade, V. (2024) 'Journal of Hydrology :

Regional Studies Analysis of short- and long-term controls on the variability of event-based runoff coefficient', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56(March), p. 101993. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101993>.

Yang, H., Hou, X. and Cao, J. (2024) 'Characteristics of spatial and temporal distribution of heavy rainfall and surface runoff generating process in the mountainous areas of northern China', (February).

Yue Zheng, Xiaoming Jin, Jun Wei, Yongchao Zhou, Y.Z. (2025) 'A novel framework for optimization and evaluation of sensors network in urban drainage system'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122833>.

# BAB 8

## AKUIFER DAN AIR TANAH: SUMBER DAYA DAN PEMANFAATAN AIR BAWAH PERMUKAAN

Oleh Suprapti, S.T., M.T

### A. Pendahuluan

Siklus hidrologi, yang mencakup berbagai elemen bio-geo-fisik, termasuk air tanah sebagai salah satu komponennya (Rejekiningrum, 2009). Air hujan yang jatuh ke tanah akan mengalir di atas tanah sebagai limpasan permukaan atau meresap ke dalam tanah melalui proses infiltrasi. Melalui proses yang dikenal sebagai perkolasi, air yang terinfiltrasi sebagian mengisi air tanah, yang kemudian muncul sebagai mata air atau mengalir ke sungai. Pasokan air dunia diperkirakan oleh Chow V.T. (1988) dalam buku Hidrologi Terapan (Bambang Triatmodjo), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.1.

**Tabel 8. 1** Perkiraan jumlah air di dunia

Jenis	Volume (km <sup>3</sup> )	% terhadap total air
Lautan	1.338.000.000	96,5
Air tanah	23.400.000	1,69
Lengas tanah	16.500	0,0012
Es di kutub	24.023.500	1,7

Es dan salju lainnya	340.000	0,025
Danau	176.000	0,013
Rawa	11.470	0,0008
Sungai	2.120	0,0002
Air biologis	1.120	0,0001
Air atmosfir	12.900	0,001
Total air	1.385.984.610	100

(Sumber: Chow V.T. (1988))

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 8.1, 96,5% dari total air adalah air laut. Sisanya 1,7% terdiri dari es di kutub, 1,69% air tanah (kadang-kadang disebut air bawah permukaan), dan 0,1% air di udara dan air permukaan. Dibandingkan dengan air permukaan, persentase air tanah jauh lebih tinggi. Air tanah merupakan sumber daya alam yang dapat digunakan untuk keperluan industri, pasokan air baku, dan keperluan lainnya, asalkan digunakan secara bertanggung jawab dan berkelanjutan.

## B. Air tanah dan akuifer

### 1. Pengertian air tanah dan akuifer

Karena air tanah mempengaruhi hajat hidup orang banyak, air tanah memiliki posisi yang signifikan dan strategis. Oleh karena itu, untuk menanganinya, negara membuat peraturan menteri dan peraturan pemerintah. Air tanah didefinisikan sebagai air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah dalam Peraturan Pemerintah No. 43 Tahun 2008 Republik Indonesia. Lapisan batuan yang jenuh dengan air tanah yang memiliki kapasitas

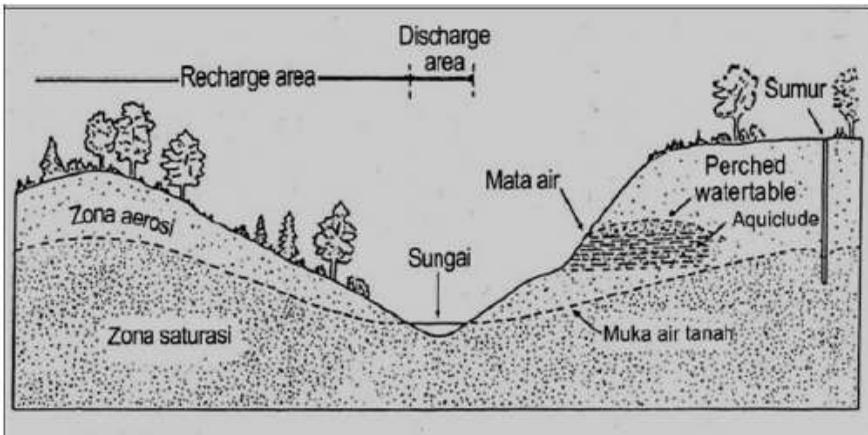
untuk menyimpan dan memindahkan air tanah dalam jumlah yang memadai dan hemat biaya dikenal sebagai akuifer. Pedoman Penetapan Zona Konservasi Air Tanah (ESDM, 2018), Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia nomor 31 tahun 2018 menyebutkan definisi yang sama.

Semua air yang secara alami merembes atau memancar dari rongga batuan dasar ke permukaan tanah dikenal sebagai air tanah. Air tanah berasal dari curah hujan. Infiltrasi air hujan terjadi saat air hujan mengalir ke sungai atau laut. Menurut (Darwis, 2018), besarnya resapan air di dalam tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain waktu, ruang, kecuraman lereng, bahan penyusun permukaan tanah, jenis tanah, vegetasi, dan curah hujan. Definisi air tanah menurut (Zuhdi, 2019) dalam buku ajar Pengantar Geologi adalah air yang meresap ke dalam tanah dan bergabung membentuk lapisan tanah (disebut sebagai akuifer) di dalam ruang-ruang antar butir tanah.

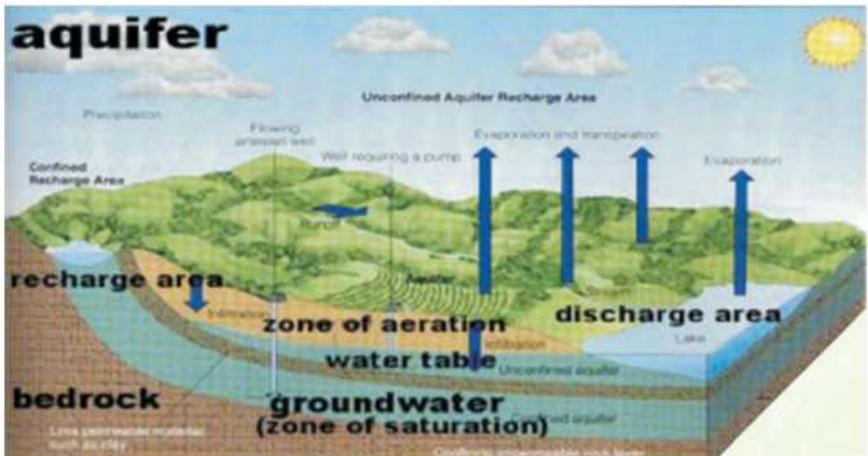
## **2. Pergerakan air tanah**

Secara umum, jenis tanah bersifat permeabel, yang berarti bahwa air bebas mengalir melalui ruang pori-pori di antara butiran tanah. Kemampuan tanah untuk meloloskan air dikenal sebagai permeabilitas tanah, dan nilai permeabilitas tanah dinyatakan dengan koefisien permeabilitas. Air bergerak di bawah permukaan tanah dalam arah vertikal dan horizontal. Pergerakan vertikal ke bawah dipengaruhi oleh gravitasi melalui proses infiltrasi, sedangkan pergerakan ke atas disebabkan oleh daya kapilaritas air tanah yang dipengaruhi oleh porositas dan temperatur tanah.

Zona resapan (*recharge zone*), atau area di mana air di atas permukaan bumi meresap karena gravitasi, adalah tempat model aliran air tanah dimulai. Air yang tidak tertahan akan terurai menjadi zona yang dikenal sebagai “zona jenuh”, ketika semua ruang yang tersedia terisi air. Area ini disebut sebagai air tanah (*groundwater*). Muka air tanah adalah batas atas zona ini. Zona aerasi adalah lapisan batuan, tanah, atau sedimen paling atas yang tidak jenuh air. Secara umum, permukaan topografi mempengaruhi muka air tanah. Air hujan yang merembes ke bawah ke zona jenuh dikenal sebagai daerah resapan (*recharge area*). Di sisi lain, tempat air tanah keluar disebut *discharge area*. Untuk mempelajari lebih lanjut, model aliran air tanah diilustrasikan pada Gambar 8.1 dan Gambar 8.2 berikut ini:



**Gambar 8. 1 Kondisi topografi mempengaruhi muka air tanah**  
(Sumber: Zuhdi, 2019)



**Gambar 8. 2 Recharge dan discharge area**  
(Sumber: Zuhdi, 2019)

### 3. Klasifikasi akuifer

Berdasarkan bagaimana air tanah diperlakukan, lapisan batuan dapat dikategorikan sebagai berikut:

#### a. Akuifer

Formasi geologi yang mengandung air dan memiliki kapasitas untuk mengalirkan air secara alami dikenal sebagai akuifer. Pasir, kerikil, batu pasir, dan batu kapur adalah beberapa jenis lapisan yang mengandung air.

#### b. *Aquiclude*

Jenis fitur geologi yang dapat menampung air tetapi tidak dapat mengeluarkannya secara alami, lapisan kedap air, seperti tanah liat, disebut *aquiclude*.

c. *Aquifuge*

Adalah struktur kedap air yang tidak dapat menahan atau melepaskan air. Batuan kristal, lempung pasif, dan batuan metamorf yang padat adalah beberapa contohnya.

d. *Aquitard*

Berbeda dengan akuifer, *aquitard* adalah fitur geologi semi-permeabel yang dapat mengalirkan air, tetapi sangat lambat. Dengan demikian, lapisan akuifer adalah lapisan yang memiliki kemampuan untuk menyerap dan memindahkan air. Berdasarkan litologinya, akuifer dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis:

a. Akuifer bebas atau tak tertekan (*unconfined aquifer*)

Akuifer tak tertekan adalah akuifer jenuh air (*saturated*) yang mengandung air tanah dalam lapisan kedap air yang tertutup. Misalnya, permukaan air tanah di dalam sumur yang memiliki kedalaman 1-25 meter.

b. Akuifer di bawah tekanan (akuifer tertekan)

Akuifer yang memiliki air tanah di bawah lapisan kedap air dan tekanan yang lebih tinggi dari tekanan udara dikenal sebagai akuifer tertekan. Lapisan batas adalah tempat air mengalir. Lapisan atas dan bawah akuifer ini melingkupi akuifer tersebut, dan akuifer ini jenuh dengan air. Contohnya, sebuah sumur artesis. Gambar 8.3 menunjukkan akuifer tertekan dan akuifer bebas.



**Gambar 8. 3** Akuifer tidak tertekan dan akuifer tertekan

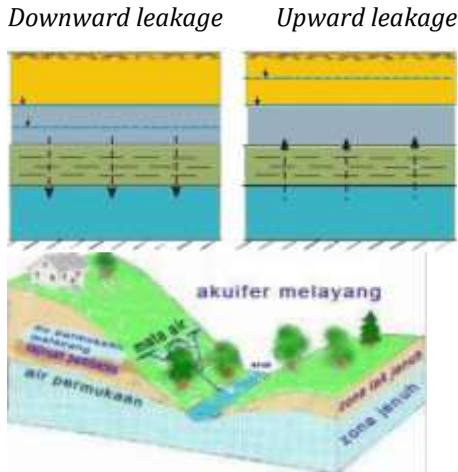
(Sumber: Zuhdi, 2019)

c. Akuifer bocor (*leakage aquifer*)

Akuifer yang terletak di antara akuifer terbatas dan akuifer bebas dikenal sebagai akuifer bocor karena air tanah terperangkap di balik lapisan semi-kedap air.

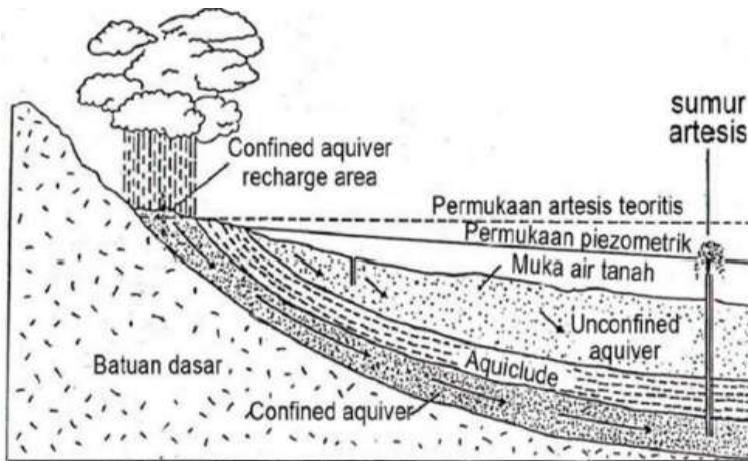
d. Akuifer melayang (*perched aquifer*)

Jika akuifer terbentuk di atas lapisan kedap air di zona aerasi, maka disebut sebagai akuifer melayang.



**Gambar 8. 4 Akuifer bocor dan akuifer melayang**  
(Sumber: Zuhdi, 2019)

Struktur geologi mempengaruhi jenis, potensi, dan arah migrasi air tanah. Posisi air tanah dan kedalaman serta ketebalan akuifer dipengaruhi oleh stratigrafi, yang terdiri dari banyak lapisan batuan. Karena akuifer diisolasi oleh aquiclude di atas dan di bawahnya, lapisan kedap air dengan konduktivitas hidraulik yang sangat kecil yang mencegah air untuk melewatinya, maka berat air di atasnya menekan air di dasar akuifer, menciptakan tekanan yang tidak dapat dilepaskan atau dipindahkan. Air akan memancar ke atas melawan gravitasi dan bahkan mencapai permukaan tanah jika sumur dibor ke dalam akuifer yang terbatas. Kami menyebut sumur ini sebagai sumur artesis. Cara kerja dari sebuah sumur artesis ditunjukkan pada Gambar 8.5.



**Gambar 8. 5 Cara kerja sumur artesis**

(Sumber: Zuhdi, 2019)

### C. Pemanfaatan air tanah dan permasalahannya

Laju pertumbuhan penduduk yang cepat, terutama di perkotaan, menuntut terpenuhinya pemenuhan kebutuhan air bersih yang semakin meningkat. Sementara penyediaan jaringan air bersih dari pemerintah belum mencukupi. Solusi yang mudah dan murah bagi masyarakat adalah menggunakan air tanah untuk memenuhi kebutuhan air baku setiap harinya (Suprpti, Kusuma, Cahyono, *et al.*, 2024). Karena penggunaan air permukaan seperti sungai, waduk dan lainnya, tidak dapat langsung digunakan terkait kualitas baku mutu airnya tidak memenuhi standart air baku. Pengolahan air permukaan tersebut membutuhkan biaya yang cukup mahal (Kusuma, Rahayu and Cahyono, 2009; Samsuhadi, 2018). Dengan 224 cekungan air tanah, Indonesia memiliki potensi air tanah yang cukup besar yaitu  $4,7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{tahun}$  (Rejekiingrum, 2009). Walau demikian, eksploitasi air tanah secara berlebihan dan intens, tanpa diimbangi usaha *recharge* air tanah akan

berdampak pada terjadinya penurunan permukaan tanah, *land subsidence* (Abidin *et al.*, 2011; Herlambang and Indriatmoko, 2018; Yatsrib *et al.*, 2021). Perambatan intrusi air laut terutama di pesisir pantai pun semakin meningkat (Samsuhadi, 2018).

Untuk mengatasi ekstraksi air tanah yang terus meningkat di banyak industri, diperlukan tindakan cepat. Setidaknya, bagaimana cara mengurangi dampak buruknya. Penggunaan air tanah kini telah menyebar ke seluruh penjuru negeri. Air tanah merupakan sumber air yang vital untuk berbagai keperluan dan merupakan salah satu sumber daya alam yang berkelanjutan. Akibatnya, air tanah menjadi lebih berharga. Air tanah dulunya merupakan sumber daya gratis yang dapat digunakan tanpa batasan atau pengawasan khusus. Namun, karena peningkatan permintaan yang tajam, air tanah kini telah berubah menjadi barang ekonomi, yang menunjukkan bahwa air tanah memiliki nilai pasar dan, dalam beberapa kasus, bahkan peran strategis. Oleh karena itu, keberlanjutan dan keseimbangan harus menjadi dasar penggunaan air tanah (Rejekiningrum, 2009; Nurhakim and Firdaus, 2022).

Inisiatif pemanfaatan air tanah yang bertanggung jawab terhadap lingkungan yang hanya mungkin dilakukan dengan pengelolaan air tanah yang efektif. Inventarisasi, pengaturan penggunaan, perizinan, pengendalian, dan pengawasan konservasi air tanah semuanya termasuk dalam pengelolaan ini. Gagasan pengelolaan cekungan air tanah melibatkan sejumlah pihak berdasarkan pertimbangan hukum dan teknis. Salah satu komponen rencana pengelolaan air tanah yang bertanggung jawab secara ekologis adalah pelestarian sumber air baku (Darwis, 2018).

Gagasan pengelolaan air tanah mencakup berbagai inisiatif untuk meningkatkan pemanfaatan dan konservasi sumber daya

air tanah, seperti pemanfaatan air tanah dalam kaitannya dengan waktu dan ruang, unsur-unsur kualitas, dan jumlah air tanah dalam akuifer untuk memenuhi permintaan. Dengan demikian, dalam rangka upaya pemanfaatan air tanah terpadu untuk menciptakan suasana dan kondisi lingkungan yang berkelanjutan, pengelolaan air tanah berkelanjutan merupakan suatu sistem. Pola teknik antisipasi dapat digunakan untuk memprediksi potensi dampak buruk pada masyarakat dan kondisi lingkungan.

#### **D. Konservasi air tanah**

Meskipun air tanah merupakan sumber daya alam yang dapat diperbarui, proses pembuatannya mahal dan memakan waktu. Diperlukan waktu yang lama dan teknologi yang canggih untuk memulihkan air tanah ke keadaan sebelum terdampak jika air tanah tersebut rusak baik secara kuantitas maupun kualitas. Bergantung pada jumlah pengambilannya, pengambilan air tanah secara intensif maupun berlebihan dapat mengubah kondisi air tanah di setiap wilayah. Hal ini juga memengaruhi penurunan tanah. Oleh karena itu, diperlukan tindakan konservasi air tanah untuk memenuhi permintaan air di wilayah yang pasokan air permukaannya belum mencukupi.

Penerapan imbuhan buatan (*artificial recharge*) pada air tanah dalam (air tanah artesis) adalah salah satu solusi alternatif untuk menambah ketersediaan air tanah. Imbuhan buatan akan lebih berhasil bila dilakukan pada daerah dengan potensi resapan air yang tinggi (Suprapti, Kusuma, Kardhana, *et al.*, 2024). Jika keseimbangan tercapai, maka manfaatnya adalah dapat memperkecil terjadinya intrusi air laut (Samsuhadi, 2018). Penelitian (Purwoarminta, Lubis and Maria, 2019), menyebutkan sejumlah teknik imbuhan buatan, antara lain:

1. Infiltrasi permukaan langsung

Metode ini memasukkan air permukaan seperti yang terdapat di danau, sungai, waduk, dan kolam ke dalam air tanah.

2. Infiltrasi bawah permukaan langsung

Metode ini, seperti sumur injeksi, berupaya memompa air hujan langsung ke akuifer.

3. Campuran bawah permukaan dan permukaan

Penggunaan tangki infiltrasi untuk akuifer tak tertekan yang disalurkan ke lapisan akuifer semi tertekan/tertekan merupakan contoh teknik ini.

4. Metode penetrasi tidak langsung

Sumur produksi diposisikan dekat dengan badan air permukaan, seperti danau, rawa, atau sungai, untuk menerapkan pendekatan ini.

Metode penerapan imbuhan buatan ini dilakukan sesuai dengan keadaan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. *et al.* (2011) "Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development," *Natural Hazards*, 59(3), pp. 1753–1771. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>.
- Darwis (2018) *Pengelolaan Air Tanah, Yogyakarta: Universitas Gajah Mada (UGM)*. <https://www.researchgate.net>.
- ESDM, K. (2018) "Pembagian Urusan Pemerintahan Bidang Energi dan Sumber Daya Mineral Sub Urusan Geologi kolom 3 huruf b 2015 tentang Perubahan Kedua atas Undang-Undang Mineral tentang Pedoman Penetapan Zona Konservasi Air," p. 26.
- Herlambang, A. and Indriatmoko, R.H. (2018) "Pengelolaan Air Tanah Dan Intrusi Air Laut," *Jurnal Air Indonesia*, 1(2). <https://doi.org/10.29122/jai.v1i2.2348>.
- Kusuma, M.S.B., Ragayu, R.A. and Cahyono, M. (2009) "Development study of turbulent  $\kappa$ - $\epsilon$  model for recirculation flow III: Two dimension recirculation flow in a reservoir," *ITB Journal of Engineering Science*, 41 B(1), pp. 1–16. <https://doi.org/10.5614/itbj.eng.sci.2009.41.1.1>.
- Nurhakim, A. and Firdaus, M. (2022) "Peluang Pemanfaatan Air Tanah Untuk Mendukung Keberlanjutan Sumber Daya Air Di Kota Pare-Pare," *Jurnal Teknik Hidro*, 15(1), pp. 30–36.
- Purwoarminta, A., Lubis, R.F. and Maria, R. (2019) "Imbuhan Airtanah Buatan untuk Konservasi Cekungan Airtanah Bandung-Soreang," *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 29(1), p. 65. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2019.v29.1004>.
- Rejekiningrum, P. (2009) "Capturing the Benefit of Groundwater for Water Resources Sustainability," *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 3(2), pp. 85–96.

- www.groundwater.com/groundwater\_.
- Samsuhadi, S. (2018) "Pemanfaatan Air Tanah Jakarta," *Jurnal Air Indonesia*, 5(1).  
<https://doi.org/10.29122/jai.v5i1.2428>.
- Suprapti, S., Kusuma, M.S.B., Kardhana, H., *et al.* (2024) "An assessment of potential infiltration areas to support groundwater supply system in Jagakarsa, South Jakarta, based on Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) analysis," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(June), p. 100799.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100799>.
- Suprapti, S., Kusuma, M.S.B., Cahyono, M., *et al.* (2024) "Assessment of rainwater harvesting potential based on field observations in Jagakarsa District area, South Jakarta," *E3S Web of Conferences*, 479, pp. 1–7.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447903005>.
- Yatsrib, M. *et al.* (2021) "Study on the Contribution of Normalization to Reducing Flood Risk in the Ciliwung River, Tebet District, Jakarta," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 933(1).  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/933/1/012032>.
- Zuhdi, M. (2019) *Buku Ajar Pengantar Geologi*, Penerbit Duta Pustaka Ilmu. [http://eprints.unram.ac.id/14627/1/BUKU\\_AJAR\\_PENGANTAR\\_GEOLOGI.pdf](http://eprints.unram.ac.id/14627/1/BUKU_AJAR_PENGANTAR_GEOLOGI.pdf).

# BAB 9

## BANJIR DAN KEKERINGAN: DINAMIKA HIDROLOGIS DAN MANAJEMEN RISIKO

Oleh Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng

### A. Pendahuluan

#### 1. Definisi dan Konsep Dasar

Banjir dan kekeringan merupakan dua fenomena ekstrem dalam sistem hidrologis yang berdampak besar pada lingkungan, sosial, dan ekonomi. Banjir didefinisikan sebagai meluapnya air secara berlebihan di wilayah yang biasanya kering (Kelly *et al.*, 2023). Banjir dapat terjadi akibat curah hujan ekstrem, pengelolaan tata ruang yang buruk, dan kerusakan ekosistem seperti deforestasi. Kekeringan, di sisi lain, adalah kekurangan air yang berkepanjangan, yang diakibatkan oleh kurangnya curah hujan atau ketidakmampuan sistem hidrologis untuk menyimpan dan mendistribusikan air secara efisien (Van Loon, 2015). Kekeringan dikategorikan menjadi kekeringan meteorologis, hidrologis, dan agrikultural, tergantung pada dampaknya terhadap berbagai sektor.

Fenomena ini dipengaruhi oleh perubahan iklim global yang memengaruhi pola curah hujan dan suhu, sehingga memicu kejadian yang lebih sering dan intens. Interaksi manusia, seperti urbanisasi yang tidak terkontrol dan eksploitasi sumber daya air, turut memperparah dampak dari kedua fenomena ini (Liu, Huang and Yang, 2022)(Rubinato *et al.*, 2019).

Siklus hidrologi adalah proses berkelanjutan dari pergerakan air di bumi, meliputi penguapan, kondensasi, presipitasi, dan infiltrasi. Ketidakseimbangan dalam siklus ini dapat menyebabkan banjir atau kekeringan. Aktivitas manusia, seperti penggundulan hutan dan perubahan tata guna lahan, mengganggu infiltrasi air ke dalam tanah, meningkatkan limpasan permukaan yang memicu banjir (Singh and Singh, 2021). Sementara itu, eksploitasi air tanah yang berlebihan mengurangi cadangan air untuk menghadapi kekeringan.

## **2. Pentingnya Kajian Banjir dan Kekeringan**

Fenomena banjir dan kekeringan membawa dampak yang kompleks terhadap berbagai aspek kehidupan manusia:

- a. Dampak Sosial Banjir menyebabkan di lokasi penduduk, kerugian materi, dan ancaman kesehatan seperti penyakit bawaan air (Organization, 2020), (van der Ploeg and Bull, 2020). Kekeringan berdampak pada kelangkaan air bersih, yang meningkatkan risiko konflik sosial, terutama di wilayah dengan sumber daya air terbatas.
- b. Dampak Ekonomi Kerusakan infrastruktur akibat banjir mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan. Dalam konteks kekeringan, penurunan hasil pertanian mengancam ketahanan pangan dan stabilitas ekonomi nasional, khususnya di negara berkembang (UNICEF, 2021),(Organization, 2021).
- c. Dampak Lingkungan Banjir dapat menyebabkan erosi tanah, sedimentasi sungai, dan hilangnya habitat alami. Sementara itu, kekeringan mempercepat degradasi tanah dan mengancam keanekaragaman hayati (Lucatello and Sánchez, 2022).

Tantangan besar, termasuk perubahan iklim, pertumbuhan populasi, dan urbanisasi yang cepat. Di wilayah

perkotaan, tata kelola air sering kali tidak memadai untuk mengatasi hujan ekstrem atau penyimpanan air selama musim kering (Shirmohammadi *et al.*, 2024). Di pedesaan, ketergantungan pada sistem irigasi tradisional sering kali tidak mampu menghadapi variabilitas iklim. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan berbasis data dan teknologi untuk mendukung pengelolaan yang lebih adaptif.

### **3. Tujuan dan Ruang Lingkup**

Buku ini bertujuan untuk memberikan pemahaman mendalam tentang dinamika hidrologis banjir dan kekeringan, termasuk faktor-faktor penyebabnya, serta interaksi dengan aktivitas manusia dan perubahan iklim. Analisis ini didukung oleh data historis, pemodelan hidrologis, dan teknologi mutakhir seperti penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (GIS).

Dalam menghadapi banjir dan kekeringan, manajemen risiko yang efektif mencakup langkah-langkah mitigasi, adaptasi, dan respons darurat. Buku ini dirancang sebagai panduan komprehensif untuk pembuat kebijakan, akademisi, dan praktisi di lapangan. Solusi yang diusulkan berbasis bukti, mengintegrasikan pendekatan teknis, kelembagaan, dan komunitas.

Buku ini membahas lima aspek utama:

- a. Pemahaman tentang dinamika hidrologis banjir dan kekeringan.
- b. Faktor penyebab dan dampaknya terhadap manusia dan lingkungan.
- c. Strategi mitigasi risiko untuk mencegah dan mengurangi dampak.
- d. Adaptasi melalui inovasi teknologi dan pendekatan berbasis komunitas.

- e. Studi kasus yang memberikan pelajaran praktis dari implementasi di lapangan.

Buku ini mengintegrasikan literatur terbaru dari jurnal-jurnal ilmiah yang diakui dan pengalaman praktis dari berbagai wilayah di dunia.

## **B. Dinamika Hidrologis Banjir dan Kekeringan**

### **1. Faktor Penyebab Banjir**

#### **a. Curah Hujan Ekstrem**

Curah hujan ekstrem merupakan salah satu faktor utama penyebab banjir. Fenomena ini terjadi ketika intensitas curah hujan melebihi kapasitas infiltrasi tanah atau kapasitas sistem drainase untuk menyalurkan air. Hujan ekstrem sering kali disebabkan oleh perubahan pola iklim global, seperti peningkatan frekuensi badai tropis dan anomali cuaca akibat *El Niño Southern Oscillation (ENSO)* (Alfieri *et al.*, 2015). Selain itu, perubahan iklim global telah meningkatkan intensitas hujan di beberapa wilayah, terutama di daerah tropis, sehingga memperbesar risiko banjir (Kikstra *et al.*, 2022).

Ketidakseimbangan antara curah hujan yang tinggi dan kemampuan sistem hidrologis untuk menyerapnya sering kali memperburuk dampak banjir. Hal ini paling sering terjadi di wilayah yang memiliki topografi rendah, seperti dataran banjir atau daerah pesisir (Jongman, Ward and Aerts, 2012).

#### **b. Urbanisasi**

Urbanisasi yang cepat dan tidak terencana meningkatkan risiko banjir secara signifikan.

Peningkatan jumlah permukaan kedap air (impermeable surfaces), seperti beton dan aspal, mengurangi kemampuan tanah untuk menyerap air hujan. Hal ini menyebabkan peningkatan runoff permukaan yang mengalir langsung ke sistem drainase, yang sering kali memiliki kapasitas terbatas (Singh and Singh, 2021). Dalam banyak kasus, infrastruktur perkotaan yang tidak memadai gagal menangani limpasan air yang meningkat, sehingga memperparah banjir di wilayah urban.

Urbanisasi juga berdampak pada pola aliran air di DAS (Daerah Aliran Sungai). Penggalan sungai, pembangunan di bantaran sungai, dan pengurangan area hijau semuanya memengaruhi kapasitas sungai untuk menampung air selama hujan deras. Sebagai contoh, peningkatan banjir perkotaan di Jakarta sebagian besar disebabkan oleh kombinasi urbanisasi, pengendapan sungai, dan pengelolaan drainase yang buruk (Waghwal and Agnihotri, 2019).

### **c. Kerusakan Daerah Aliran Sungai (DAS)**

Kerusakan DAS menjadi faktor penyebab banjir yang sering diabaikan, namun memiliki dampak jangka panjang yang signifikan. Aktivitas seperti penebangan hutan, perubahan tata guna lahan, dan degradasi vegetasi alami mengurangi kemampuan DAS untuk menyerap air hujan. Vegetasi di DAS berperan penting dalam memperlambat limpasan air dan memungkinkan infiltrasi ke dalam tanah. Ketika vegetasi hilang, kecepatan limpasan meningkat, yang dapat menyebabkan banjir bandang di daerah hilir (Huang *et al.*, 2024) (Wang *et al.*, 2023).

Selain itu, sedimentasi akibat erosi tanah di DAS mengurangi kapasitas sungai dan waduk untuk menampung air. Dalam jangka panjang, kerusakan DAS memperburuk risiko banjir bahkan dengan curah hujan yang relatif normal.

#### **d. Perubahan Tata Guna Lahan dan Peningkatan Risiko Banjir**

Perubahan tata guna lahan, seperti konversi hutan menjadi lahan pertanian atau kawasan pemukiman, turut memperbesar risiko banjir. Aktivitas ini sering kali menghilangkan lapisan tanah yang berfungsi menyerap air, sekaligus meningkatkan erosi tanah dan sedimentasi sungai. Konversi lahan basah juga berdampak buruk karena lahan basah merupakan sistem alami untuk menyerap dan menyimpan air hujan (Şen, 2021).

Wilayah dengan tata guna lahan yang tidak terkelola dengan baik biasanya mengalami peningkatan risiko banjir akibat hilangnya area resapan air. Sebagai contoh, konversi hutan mangrove menjadi kawasan tambak telah mengurangi perlindungan alami di wilayah pesisir terhadap banjir akibat pasang surut atau badai (Huang *et al.*, 2024).

#### **e. Faktor Gabungan dan Peran Manusia**

Faktor-faktor penyebab banjir sering kali saling berinteraksi. Sebagai contoh, curah hujan ekstrem yang terjadi di daerah dengan tingkat urbanisasi tinggi dan tata guna lahan yang buruk akan menghasilkan risiko banjir yang jauh lebih besar. Aktivitas manusia, seperti pembangunan di zona banjir atau pengurangan

kapasitas drainase akibat tumpukan sampah, sering kali memperburuk dampak banjir yang sudah terjadi secara alami (Kelly *et al.*, 2023).

Untuk mengurangi risiko ini, diperlukan kombinasi pendekatan teknis dan kebijakan tata ruang yang berkelanjutan. Hal ini mencakup pengelolaan DAS berbasis ekosistem, pembangunan infrastruktur hijau, dan peningkatan kesadaran masyarakat tentang pentingnya menjaga lingkungan sebagai bagian dari mitigasi banjir.

## 2. Faktor Penyebab Kekeringan

### a. Perubahan Pola Iklim

Perubahan pola iklim global memiliki dampak signifikan terhadap frekuensi dan intensitas kekeringan. Salah satu mekanisme utama adalah peningkatan suhu global yang mengubah distribusi curah hujan dan meningkatkan penguapan. Perubahan pola presipitasi telah menyebabkan beberapa wilayah menjadi lebih kering, terutama di zona semi-arid dan daerah tropis tertentu (Van Loon, 2015). Pemanasan global juga mengintensifkan sirkulasi atmosfer, seperti monsun, yang berperan penting dalam distribusi hujan musiman (Alfieri *et al.*, 2015).

Fenomena ini diperparah oleh peningkatan frekuensi kejadian *El Nino*. *El Nino Southern Oscillation* (ENSO) memengaruhi pola curah hujan secara global, dengan *El Niño* sering kali dikaitkan dengan kekeringan di wilayah tertentu, seperti Australia, Asia Tenggara, dan Amerika Selatan. Selama kejadian *El Nino*, peningkatan suhu permukaan laut di Samudra Pasifik menyebabkan

perubahan pola angin yang menghambat pembentukan awan hujan, sehingga wilayah tersebut mengalami kekurangan curah hujan (Lucatello and Sánchez, 2022).

Dampak Lokal dan Regional Perubahan iklim memengaruhi intensitas kekeringan dengan cara yang bervariasi di setiap wilayah. Di Asia Selatan, misalnya, musim monsun semakin tidak menentu, menghasilkan musim kekeringan lebih sering. Sementara itu, di Afrika Sub-Sahara, perubahan pola angin telah mengurangi curah hujan di wilayah tersebut selama beberapa dekade terakhir (Cook *et al.*, 2016).

### **b. Pengelolaan Air yang Buruk**

Kekeringan sering kali diperburuk oleh pengelolaan air yang tidak efisien. Penggunaan air yang tidak bijaksana, seperti irigasi pertanian yang tidak efisien, memperparah ketersediaan air di musim kering. Selain itu, kurangnya investasi dalam infrastruktur penyimpanan air, seperti waduk dan embung, membuat masyarakat semakin rentan terhadap kekeringan.

Penyalahgunaan Sistem Irigasi Dalam pertanian, sistem irigasi yang mengandalkan teknik banjir (flood irrigation) menghabiskan air dalam jumlah besar tanpa mempertimbangkan efisiensi penggunaannya. Di beberapa negara berkembang, irigasi semacam ini dapat menghabiskan lebih dari 70% sumber daya air lokal, sehingga mengurangi cadangan air tanah dan memperburuk kekeringan di musim berikutnya (Organization, 2021)(Organization, 2020).

Kurangnya Konservasi Air Kekeringan juga disebabkan oleh minimnya upaya konservasi air, seperti

penggunaan teknologi hemat air di rumah tangga, industri, dan pertanian. Selain itu, kurangnya pemahaman masyarakat tentang pentingnya manajemen sumber daya air berkontribusi pada kelangkaan air selama musim kering (Zhang *et al.*, 2024).

### **c. Eksploitasi Air Tanah**

Eksploitasi air tanah yang tidak berkelanjutan adalah salah satu faktor utama penyebab kekeringan, terutama di wilayah yang bergantung pada sumber air tanah untuk kebutuhan sehari-hari dan irigasi. Pengambilan air tanah yang melebihi kapasitas recharge (pengisian ulang) alami menyebabkan penurunan muka air tanah, sehingga mengurangi cadangan air yang tersedia di masa depan (Wada, van Beek and Bierkens, 2012).

Dampak Regional Eksploitasi Air Tanah Di beberapa wilayah seperti India, Tiongkok, dan Timur Tengah, penggunaan air tanah secara besar-besaran telah menyebabkan penurunan signifikan dalam kapasitas akuifer. Penurunan ini tidak hanya berdampak pada ketersediaan air, tetapi juga menyebabkan masalah lingkungan, seperti intrusi air asin di wilayah pesisir dan degradasi tanah.

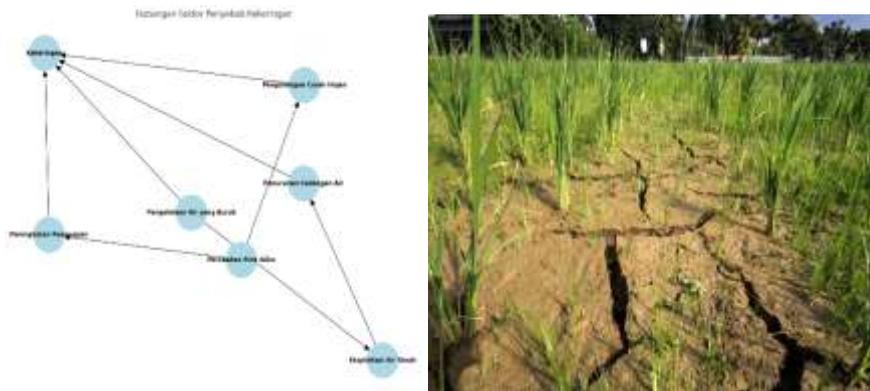
Degradasi Ekosistem Eksploitasi air tanah juga memengaruhi ekosistem lokal, karena banyak ekosistem air tawar bergantung pada aliran air tanah untuk menjaga keseimbangan hidrologisnya. Ketika cadangan air tanah habis, habitat alami terganggu, mengancam keanekaragaman hayati di wilayah tersebut (Zhang *et al.*, 2024).

#### d. Dampak Interaksi Faktor

Faktor-faktor tersebut sering kali saling berinteraksi, menciptakan kondisi yang memperburuk kekeringan. Misalnya, perubahan pola iklim yang mengurangi curah hujan di daerah semi-arid digabungkan dengan eksploitasi air tanah yang tidak terkendali dapat menyebabkan kekeringan yang lebih parah. Selain itu, pengelolaan air yang buruk meningkatkan ketergantungan pada air tanah selama musim kering, yang mempercepat pengurasan akuifer.

#### Ilustrasi Gambar Pendukung

Berikut ilustrasi yang menunjukkan hubungan antara faktor penyebab kekeringan, mulai dari perubahan pola iklim hingga eksploitasi air tanah:



**Gambar 9. 1 Dampak Penyebab Kekeringan**

Sumber : Analisis dan <https://mediaindonesia.com/cdn-cgi/image.jpg>

### 3. Dampak Kombinasi Banjir dan Kekeringan

Banjir dan kekeringan, meskipun merupakan fenomena hidrologis yang bertolak belakang, sering kali memberikan dampak yang saling memperburuk terhadap sistem sosial, ekonomi, dan lingkungan. Kedua fenomena ini dapat terjadi secara bersamaan atau bergantian dalam suatu wilayah akibat perubahan iklim dan pengelolaan sumber daya yang tidak berkelanjutan. Berikut penjelasan dampaknya:

#### a. Ketahanan Pangan

1. Banjir: Genangan air yang berlebihan merusak tanaman, mencuci nutrisi tanah, dan menyebabkan kehilangan hasil panen. Setelah banjir, tanah juga bisa menjadi kurang subur akibat erosi dan sedimentasi.
2. Kekeringan: Kekurangan air menghambat pertumbuhan tanaman, menyebabkan penurunan produktivitas pertanian, dan mempengaruhi pasokan pangan. Kekeringan yang berkepanjangan juga memperburuk degradasi tanah.
3. Kombinasi Dampak Ketika banjir dan kekeringan terjadi secara bergantian, dampaknya lebih buruk. Misalnya, banjir menghancurkan infrastruktur irigasi, yang kemudian mengurangi kemampuan petani untuk menghadapi kekeringan berikutnya. Situasi ini dapat menyebabkan krisis pangan di tingkat lokal maupun global, terutama di wilayah yang bergantung pada pertanian hujan (Organization, 2020).

#### b. Degradasi Lingkungan

1. Kerusakan Ekosistem: Banjir mengakibatkan hilangnya habitat alami, seperti lahan basah dan hutan, sementara kekeringan mempercepat desertifikasi dan menurunkan keanekaragaman hayati. Kombinasi ini

mempercepat kerusakan ekosistem yang berfungsi sebagai penyangga alami terhadap perubahan iklim (Singh and Singh, 2021).

2. Erosi dan Salinisasi: Banjir dapat menyebabkan erosi lapisan tanah atas, sementara kekeringan meningkatkan risiko salinisasi tanah akibat penguapan tinggi. Interaksi kedua proses ini menurunkan kualitas tanah secara signifikan, sehingga tidak layak untuk pertanian maupun ekosistem lainnya.

**c. Konflik Sumber Daya**

1. Persaingan untuk Air: Banjir dan kekeringan sering kali meningkatkan tekanan pada sumber daya air yang terbatas. Banjir dapat mencemari sumber air bersih, sementara kekeringan memperburuk kekurangan air. Hal ini memicu konflik antar komunitas yang bergantung pada sumber daya yang sama.
2. Ketegangan Sosial dan Politik: Ketika ketersediaan pangan dan air menurun, ketegangan sosial dan politik sering kali meningkat, terutama di wilayah dengan pemerintahan yang lemah atau sistem manajemen sumber daya yang tidak memadai (Wang *et al.*, 2023). Misalnya, migrasi paksa akibat banjir atau kekeringan sering kali menjadi pemicu konflik di wilayah perbatasan.

**d. Dampak Ekonomi**

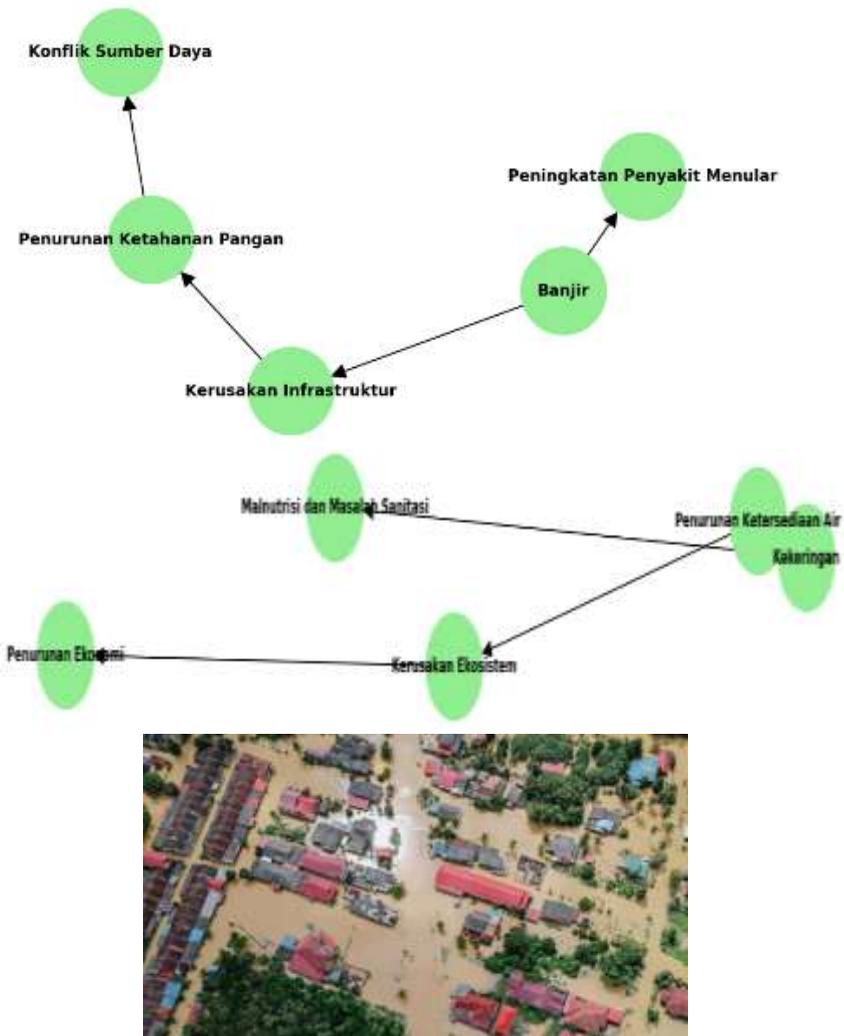
1. Kerugian Finansial: Banjir menyebabkan kerusakan infrastruktur, termasuk jalan, jembatan, dan fasilitas kesehatan, yang memerlukan biaya besar untuk perbaikan. Kekeringan, di sisi lain, mengurangi produktivitas ekonomi sektor pertanian dan energi, khususnya di wilayah yang bergantung pada pembangkit listrik tenaga air (Detrembleur *et al.*, 2015).

2. Pengangguran: Kombinasi banjir dan kekeringan memperburuk pengangguran di sektor pertanian karena petani kehilangan mata pencaharian. Dampaknya paling dirasakan oleh masyarakat miskin yang bergantung pada pertanian subsisten.

**e. Dampak Kesehatan Masyarakat**

1. Penyakit Menular: Setelah banjir, penyakit bawaan air seperti kolera dan diare meningkat akibat kontaminasi sumber air. Kekeringan juga berkontribusi terhadap penyebaran penyakit melalui penurunan kualitas air dan sanitasi.
2. Malnutrisi: Ketidakstabilan ketahanan pangan akibat banjir dan kekeringan meningkatkan risiko malnutrisi, terutama di kalangan anak-anak dan kelompok rentan lainnya (Organization, 2020).
3. Kesehatan Mental: Kombinasi bencana ini dapat menyebabkan tekanan psikologis yang berat bagi masyarakat terdampak, termasuk kecemasan, depresi, dan trauma akibat kehilangan mata pencaharian dan tempat tinggal.

Berikut adalah diagram yang menggambarkan dampak kombinasi banjir dan kekeringan terhadap ketahanan pangan, lingkungan, dan masyarakat:



**Gambar 9. 2 Analisis dan Dampak Kombinasi Banjir dan Kekeringan**

(Sumber: <https://web.bpbddjatimprov.go.id>)

## C. Strategi Manajemen Risiko Banjir

Mitigasi risiko bencana banjir dan kekeringan bertujuan untuk mengurangi dampak negatif dari kejadian *hidrologis ekstrem*. Dua pendekatan utama dalam mitigasi risiko adalah rekayasa teknis dan pengelolaan tata ruang berbasis risiko.

### 1. Rekayasa Teknis

Rekayasa teknis mencakup pembangunan infrastruktur untuk mencegah atau mengurangi dampak bencana. Infrastruktur ini dirancang untuk mengelola aliran air, menyimpan kelebihan air, atau melindungi wilayah yang rentan.

#### a. Tanggul

1. Fungsi: Tanggul berfungsi melindungi wilayah dari limpasan air yang berlebihan selama banjir. Struktur ini sering dibangun di sepanjang sungai atau wilayah pesisir untuk mencegah air meluap.
2. Efektivitas: Tanggul yang dirancang dengan baik dapat mengurangi risiko banjir di daerah perkotaan dan pertanian. Namun, jika tanggul gagal, dampaknya bisa lebih parah karena aliran air yang terakumulasi akan dilepaskan secara tiba-tiba (Ward *et al.*, 2014).

#### b. Bendungan

1. Fungsi: Bendungan memiliki dua peran utama dalam mitigasi risiko: menyimpan kelebihan air selama musim hujan untuk mencegah banjir, dan menyediakan air selama musim kering untuk mengatasi kekeringan.
2. Efektivitas: Bendungan besar seperti *Three Gorges Dam* di Tiongkok telah membuktikan kemampuannya dalam mengurangi risiko banjir skala besar. Namun, pembangunan bendungan juga memiliki dampak sosial dan lingkungan, seperti pemindahan penduduk dan perubahan ekosistem local (Wang *et al.*, 2023).

c. Kanal

1. Fungsi: Kanal membantu mengalihkan aliran air dari area rawan banjir ke wilayah yang lebih aman atau menyimpan air untuk kebutuhan masa depan.
2. Efektivitas: Kanal efektif dalam mengurangi tekanan pada sungai utama selama musim hujan, seperti sistem kanal di Belanda yang telah membantu negara tersebut bertahan dari banjir besar selama beberapa abad (Rubinato *et al.*, 2019).

d. Tantangan Rekayasa Teknis

1. Pemeliharaan: Infrastruktur teknis memerlukan pemeliharaan rutin agar tetap efektif.
2. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim: Infrastruktur yang dibangun berdasarkan data historis mungkin tidak lagi efektif menghadapi intensitas banjir dan kekeringan yang semakin ekstrem akibat perubahan iklim.

## 2. Pengelolaan Tata Ruang Berbasis Risiko

Pengelolaan tata ruang berbasis risiko melibatkan perencanaan wilayah yang memperhitungkan potensi bencana hidrologis. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi eksposur manusia dan aset terhadap risiko.

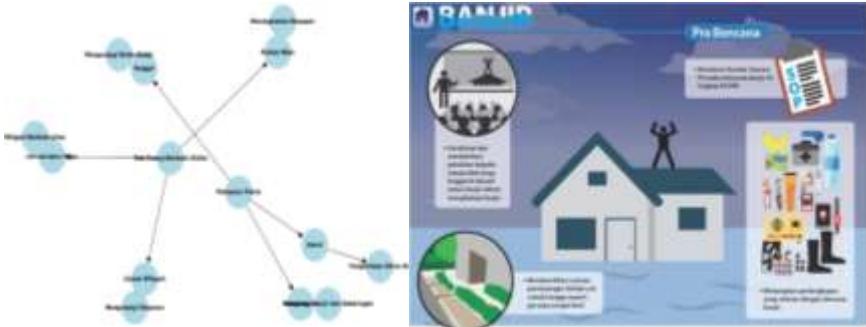
a. Zonasi Wilayah

1. Prinsip: Menetapkan zona aman untuk pemukiman dan aktivitas ekonomi, serta zona berisiko tinggi yang dilindungi atau dibatasi penggunaannya.
2. Implementasi: Pemukiman dilarang di wilayah rawan banjir, seperti dataran banjir sungai, dan lahan ini dapat dimanfaatkan sebagai ruang hijau atau area resapan air (Singh and Singh, 2021).

- b. Ruang Hijau dan Lahan Resapan
  - 1. Fungsi: Kawasan hijau berfungsi sebagai penyangga alami untuk mengurangi dampak banjir dan meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah, membantu mitigasi kekeringan.
  - 2. Contoh: Kota-kota seperti Singapura telah mengembangkan ruang hijau multifungsi untuk mengelola air hujan dan menyediakan manfaat ekosistem lainnya (Zhang *et al.*, 2024).
- c. Infrastruktur Hijau
  - 1. Definisi: Infrastruktur hijau mencakup pendekatan berbasis alam, seperti lahan basah buatan, hutan kota, dan sumur resapan, yang dirancang untuk bekerja dengan sistem hidrologis alami.
  - 2. Efektivitas: Solusi ini lebih berkelanjutan dibandingkan infrastruktur abu-abu (teknis), dan dapat disesuaikan dengan perubahan iklim (Detrembleur *et al.*, 2015).
- d. Tantangan Tata Ruang Berbasis Risiko
  - 1. Keterbatasan Lahan: Di wilayah perkotaan yang padat, implementasi tata ruang berbasis risiko sering kali terbentur pada keterbatasan lahan.
  - 2. Kepatuhan dan Penegakan: Kebijakan tata ruang memerlukan regulasi yang ketat dan kepatuhan masyarakat agar efektif.
- e. Interaksi Pendekatan
  - 1. Pendekatan rekayasa teknis dan tata ruang berbasis risiko saling melengkapi.
  - 2. Rekayasa teknis memberikan solusi langsung dan spesifik untuk mengendalikan air, seperti tanggul dan bendungan.

3. Tata ruang berbasis risiko mengurangi eksposur manusia terhadap risiko dengan memastikan pembangunan dilakukan di lokasi yang aman.

Ilustrasi pendekatan Mitigasi Resiko



**Gambar 9.3 Analisis dan Kombinasi Pendekatan Mitigasi Risiko**

Sumber: <https://bpbid.grobogan.go.id/berita/Mitigasi-Bencana-Banjir>

### 3. Sistem Peringatan Dini

Sistem peringatan dini adalah elemen penting dalam mitigasi bencana banjir dan kekeringan. Tujuannya adalah untuk memberikan informasi yang tepat waktu dan akurat kepada masyarakat dan pemerintah agar dapat mengambil langkah-langkah antisipasi untuk mengurangi dampak bencana. Komponen utama sistem ini melibatkan teknologi prediksi dan koordinasi antar lembaga.

#### a. Teknologi Prediksi Cuaca

1. Pemodelan Cuaca dan Iklim: Sistem prediksi curah hujan menggunakan model atmosfer yang dikembangkan dengan data historis, citra satelit, dan pengamatan langsung. Teknologi seperti *Global Forecast System (GFS)* dan *European Centre for Medium-*

*Range Weather Forecasts (ECMWF)* membantu memprediksi pola cuaca dalam jangka pendek hingga menengah (Ward *et al.*, 2014).

2. Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*): Satelit seperti NOAA dan Himawari menyediakan data tentang tutupan awan, kelembapan atmosfer, dan suhu permukaan laut, yang merupakan indikator penting untuk memperkirakan curah hujan.
- b. Sistem Pemantauan Aliran Sungai
1. Sensor Hidrologi: Alat seperti *Automatic Water Level Recorder (AWLR)* digunakan untuk memantau perubahan muka air sungai secara *real-time*. Data ini kemudian dianalisis untuk memperkirakan potensi banjir di daerah hilir.
  2. Model Hidrologis: Sistem seperti *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS)* digunakan untuk memodelkan aliran air di sungai, membantu memprediksi daerah yang berisiko terkena banjir atau rawan banjir.
- c. Integrasi Data
- Data dari berbagai sumber, seperti stasiun cuaca, satelit, dan sensor hidrologi, diintegrasikan ke dalam sistem berbasis *Geographic Information System (GIS)*. GIS memungkinkan visualisasi peta risiko banjir dan kekeringan, memberikan gambaran yang jelas kepada pengambil Keputusan (Kundzewicz, 2019).

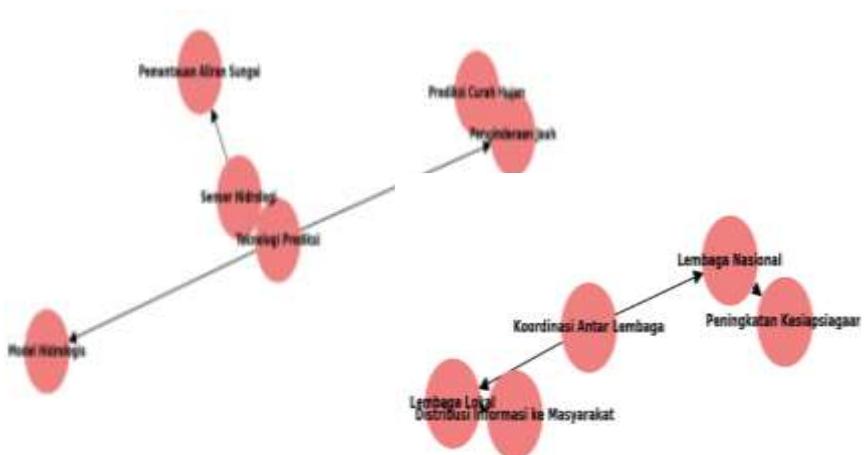
#### 4. Koordinasi Antar Lembaga untuk Kesiapsiagaan

- a. Peran Lembaga Lokal dan Nasional
  1. Lembaga Lokal: Badan-badan lokal seperti BPBD (Badan Penanggulangan Bencana Daerah) di Indonesia bertanggung jawab untuk menyampaikan

- peringatan kepada masyarakat dan mengkoordinasikan evakuasi jika diperlukan.
2. Lembaga Nasional: Lembaga seperti BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika) mengumpulkan dan menganalisis data cuaca serta mendistribusikan informasi ke berbagai pihak.
- b. Mekanisme Koordinasi
1. Protokol Komunikasi: Pengembangan protokol standar untuk berbagi informasi antar lembaga memastikan bahwa semua pihak memiliki akses ke data yang sama. Misalnya, protokol *Common Alerting Protocol (CAP)* digunakan untuk menyampaikan peringatan melalui berbagai media, seperti radio, televisi, dan aplikasi seluler (Waghwala and Agnihotri, 2019).
  2. Simulasi dan Latihan: Latihan berkala antara lembaga pemerintah, komunitas lokal, dan organisasi non-pemerintah membantu memastikan kesiapan dalam menghadapi bencana.
- c. Peran Komunitas Internasional
- Kerjasama antarnegara, seperti melalui platform *Global Framework for Climate Services (GFCS)*, membantu negara-negara membangun kapasitas dalam pengelolaan data cuaca dan pengembangan sistem peringatan dini. Negara-negara berbagi teknologi, data, dan keahlian untuk meningkatkan efektivitas sistem ini.
- d. Manfaat Sistem Peringatan Dini
1. Penyelamatan Nyawa: Informasi yang cepat memungkinkan masyarakat untuk melakukan evakuasi sebelum bencana terjadi.
  2. Pengurangan Kerugian Ekonomi: Langkah antisipasi, seperti memindahkan aset penting dan

- mengamankan infrastruktur, mengurangi dampak finansial.
3. Peningkatan Kesiapsiagaan: Informasi yang terus diperbarui membantu masyarakat dan pemerintah untuk mempersiapkan diri dengan lebih baik.
- e. Tantangan Implementasi
1. Akurasi Prediksi: Meski teknologi terus berkembang, kesalahan prediksi masih dapat terjadi, yang menyebabkan kepercayaan masyarakat menurun.
  2. Keterbatasan Infrastruktur: Di daerah terpencil, akses terhadap teknologi seperti sensor hidrologi dan jaringan komunikasi masih terbatas.
  3. Koordinasi yang Lemah: Kurangnya komunikasi yang efektif antar lembaga dapat menghambat penyampaian informasi ke masyarakat.

### Komponen Sistem Peringatan Dini



**Gambar 9. 4 Kombinasi Pendekatan Mitigasi Risiko**

Sumber: Analisis

#### 4. Manajemen Respons Bencana

Manajemen respons bencana mencakup langkah-langkah untuk meminimalkan dampak langsung dan jangka panjang dari bencana seperti banjir. Dua aspek penting dalam manajemen respons terhadap banjir adalah penanganan korban dan restorasi ekosistem pasca-banjir. Keduanya memerlukan koordinasi, sumber daya yang tepat, dan strategi yang terencana.

- a. Penanganan Korban Banjir
  1. Evakuasi dan Penyelamatan
    - a) Proses Evakuasi: Penanganan korban dimulai dengan evakuasi ke tempat yang aman. Evakuasi yang efektif membutuhkan rencana darurat yang jelas, termasuk jalur evakuasi, tempat pengungsian, dan transportasi darurat.
    - b) Penyelamatan: Tim penyelamat harus dilengkapi dengan teknologi seperti perahu penyelamat, drone untuk survei area banjir, dan sistem komunikasi yang dapat digunakan dalam kondisi ekstrem (Ward *et al.*, 2014).
  2. Penyediaan Kebutuhan Dasar
    - a) Tempat Pengungsian: Pengungsian yang layak harus memiliki akses ke kebutuhan dasar seperti air bersih, makanan, sanitasi, dan tempat tinggal sementara. Hal ini penting untuk mencegah penyebaran penyakit menular seperti diare dan leptospirosis (Organization, 2020).
    - b) Pelayanan Medis: Pelayanan kesehatan darurat harus mencakup penanganan luka fisik, penyakit menular, serta perawatan psikologis untuk korban yang mengalami trauma.

3. Reintegrasi ke Komunitas
  - a) Pemulihan Sosial: Setelah bencana, korban memerlukan bantuan untuk kembali ke kehidupan normal. Ini mencakup dukungan psikososial dan bantuan ekonomi.
  - b) Dukungan Finansial: Banyak korban kehilangan aset akibat banjir. Program bantuan finansial atau asuransi bencana dapat membantu meringankan beban mereka (Siegel, 2019).
- b. Restorasi Ekosistem Pasca-Banjir
  1. Mengatasi Kerusakan Fisik
    - a) Perbaikan Infrastruktur: Infrastruktur yang rusak, seperti jalan, jembatan, dan jaringan listrik, harus diperbaiki dengan prioritas pada pemulihan aksesibilitas dan layanan penting.
    - b) Pembersihan Limbah dan Sedimen: Banjir sering meninggalkan limbah dan sedimen yang dapat mencemari lingkungan. Proses pembersihan harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari kerusakan tambahan (Ravindiran *et al.*, 2023).
  2. Pemulihan Fungsi Ekosistem
    - a) Rehabilitasi Lahan Basah: Lahan basah yang rusak akibat banjir perlu dipulihkan untuk mengembalikan kemampuannya sebagai penyangga alami banjir.
    - b) Restorasi Hutan *Mangrove* dan *Vegetasi*: Vegetasi alami membantu mengurangi risiko banjir di masa depan dengan meningkatkan infiltrasi air dan mencegah erosi (Wada, van Beek and Bierkens, 2012).

3. Pencegahan Degradasi Lingkungan
  - a) Pengelolaan Sungai: Restorasi sungai mencakup pengerukan untuk menghilangkan sedimen dan pembuatan tanggul alami untuk mencegah banjir ulang.
  - b) Pemantauan Lingkungan: Pasca-banjir, penting untuk memantau kualitas air dan tanah untuk memastikan ekosistem pulih tanpa ancaman pencemaran yang serius.
- c. Manfaat Manajemen Respons yang Efektif
  1. Mengurangi Dampak Kesehatan: Penanganan korban yang cepat mencegah penyebaran penyakit dan meminimalkan trauma psikologis.
  2. Meningkatkan Ketahanan Ekosistem: Restorasi ekosistem mempercepat pemulihan lingkungan dan mengurangi risiko bencana di masa depan.
  3. Mendorong Pemulihan Ekonomi: Dengan memperbaiki infrastruktur dan memberikan bantuan ekonomi, masyarakat dapat kembali produktif lebih cepat.
- d. Tantangan dalam Implementasi
  1. Ketersediaan Sumber Daya: Keterbatasan dana dan tenaga kerja dapat menghambat respons bencana.
  2. Koordinasi Antar Lembaga: Kurangnya koordinasi antara lembaga pemerintah, swasta, dan komunitas lokal sering kali memperlambat proses pemulihan.
  3. Ketahanan Infrastruktur: Infrastruktur yang tidak tahan terhadap bencana memperburuk kerusakan dan memperpanjang waktu pemulihan.

## **D. Strategi Manajemen Risiko Kekeringan**

### **1. Konservasi Sumber Daya Air**

Konservasi sumber daya air mencakup langkah-langkah untuk menjaga ketersediaan air secara berkelanjutan, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan peningkatan kebutuhan. Strategi konservasi ini mencakup pembangunan infrastruktur seperti embung, sumur resapan, dan waduk, serta penggunaan teknologi hemat air di sektor pertanian.

#### **Embung, Sumur Resapan, dan Waduk**

##### **a. Embung**

1. **Definisi dan Fungsi:** Embung adalah kolam kecil yang berfungsi untuk menangkap dan menyimpan air hujan. Air yang disimpan dapat digunakan untuk keperluan irigasi, kebutuhan rumah tangga, atau sebagai cadangan selama musim kering.
2. **Keunggulan:** Embung sederhana untuk dibangun dan sangat efektif di wilayah dengan curah hujan musiman yang tinggi. Mereka juga membantu mengurangi limpasan air permukaan yang dapat menyebabkan erosi tanah (Boardman and Vandaele, 2023).

##### **b. Sumur Resapan**

1. **Definisi dan Fungsi:** Sumur resapan dirancang untuk meningkatkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah. Teknologi ini mengisi ulang akuifer, yang merupakan sumber air tanah untuk pertanian, industri, dan kebutuhan rumah tangga.
2. **Manfaat Lingkungan:** Dengan mengurangi limpasan permukaan, sumur resapan membantu mencegah banjir di daerah perkotaan dan mempertahankan

kelembaban tanah di pedesaan(Mansida *et al.*, 2021).

c. Waduk

1. Definisi dan Fungsi: Waduk adalah infrastruktur besar yang digunakan untuk menyimpan air dalam jumlah besar dari sungai atau hujan. Air ini digunakan untuk irigasi, pembangkit listrik tenaga air, dan penyediaan air minum.
2. Efektivitas: Waduk sangat penting untuk mengatasi fluktuasi ketersediaan air akibat perubahan iklim, tetapi pembangunan waduk memerlukan investasi besar dan dapat memengaruhi ekosistem lokal (Natarajan and Kolloikar, 2017).

**2. Teknologi Hemat Air di Sektor Pertanian**

a. Irigasi Tetes

1. Definisi dan Fungsi: Sistem irigasi tetes mengalirkan air langsung ke akar tanaman melalui pipa kecil dengan debit rendah. Ini mengurangi kehilangan air akibat penguapan dan limpasan.
2. Efisiensi: Dibandingkan dengan irigasi tradisional seperti irigasi permukaan, sistem irigasi tetes dapat menghemat hingga 50-70% air dan meningkatkan hasil panen hingga 30% (Wardani *et al.*, 2021)(da Silveira and Mata-Lima, 2020).

b. Irigasi Mikro

1. Definisi dan Fungsi: Irigasi mikro mencakup sprinkler kecil atau sistem pengaliran air yang dapat menutupi area tertentu dengan efisiensi tinggi.

2. Manfaat: Teknologi ini cocok untuk tanaman dengan kebutuhan air moderat hingga tinggi dan sangat berguna di daerah dengan keterbatasan air.
- c. Pemilihan Tanaman yang Hemat Air
1. Praktik Konservasi: Memilih tanaman yang tahan kekeringan atau memerlukan sedikit air, seperti *sorgum* dan *millet*, merupakan langkah penting dalam menghemat air di sektor pertanian.
  2. Dukungan Teknologi: Penggunaan data cuaca dan tanah berbasis teknologi digital membantu petani merencanakan jadwal irigasi yang efisien (Organization, 2021).
- d. Daur Ulang dan Pemanfaatan Air Limbah
1. Pengolahan Air Limbah: Air limbah dari rumah tangga dan industri dapat diolah dan digunakan kembali untuk irigasi pertanian. Teknologi ini penting di wilayah dengan keterbatasan air ekstrem.
  2. Keuntungan: Selain menghemat air bersih, teknologi ini membantu mengurangi polusi air akibat limbah domestik dan *industry* (Siegel, 2019).
- e. Manfaat Konservasi Sumber Daya Air
1. Meningkatkan Ketersediaan Air: Infrastruktur seperti embung, waduk, dan sumur resapan membantu menjaga ketersediaan air selama musim kering.
  2. Mengurangi Risiko Banjir dan Kekeringan: Konservasi air mengurangi dampak fluktuasi hidrologis, termasuk banjir dan kekeringan.

3. Meningkatkan Ketahanan Pangan: Dengan teknologi hemat air di sektor pertanian, hasil panen dapat dipertahankan meskipun air terbatas.
- f. Tantangan dalam Implementasi
1. Keterbatasan Biaya: Teknologi hemat air dan pembangunan infrastruktur seperti waduk membutuhkan investasi awal yang besar.
  2. Kesadaran Masyarakat: Rendahnya pemahaman tentang pentingnya konservasi air sering menjadi hambatan.
  3. Kerusakan Ekosistem: Proyek besar seperti waduk dapat mengganggu keseimbangan ekosistem lokal jika tidak direncanakan dengan baik.

### **3. Adaptasi terhadap Kekeringan**

Adaptasi terhadap kekeringan adalah langkah penting untuk meningkatkan ketahanan masyarakat dan lingkungan dalam menghadapi penurunan ketersediaan air. Pendekatan ini melibatkan diversifikasi tanaman, pengelolaan lahan yang berkelanjutan, serta pemanfaatan teknologi desalinasi dan daur ulang air.

- a. Diversifikasi Tanaman dan Pengelolaan Lahan
1. Diversifikasi Tanaman

Definisi: Diversifikasi tanaman adalah penanaman berbagai jenis tanaman yang memiliki toleransi berbeda terhadap kekurangan air.

Manfaat:

- a) Ketahanan terhadap Kekeringan: Menanam tanaman tahan kekeringan seperti sorgum, millet, atau kacang-

kacangan dapat mengurangi kerugian selama musim kering (UNICEF, 2021).

- b) Keanekaragaman Hayati: Diversifikasi tanaman membantu menjaga keanekaragaman hayati, yang mendukung kesehatan ekosistem.

Contoh Kasus: Di Afrika Sub-Sahara, petani telah beralih ke tanaman yang membutuhkan lebih sedikit air untuk bertahan dari musim kering yang berkepanjangan (Ravindiran *et al.*, 2023).

## 2. Pengelolaan Lahan

- a) Praktik Konservasi: Pengelolaan lahan mencakup teknik seperti:
  - b) Mulsa: Penutupan tanah dengan material organik untuk mengurangi penguapan air.
  - c) Pengolahan Tanah Minimal: Mengurangi gangguan pada tanah untuk mempertahankan kelembapan dan struktur tanah.
  - d) Rotasi Tanaman: Menanam tanaman yang berbeda setiap musim untuk meningkatkan kesehatan tanah.

Manfaat:

- a) Mengurangi erosi tanah.
  - b) Meningkatkan retensi air dalam tanah.
  - c) Mempertahankan kesuburan tanah.
- b. Pemanfaatan Teknologi Desalinasi dan Daur Ulang Air

### 1. Teknologi Desalinasi

Definisi: Desalinasi adalah proses menghilangkan garam dan mineral dari air laut untuk menghasilkan air tawar.

Teknologi Utama:

- a) *Reverse Osmosis (RO)*: Memanfaatkan membran khusus untuk menyaring garam dari air laut.
- b) *Desalinasi Termal*: Menggunakan panas untuk menguapkan air laut, meninggalkan garam, dan mengembunkan uap menjadi air tawar (Huang *et al.*, 2024).

Keunggulan:

- a) Menyediakan sumber air alternatif di wilayah dengan akses terbatas ke air tawar.
- b) Mendukung kebutuhan air untuk rumah tangga, industri, dan pertanian.

Tantangan:

- a) Biaya operasional yang tinggi.
- b) Limbah garam (*brine*) yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.

## 2. Daur Ulang Air

Definisi: Daur ulang air adalah pengolahan air limbah untuk digunakan kembali, baik untuk irigasi, industri, maupun kebutuhan domestik.

Teknologi:

- a) *Filtrasi Mekanis*: Menghilangkan partikel besar dari air limbah.
- b) *Pengolahan Biologis*: Menggunakan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam air limbah.
- c) *Disinfeksi*: Menggunakan *ozon*, *klorin*, atau *ultraviolet* untuk membunuh patogen.

Manfaat:

- a) Mengurangi tekanan pada sumber air tawar.
- b) Menurunkan polusi air dengan memanfaatkan air limbah.
- c) Meningkatkan ketersediaan air untuk sektor pertanian, yang merupakan pengguna utama air global (Nyakundi, Nyadawa and Mwangi, 2022).

Contoh Kasus: Di Singapura, teknologi daur ulang air digunakan untuk menghasilkan air minum berkualitas tinggi melalui program "*NEWater*."

Manfaat Adaptasi terhadap Kekeringan

- a) Ketahanan Pangan: Diversifikasi tanaman membantu petani mengelola risiko panen gagal.
- b) Ketersediaan Air: Teknologi desalinasi dan daur ulang air memastikan pasokan air tetap tersedia, bahkan selama kekeringan.
- c) Sustainability Lingkungan: Pengelolaan lahan berkelanjutan dan penggunaan kembali air mengurangi tekanan pada sumber daya alam.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alfieri, L. *et al.* (2015) 'Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios', *Global Environmental Change*, 35, pp. 199–212.
- Boardman, J. and Vandaele, K. (2023) 'Soil erosion and runoff: The need to rethink mitigation strategies for sustainable agricultural landscapes in western Europe', *Soil Use and Management*, 39(2), pp. 673–685.
- Cook, B. I. *et al.* (2016) 'Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(5), pp. 2060–2074.
- Detrembleur, S. *et al.* (2015) 'Impacts of climate change on future flood damage on the river Meuse, with a distributed uncertainty analysis', *Natural Hazards*, 77, pp. 1533–1549.
- Huang, S. *et al.* (2024) 'Urbanization enhances channel and surface runoff: A quantitative analysis using both physical and empirical models over the Yangtze River basin', *Journal of Hydrology*, 635, p. 131194.
- Jongman, B., Ward, P. J. and Aerts, J. C. J. H. (2012) 'Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes', *Global Environmental Change*, 22(4), pp. 823–835.
- Kelly, M. *et al.* (2023) 'Flood Risk Assessment and Mapping: A Case Study from Australia's Hawkesbury-Nepean Catchment', *Hydrology*, 10(2), p. 26.
- Kikstra, J. S. *et al.* (2022) 'The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures', *Geoscientific Model Development*, 15(24), pp. 9075–9109.

- Kundzewicz, Z. W. (2019) *Changes in flood risk in Europe*. CRC Press.
- Liu, Y., Huang, X. and Yang, H. (2022) 'An integrated approach to investigate the coupling coordination between urbanization and flood disasters in China', *Journal of Cleaner Production*, 375, p. 134191.
- Van Loon, A. F. (2015) 'Hydrological drought explained', *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), pp. 359–392.
- Lucatello, S. and Sánchez, R. (2022) 'Climate Change in North America: Risks, Impacts, and Adaptation. A Reflection Based on the IPCC Report AR6-2022', *Revista mexicana de economía y finanzas*, 17(4).
- Mansida, A. *et al.* (2021) 'Analysis of infiltration and surface runoff using rainfall simulator with variation of rain intensity and vegetation', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 12108.
- Natarajan, P. M. and Kolloikar, S. (2017) 'Urban resilient integrated water management pathways, to achieve sustainable water resources development in Chennai metropolitan city, Tamil Nadu, India', *Water Practice and Technology*, 12(3), pp. 564–575.
- Nyakundi, R., Nyadawa, M. and Mwangi, J. (2022) 'Effect of Recharge and Abstraction on Groundwater Levels', *Civil Engineering Journal*, 8(5), pp. 910–925.
- Organization, W. H. (2020) *WHO guidance for climate-resilient and environmentally sustainable health care facilities*. World Health Organization.
- Organization, W. H. (2021) *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all*. Food & Agriculture Org.
- van der Ploeg, H. P. and Bull, F. C. (2020) 'Invest in physical

- activity to protect and promote health: the 2020 WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour', *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 17(1), p. 145.
- Ravindiran, G. *et al.* (2023) 'A Review of the Status, Effects, Prevention, and Remediation of Groundwater Contamination for Sustainable Environment', *Water*, 15(20), p. 3662.
- Rubinato, M. *et al.* (2019) 'Urban and river flooding: Comparison of flood risk management approaches in the UK and China and an assessment of future knowledge needs', *Water science and engineering*, 12(4), pp. 274–283.
- Şen, Z. (2021) 'Reservoirs for water supply under climate change impact—a review', *Water Resources Management*, 35(11), pp. 3827–3843.
- Shirmohammadi, B. *et al.* (2024) 'How can biomechanical measures incorporate climate change adaptation into disaster risk reduction and ecosystem sustainability?', *Natural Hazards*, pp. 1–14.
- Siegel, F. R. (2019) *Adaptations of coastal cities to global warming, sea level rise, climate change and endemic hazards*. Springer.
- da Silveira, A. P. P. and Mata-Lima, H. (2020) 'Energy audit in water supply systems: a proposal of integrated approach towards energy efficiency', *Water Policy*, 22(6), pp. 1126–1141.
- Singh, A. A. and Singh, A. K. (2021) 'Climatic controls on water resources and its management: challenges and prospects of sustainable development in Indian perspective', *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*, pp. 121–145.
- UNICEF (2021) 'The state of food security and nutrition in the world 2021'.

- Wada, Y., van Beek, L. P. H. and Bierkens, M. F. P. (2012) 'Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment', *Water Resources Research*, 48(6).
- Waghwala, R. K. and Agnihotri, P. G. (2019) 'Flood risk assessment and resilience strategies for flood risk management: A case study of Surat City', *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40, p. 101155.
- Wang, M. et al. (2023) 'Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based on shared socio-economic pathways', *Science of The Total Environment*, 880, p. 163470.
- Ward, P. J. et al. (2014) 'Including climate change projections in probabilistic flood risk assessment', *Journal of Flood Risk Management*, 7(2), pp. 141–151.
- Wardani, A. M. et al. (2021) 'Konservasi Sumber Daya Air Guna Terjaganya Kualitas Serta Entitas Air Baku', in *PISCES: Proceeding of Integrative Science Education Seminar*, pp. 117–126.
- Zhang, Q. *et al.* (2024) 'Coupling coordination analysis and key factors between urbanization and water resources in ecologically fragile areas: a case study of the Yellow River Basin, China', *Environmental Science and Pollution Research*, 31(7), pp. 10818–10837.



# **BAB 10**

## **HIDROLOGI SUNGAI: ALIRAN, DEBIT, DAN KESEIMBANGAN AIR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI**

Oleh Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng

### **A. Definisi dan Konsep Dasar Hidrologi Sungai**

#### **1. Pengertian Hidrologi Sungai dan Pentingnya dalam Siklus Hidrologi**

Hidrologi sungai adalah cabang ilmu yang mempelajari distribusi, pergerakan, dan sifat air di dalam sistem sungai serta pengaruhnya terhadap siklus hidrologi secara keseluruhan. Sungai memainkan peran penting dalam menghubungkan berbagai komponen siklus hidrologi, termasuk presipitasi, evapotranspirasi, infiltrasi, aliran permukaan, dan aliran bawah tanah (Alfieri *et al.*, 2015). Hidrologi sungai tidak hanya berfokus pada proses alami tetapi juga melibatkan aspek interaksi manusia yang memengaruhi dinamika air.

Siklus hidrologi, yang dikenal sebagai siklus air, adalah proses terus-menerus pergerakan air di bumi melalui atmosfer, lautan, tanah, dan biosfer. Dalam siklus ini, sungai berfungsi sebagai jalur utama untuk mengalirkan air hujan dari daratan ke laut. Selain itu, sungai menyediakan habitat untuk berbagai spesies dan sumber daya air yang sangat

penting bagi aktivitas manusia, seperti pertanian, industri, dan kebutuhan domestik (Singh and Singh, 2021).

### **2. Pentingnya Hidrologi Sungai**

- a. **Regulasi Siklus Hidrologi:** Sungai membantu mengatur aliran air dari wilayah tangkapan air (*watershed*) menuju lautan. Mereka menyimpan dan mendistribusikan air secara temporer, yang mendukung berbagai proses hidrologi di tingkat lokal dan regional (Huang *et al.*, 2024).
- b. **Pendukung Ekosistem:** Hidrologi sungai menyediakan air dan nutrisi yang mendukung keanekaragaman hayati, mulai dari mikroorganisme hingga spesies yang lebih besar. Sungai juga menjaga kesuburan tanah di dataran banjir melalui sedimentasi.
- c. **Manfaat Sosial-Ekonomi:** Sungai menjadi sumber daya penting untuk aktivitas manusia, seperti penyediaan air bersih, pembangkit listrik tenaga air, dan pengangkutan. Selain itu, sungai menjadi pusat pariwisata dan rekreasi yang memberikan nilai ekonomi tambahan.
- d. **Mitigasi Risiko Bencana:** Pemahaman yang baik tentang hidrologi sungai membantu dalam mengelola risiko banjir dan kekeringan melalui perencanaan berbasis data. Teknologi prediksi debit sungai dapat digunakan untuk mengurangi dampak bencana (Waghwala and Agnihotri, 2019).

### **3. Hubungan Antara Hidrologi Sungai, Ekosistem, dan Aktivitas Manusia**

Hidrologi sungai memiliki hubungan kompleks dengan ekosistem dan aktivitas manusia. Interaksi ini sering kali

bersifat timbal balik, di mana aktivitas manusia memengaruhi hidrologi sungai, dan perubahan dalam hidrologi sungai berdampak pada ekosistem dan kehidupan manusia.

a. Hidrologi Sungai dan Ekosistem

1. Penyedia Habitat: Sungai menjadi rumah bagi berbagai makhluk hidup, mulai dari fitoplankton hingga mamalia besar. Ekosistem sungai yang sehat mendukung siklus hidup organisme seperti ikan yang bergantung pada kualitas air dan kecepatan aliran tertentu.
2. Keseimbangan Ekosistem: Hidrologi sungai yang stabil memastikan ketersediaan air yang cukup untuk hutan, lahan basah, dan padang rumput yang berada di dekatnya. Gangguan terhadap pola aliran air dapat mengganggu keseimbangan ekosistem ini.
3. Penyedia Nutrisi: Sedimen yang dibawa oleh sungai mengandung nutrisi penting untuk pertumbuhan vegetasi di dataran banjir. Proses sedimentasi ini mendukung ekosistem lahan basah, yang juga bertindak sebagai zona penyangga alami terhadap banjir.

b. Hidrologi Sungai dan Aktivitas Manusia

1. Pemanfaatan Sumber Daya Air: Sungai adalah sumber utama air untuk berbagai keperluan, termasuk irigasi, air minum, dan kebutuhan industri. Namun, eksploitasi berlebihan dapat mengurangi debit air dan mengancam kelestarian ekosistem sungai (Alfieri *et al.*, 2015).
2. Perubahan Tata Guna Lahan: Aktivitas seperti urbanisasi, deforestasi, dan konversi lahan basah menjadi area pertanian memengaruhi pola aliran

sungai. Pengurangan vegetasi di wilayah tangkapan air meningkatkan aliran permukaan, mengurangi infiltrasi, dan memperbesar risiko banjir.

3. Pencemaran: Limbah domestik, industri, dan pertanian yang masuk ke sungai memengaruhi kualitas air. Pencemaran ini tidak hanya berdampak pada ekosistem sungai tetapi juga pada manusia yang bergantung pada air sungai untuk kebutuhan sehari-hari.
4. Infrastruktur Air: Bendungan, waduk, dan kanal yang dibangun untuk memenuhi kebutuhan manusia sering kali mengubah pola aliran alami sungai, menyebabkan dampak negatif pada flora dan fauna setempat (Singh and Singh, 2021).

#### **4. Panduan Manajemen Risiko Berbasis Data dan Kebijakan**

Untuk mengelola hidrologi sungai secara berkelanjutan, pendekatan berbasis data dan kebijakan diperlukan:

- a. Pemantauan dan Analisis Data Hidrologi: Data tentang curah hujan, debit sungai, dan kualitas air harus dikumpulkan secara berkala menggunakan teknologi seperti penginderaan jauh dan sensor otomatis. Data ini penting untuk memprediksi risiko banjir dan kekeringan (Waghwal and Agnihotri, 2019).
- b. Perencanaan Tata Ruang Berbasis Risiko: Pembangunan infrastruktur dan aktivitas manusia harus mempertimbangkan zonasi risiko banjir dan keberlanjutan ekosistem sungai. Area dataran banjir sebaiknya dijadikan ruang terbuka hijau atau lahan konservasi.
- c. Restorasi Ekosistem Sungai: Lahan basah dan vegetasi riparian perlu direhabilitasi untuk meningkatkan

- kemampuan sungai dalam mengatur aliran air dan mendukung keanekaragaman hayati.
- d. Peningkatan Kapasitas Komunitas Lokal: Edukasi masyarakat tentang pentingnya konservasi sungai dapat meningkatkan partisipasi dalam menjaga kebersihan dan fungsi sungai.
  - e. Kolaborasi Antar Sektor: Pemerintah, lembaga akademik, sektor swasta, dan masyarakat harus bekerja sama untuk memastikan pengelolaan sungai yang holistik. Pendekatan ini mencakup kebijakan berbasis bukti dan penerapan teknologi inovatif.

## **B. Aliran Permukaan, Aliran Bawah Tanah, dan Interaksinya**

### **1. Aliran Permukaan**

Aliran permukaan adalah air yang mengalir di atas tanah menuju sungai atau badan air lainnya. Aliran ini biasanya terjadi ketika curah hujan melebihi kapasitas infiltrasi tanah atau ketika tanah sudah jenuh.

Proses Terjadi:

- a. Limpasan Air Hujan: Air hujan yang tidak terserap oleh tanah mengalir di permukaan, membawa sedimen dan nutrisi.
- b. Pengaruh Tata Guna Lahan: Permukaan keras di daerah perkotaan, seperti beton dan aspal, mempercepat aliran permukaan dan meningkatkan risiko banjir (Wang *et al.*, 2023).
- c. Faktor yang Mempengaruhi: Jenis tanah, kemiringan lahan, intensitas hujan, dan vegetasi.

## 2. Aliran Bawah Tanah

Aliran bawah tanah adalah pergerakan air di bawah permukaan tanah melalui lapisan akuifer. Air ini bergerak lambat dibandingkan aliran permukaan.

Proses Terjadi: Infiltrasi dan Perkolasi: Air hujan meresap melalui tanah dan mencapai zona jenuh, di mana air mulai mengalir ke arah gravitasi atau tekanan. Sumber Air Tanah: Aliran bawah tanah menyediakan pasokan air berkelanjutan untuk mata air, sumur, dan sungai selama musim kering (Volpi *et al.*, 2018). Faktor yang Mempengaruhi: Porositas dan permeabilitas tanah, topografi, dan struktur geologi.

## 3. Interaksi Aliran Permukaan dan Aliran Bawah Tanah

Sungai sebagai Sistem Terbuka: Sungai menerima kontribusi dari aliran permukaan (*runoff*) dan aliran bawah tanah (*baseflow*). Keseimbangan Aliran: Selama musim hujan, aliran permukaan mendominasi debit sungai, sedangkan selama musim kering, aliran bawah tanah menjadi penyumbang utama debit Sungai (Kelly *et al.*, 2023). Dampak Perubahan Tata Guna Lahan: Urbanisasi mengurangi infiltrasi, mengubah keseimbangan antara aliran permukaan dan aliran bawah tanah, dan meningkatkan risiko banjir serta kekeringan.

### Peran Sungai dalam Distribusi dan Penyimpanan Air

1. Distribusi Air
  - a. Peran Hidrologis: Sungai mendistribusikan air dari wilayah tangkapan air ke lautan. Mereka berfungsi sebagai jalur utama transportasi air hujan yang tidak diserap oleh tanah.

- b. Koneksi dengan Ekosistem: Sungai mendukung distribusi nutrisi dan sedimen yang dibutuhkan untuk pertumbuhan vegetasi dan produktivitas ekosistem lahan basah.
    - c. Sumber Air Bagi Manusia: Sungai menyediakan air untuk irigasi, kebutuhan rumah tangga, dan industri. Sebagai contoh, Sungai Nil adalah sumber utama air untuk pertanian dan konsumsi di Mesir (Singh and Singh, 2021).
  2. Penyimpanan Air
    - a. Reservoir Alami: Sungai berfungsi sebagai penyimpan sementara air hujan sebelum dilepaskan ke laut. Selama periode debit rendah, sungai mengandalkan aliran bawah tanah untuk mempertahankan alirannya.
    - b. Pengendali Debit: Sungai yang sehat memiliki kemampuan untuk menyerap limpasan air berlebih selama musim hujan dan melepaskannya secara perlahan, mengurangi risiko banjir.
    - c. Fungsi Ekologis: Penyimpanan air dalam sistem sungai mendukung habitat air tawar dan membantu mengatur suhu serta kualitas air untuk mendukung keanekaragaman
  3. Tantangan dalam Distribusi dan Penyimpanan Air
    - a. Perubahan Iklim: Variabilitas curah hujan yang disebabkan oleh perubahan iklim meningkatkan tantangan dalam mengelola distribusi dan penyimpanan air di sistem sungai.
    - b. Pengaruh Aktivitas Manusia: Bendungan dan waduk yang dibangun untuk penyimpanan air sering kali mengganggu pola aliran alami sungai dan berdampak negatif pada ekosistem local (Huang *et al.*, 2024).

## **Panduan Manajemen Risiko Berbasis Data dan Kebijakan**

1. Monitoring dan Pemodelan Hidrologi
  - a. Penginderaan Jauh dan Sensor: Teknologi ini memungkinkan pemantauan debit sungai, aliran permukaan, dan aliran bawah tanah secara *real-time*.
  - b. Pemodelan Hidrologi: Model seperti SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) membantu memprediksi respons sungai terhadap curah hujan dan perubahan penggunaan lahan(Wang *et al.*, 2020).
2. Pengelolaan Tata Guna Lahan
  - a. Konservasi Vegetasi: Menanam kembali hutan di wilayah tangkapan air meningkatkan infiltrasi dan mengurangi aliran permukaan.
  - b. Zona Penyangga Riparian: Area vegetasi di sekitar sungai membantu menyerap limpasan permukaan dan menyaring polutan.
3. Kolaborasi Antar Pemangku Kepentingan
  - a. Pemerintah dan Komunitas: Melibatkan masyarakat lokal dalam perencanaan dan pengelolaan sungai meningkatkan keberhasilan program konservasi.
  - b. Kolaborasi Lintas Negara: Sungai yang melintasi beberapa negara memerlukan kerja sama dalam pengelolaan sumber daya air.

Komponen utama sistem sungai, yaitu aliran permukaan, aliran bawah tanah, dan interaksinya, memainkan peran penting dalam distribusi dan penyimpanan air. Pemahaman mendalam tentang proses hidrologi ini sangat penting untuk mengelola risiko bencana dan memastikan keberlanjutan ekosistem sungai. Pendekatan berbasis data dan kebijakan, yang melibatkan teknologi modern dan partisipasi berbagai pemangku

kepentingan, dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan sungai

### **C. Tujuan Studi Hidrologi Sungai**

Studi hidrologi sungai adalah upaya ilmiah untuk memahami, memprediksi, dan mengelola perilaku aliran air di dalam sistem sungai. Studi ini bertujuan untuk mengelola sumber daya air, memitigasi risiko banjir dan kekeringan, serta memulihkan dan melestarikan ekosistem. Dengan pendekatan berbasis data dan kebijakan, hidrologi sungai membantu meningkatkan keberlanjutan lingkungan dan kualitas hidup manusia

#### **1. Mengelola Sumber Daya Air**

##### **a. Penyediaan Air untuk Kebutuhan Beragam**

1. Kebutuhan Domestik: Sungai menyediakan air untuk kebutuhan rumah tangga seperti air minum, mandi, dan mencuci. Studi hidrologi membantu memetakan potensi ketersediaan air sepanjang tahun.
2. Irigasi Pertanian: Di banyak negara berkembang, seperti India dan Mesir, sungai menjadi sumber utama irigasi. Studi hidrologi diperlukan untuk merancang sistem distribusi air yang efisien (Wada, van Beek and Bierkens, 2012).
- Industri dan Energi: Sungai menjadi sumber energi melalui pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dan mendukung kebutuhan air untuk proses industri

##### **b. Alokasi Air yang Berkeadilan**

Manajemen Konflik: Alokasi air sungai sering kali menjadi sumber konflik antar sektor atau negara. Hidrologi sungai membantu merancang kebijakan berbasis data untuk distribusi air yang adil (Waghwalala and Agnihotri, 2019).

Penyimpanan dan Penggunaan: Dengan mempelajari pola aliran sungai, bendungan dan waduk dapat dirancang untuk mengoptimalkan penyimpanan dan penggunaan air.

c. Konservasi Sumber Daya

Pencegahan Overeksploitasi: Studi hidrologi mendeteksi penurunan debit sungai akibat eksploitasi berlebih, yang dapat mengancam ekosistem dan sumber daya air di masa depan. Efisiensi Penggunaan: Hidrologi sungai mendukung pengembangan teknologi hemat air, seperti irigasi tetes dan sistem pengelolaan air cerdas.

## 2. Mitigasi Risiko Banjir Dan Kekeringan

a. Prediksi Risiko

Analisis Historis: Dengan menggunakan data historis debit sungai, studi hidrologi dapat memprediksi kemungkinan banjir atau kekeringan. Teknologi Pemodelan: Model matematis seperti HEC-RAS dan SWAT digunakan untuk mensimulasikan perilaku sungai selama peristiwa hidrologi ekstrem(Wang *et al.*, 2020).

b. Perencanaan Tata Ruang

Zona Rawan Banjir: Studi hidrologi membantu menetapkan zona rawan banjir untuk mengarahkan pembangunan ke area yang lebih aman. Konservasi Lahan Resapan: Wilayah tangkapan air harus dilestarikan untuk mengurangi aliran permukaan dan meningkatkan infiltrasi, yang membantu mengurangi risiko banjir dan kekeringan.

c. Pembangunan Infrastruktur

Pengendalian Banjir: Hidrologi sungai mendukung desain struktur seperti tanggul, waduk, dan kanal untuk mengelola aliran air selama banjir. Konservasi Air untuk Kekeringan:

Infrastruktur penyimpanan air, seperti embung dan sumur resapan, dirancang berdasarkan data hidrologi untuk mengatasi kekurangan air selama musim kering (Van Loon, 2015).

### **3. Pemulihan dan Konservasi Ekosistem**

#### **a. Pemulihan Ekosistem Sungai**

Mengatasi Kerusakan Akibat Aktivitas Manusia: Pencemaran sungai dan perubahan aliran akibat bendungan dan urbanisasi memerlukan intervensi pemulihan berbasis data hidrologi. Rehabilitasi Habitat: Studi hidrologi mendukung pengembalian ekosistem sungai ke kondisi alami, yang penting untuk mendukung spesies yang bergantung pada habitat air tawar (Şen, 2021).

#### **b. Konservasi Keanekaragaman Hayati**

Pentingnya Aliran Ekologis: Hidrologi sungai memastikan bahwa aliran air minimum tetap ada untuk mendukung ekosistem, bahkan selama musim kering. Peran Sedimen: Studi hidrologi menganalisis pergerakan sedimen, yang penting untuk kesuburan tanah di dataran banjir.

#### **c. Pendekatan Berbasis Alam**

Infrastruktur Hijau: Studi hidrologi mendorong solusi berbasis alam, seperti restorasi lahan basah dan penghijauan riparian, untuk meningkatkan kapasitas resapan air. Manfaat Jangka Panjang: Pendekatan ini tidak hanya membantu mengelola risiko bencana tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan.

#### **4. Panduan Manajemen Risiko Berbasis Data dan Kebijakan**

##### **a. Pemanfaatan Teknologi**

Penginderaan Jauh dan IoT: Teknologi ini digunakan untuk memantau aliran sungai dan kualitas air secara real-time, memberikan data yang penting untuk pengambilan keputusan. Big Data dan AI: Analisis big data memungkinkan prediksi risiko banjir atau kekeringan yang lebih akurat, sementara AI membantu dalam perencanaan respons yang cepat.

##### **b. Kolaborasi Antar Pemangku Kepentingan**

Lintas Sektor: Pemerintah, akademisi, dan masyarakat perlu bekerja sama untuk memastikan keberlanjutan ekosistem sungai. Lintas Negara: Kerja sama antar negara dalam pengelolaan sungai internasional, seperti Sungai Mekong, menjadi penting untuk keberlanjutan regional (Singh and Singh, 2021).

##### **c. Edukasi dan Partisipasi**

Peningkatan Kesadaran: Edukasi masyarakat tentang pentingnya konservasi sungai membantu mendorong partisipasi aktif dalam pelestarian ekosistem. Keterlibatan Lokal: Studi berbasis komunitas meningkatkan keberhasilan program pemulihan ekosistem dan pengelolaan risiko.

Studi hidrologi sungai memainkan peran penting dalam mengelola sumber daya air, memitigasi risiko bencana, dan memulihkan ekosistem. Dengan pendekatan berbasis data dan kolaborasi antar pemangku kepentingan, hidrologi sungai dapat mendukung keberlanjutan lingkungan, ketahanan ekonomi, dan kesejahteraan sosial.

## 5. Jenis Aliran pada Sistem Sungai

Aliran air di sungai memiliki berbagai karakteristik yang dipengaruhi oleh kondisi fisik dan dinamika hidrologi. Secara umum, jenis aliran dapat dibedakan menjadi aliran laminar dan turbulen berdasarkan pola pergerakannya, serta aliran baseflow dan stormflow berdasarkan sumber airnya. Pemahaman jenis-jenis aliran ini penting untuk menganalisis pola hidrologi sungai, mendukung pengelolaan sumber daya air, dan memitigasi risiko bencana

### a. Aliran Laminar

Aliran laminar adalah jenis aliran yang bergerak secara teratur dalam lapisan paralel, tanpa gangguan antara lapisan-lapisan tersebut. Aliran ini biasanya terjadi pada kecepatan rendah dan di saluran yang relatif halus (Van Loon, 2015).

Karakteristik: Pergerakan air terorganisir, dengan partikel air mengikuti jalur yang hampir sejajar. Aliran memiliki viskositas yang dominan dibandingkan dengan gaya inersia.

Contoh: Aliran laminar lebih umum ditemukan di sungai kecil dengan gradien rendah atau di area dengan aliran bawah tanah.

Rumus Kriteria: Ditentukan oleh angka *Reynolds*

### b. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran yang tidak teratur, dengan vorteks (pusaran) yang berkembang secara acak. Aliran ini terjadi pada kecepatan tinggi dan di saluran dengan permukaan kasar.

Karakteristik: Pergerakan air acak dan penuh dengan pusaran. Dominasi gaya inersia dibandingkan viskositas.

Contoh: Aliran turbulen sering terjadi di sungai besar dengan gradien tinggi atau selama musim hujan ketika debit meningkat.

Rumus Kriteria: Ditentukan oleh angka *Reynolds* ( $Re > 4000$   $Re > 4000$ ), menunjukkan aliran turbulen.

## 6. Aliran *Baseflow* (Aliran Dasar) dan *Stormflow* (Hujan)

### a. Aliran *Baseflow*

Aliran *baseflow* adalah komponen debit sungai yang berasal dari kontribusi air tanah. *Baseflow* biasanya menjadi sumber utama aliran selama musim kering.

1. Proses: Air hujan yang meresap ke dalam tanah bergerak perlahan melalui akuifer dan akhirnya keluar ke sungai sebagai *baseflow*.
2. Peran Hidrologis: Memastikan sungai tetap mengalir meskipun tidak ada hujan. Mendukung ekosistem sungai dengan menyediakan pasokan air berkelanjutan.
3. Pengaruh: *Baseflow* sangat dipengaruhi oleh permeabilitas tanah, tutupan vegetasi, dan aktivitas manusia seperti pengambilan air tanah (Waghwal and Agnihotri, 2019).

### b. Aliran *Stormflow*

Aliran *stormflow* adalah aliran air yang terjadi segera setelah hujan, terutama akibat limpasan permukaan.

1. Proses: Ketika hujan intensitas tinggi terjadi, air yang tidak terserap oleh tanah mengalir di permukaan, bergabung ke sungai sebagai *stormflow*.

2. Karakteristik: *Stormflow* memiliki volume dan kecepatan yang tinggi, berkontribusi pada peningkatan risiko banjir. Sumber utama *stormflow* adalah limpasan dari permukaan tanah, termasuk limpasan dari daerah urban dengan permukaan keras seperti jalan dan trotoar.
3. Dampak: Meningkatkan sedimentasi dan polusi di sungai. Menyebabkan fluktuasi debit sungai yang ekstrem selama musim hujan.
4. Interaksi *Baseflow* dan *Stormflow*: *Baseflow* dan *stormflow* berinteraksi untuk membentuk pola debit sungai. *Baseflow* mendominasi debit sungai selama musim kering, sedangkan *stormflow* menjadi komponen utama selama musim hujan.

Analisis kombinasi baseflow dan stormflow menggunakan model seperti Hydrograph Unit Sintetik Nakayasu dapat membantu memprediksi pola aliran sungai dan mengelola risiko banjir serta kekeringan (Huang *et al.*, 2024).

## D. Faktor Pengaruh Aliran

Aliran sungai merupakan hasil dari interaksi berbagai faktor fisik, biologis, dan manusiawi. Komponen seperti kemiringan sungai, jenis tanah, tutupan lahan, curah hujan, perubahan iklim, dan perubahan tata guna lahan memiliki pengaruh signifikan terhadap pola aliran sungai. Pemahaman terhadap faktor-faktor ini penting untuk mengelola sungai secara berkelanjutan dan memitigasi risiko bencana.

## 1. Faktor-Faktor Fisik yang Mempengaruhi Aliran Sungai

### a. Kemiringan Sungai

Pengaruh terhadap Kecepatan dan Energi Aliran: (1) Kemiringan sungai menentukan kecepatan aliran air. Sungai dengan kemiringan tinggi memiliki energi yang besar, menghasilkan aliran turbulen dengan kapasitas erosi yang lebih tinggi, (2) Sebaliknya, sungai dengan kemiringan rendah cenderung memiliki aliran laminar dengan sedimentasi yang lebih tinggi (Theodore and Dupont, 2019).

Dampak: (1) Sungai curam lebih rentan terhadap longsor dan sedimentasi, (2) Sungai datar dapat menyebabkan genangan atau banjir dataran rendah.

### b. Jenis Tanah

Permeabilitas dan Infiltrasi: (1) Tanah berpasir memiliki permeabilitas tinggi yang memungkinkan infiltrasi air lebih besar, mengurangi aliran permukaan, (2) Tanah liat memiliki permeabilitas rendah, meningkatkan limpasan permukaan (Caletka, 2021).

Pengaruh terhadap Pola Aliran: Tanah dengan struktur longgar mendukung *baseflow*, sedangkan tanah padat cenderung meningkatkan *stormflow*.

### c. Tutupan Lahan

Vegetasi dan Hutan: Hutan dan tutupan vegetasi meningkatkan infiltrasi, mengurangi aliran permukaan, dan mengontrol erosi.

Kawasan Perkotaan: Permukaan keras seperti jalan dan bangunan mempercepat aliran permukaan, meningkatkan risiko banjir dan polusi air (Bodrud-Doza *et al.*, 2020).

#### d. Curah Hujan

Intensitas dan Distribusi: Curah hujan intensitas tinggi dapat menyebabkan limpasan permukaan yang besar, sedangkan curah hujan ringan lebih banyak diserap tanah.

Dampak pada Aliran: Pola curah hujan musiman menyebabkan fluktuasi signifikan dalam debit Sungai.

## 2. Dampak Perubahan Iklim dan Penggunaan Lahan terhadap Pola Aliran

### a. Perubahan Iklim

Variabilitas Curah Hujan: Perubahan iklim mengubah pola curah hujan, meningkatkan kejadian cuaca ekstrem seperti banjir bandang dan kekeringan.

Peningkatan Suhu: Suhu yang lebih tinggi mempercepat penguapan, mengurangi ketersediaan air tanah, dan mengganggu siklus *baseflow* (Wada, van Beek and Bierkens, 2012).

Dampak pada Aliran Sungai: Debit sungai meningkat selama hujan ekstrem tetapi menurun signifikan selama musim kering.

### b. Penggunaan Lahan

Urbanisasi: Pembangunan di daerah aliran sungai mengurangi area resapan air, meningkatkan *stormflow*.

Deforestasi: Penebangan hutan mengurangi kapasitas tanah untuk menyerap air, menyebabkan aliran permukaan meningkat.

Konversi Lahan Basah: Lahan basah yang diubah menjadi lahan pertanian atau pemukiman mengurangi kemampuan sungai untuk menyimpan air.

### **3. Implikasi untuk Pengelolaan Sungai**

#### **a. Pengelolaan Berbasis Risiko**

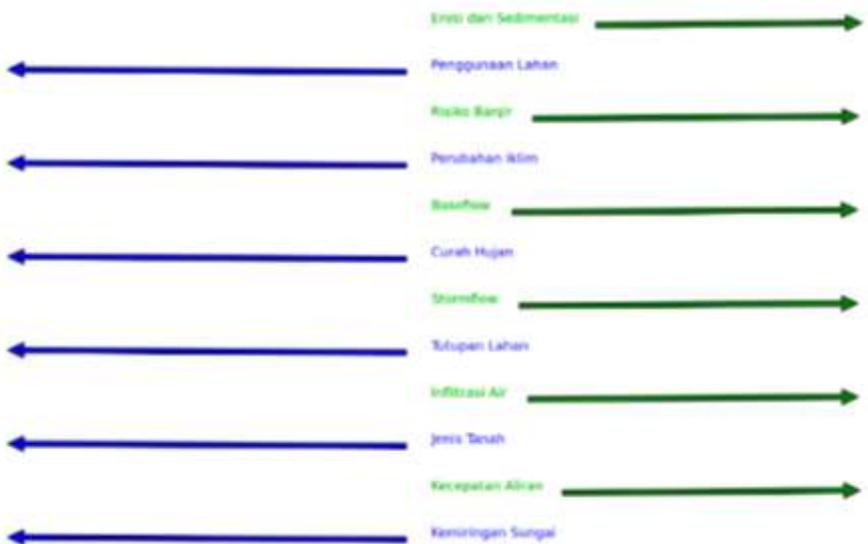
Identifikasi zona rawan banjir dan kekeringan untuk perencanaan tata ruang. Pemantauan aliran menggunakan teknologi seperti penginderaan jauh dan model hidrologi.

#### **b. Rehabilitasi Ekosistem**

Penghijauan kembali di wilayah tangkapan air untuk mengurangi limpasan permukaan. Restorasi lahan basah untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan air.

#### **c. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim**

Infrastruktur hijau seperti sumur resapan dan biopori untuk meningkatkan infiltrasi. Kolaborasi lintas sektor untuk merancang kebijakan adaptif terhadap perubahan pola aliran sungai.



**Gambar 10. 1 Faktor yang mempengaruhi Aliran sungdai dan dampaknya**

## E. Debit Sungai

Debit sungai merupakan salah satu parameter penting dalam hidrologi yang menggambarkan volume air yang melewati penampang tertentu di sungai per satuan waktu. Pemahaman tentang debit sungai, termasuk definisi, hubungan dengan aliran dan volume air, serta satuan dan metode perhitungannya, sangat penting untuk pengelolaan sumber daya air, mitigasi bencana, dan konservasi ekosistem.

### 1. Definisi Debit Sungai

Debit sungai ( $Q$ ) adalah volume air yang mengalir melalui penampang melintang sungai dalam satu satuan waktu. Biasanya dinyatakan dalam meter kubik per detik ( $m^3/s$ ).

Komponen Utama: Kecepatan aliran ( $V$ ): Kecepatan rata-rata air yang mengalir di sungai. Luas penampang ( $A$ ): Luas permukaan

air pada penampang melintang sungai. Persamaan dasar debit Sungai (Kelly *et al.*, 2023):

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

Dimana:

Q = debit sungai ( $m^3/s$ ),

V = kecepatan aliran ( $m/s$ ),

A = luas penampang ( $m^2$ ).

## 2. Hubungan dengan Aliran dan Volume Air

Kecepatan Aliran: Debit sungai adalah hasil gabungan dari kecepatan aliran dan luas penampang. Semakin cepat aliran dan semakin besar penampang, semakin tinggi debit sungai.

Volume Air: Debit sungai juga dapat digunakan untuk menghitung total volume air yang melewati penampang dalam periode waktu tertentu (Vol):

$$Vol = Q \times t_v \quad (2)$$

Di mana:

V = volume total air ( $m^3$ ),

t = waktu (detik).

Hubungan dengan Siklus Hidrologi: Debit sungai menggambarkan aliran air dari curah hujan, limpasan permukaan, infiltrasi, dan aliran bawah tanah.

## 3. Fungsi Debit Sungai dalam Hidrologi

Mengukur ketersediaan air untuk kebutuhan domestik, irigasi, dan industri. Memprediksi banjir dengan memantau debit puncak selama curah hujan tinggi. Menilai dampak perubahan iklim terhadap pola aliran air.

## F. Keseimbangan Air di Daerah Aliran Sungai (DAS)

Keseimbangan air adalah konsep penting dalam hidrologi yang menjelaskan bagaimana air bergerak melalui sistem lingkungan, khususnya di daerah aliran sungai (DAS). Pemahaman tentang komponen keseimbangan air input, output, dan penyimpanan air serta penerapan prinsip konservasi massa dalam hidrologi DAS, adalah dasar untuk pengelolaan air yang berkelanjutan (Bell *et al.*, 2021).

### 1. Komponen Keseimbangan Air

#### a. Input: Curah Hujan

Definisi: Curah hujan adalah sumber utama air dalam sistem hidrologi. Air hujan yang jatuh ke permukaan bumi dapat mengisi DAS melalui berbagai jalur hidrologi. Pola Curah Hujan: Pola curah hujan dipengaruhi oleh iklim, topografi, dan perubahan penggunaan lahan. Intensitas curah hujan yang tinggi dapat menyebabkan limpasan permukaan, sementara hujan ringan memungkinkan infiltrasi. Kontribusi pada DAS: Air dari curah hujan menjadi input utama yang mengisi reservoir alami, aliran permukaan, dan aliran bawah tanah.

#### b. Output: Evapotranspirasi dan Aliran Keluar

##### 1. Evapotranspirasi

Definisi: Gabungan antara evaporasi (penguapan air dari permukaan tanah dan air) dan transpirasi (penguapan air dari tanaman melalui stomata). Faktor Pengaruh: Suhu, kelembapan udara, intensitas sinar matahari, dan jenis vegetasi memengaruhi tingkat evapotranspirasi. Peran dalam Keseimbangan Air: Evapotranspirasi adalah

mekanisme utama penghilangan air dari DAS, mengembalikannya ke atmosfer.

2. Aliran Keluar

Definisi: Air yang meninggalkan DAS melalui sungai atau saluran drainase. Komponen Utama: *Baseflow* (Aliran Dasar): Air bawah tanah yang perlahan mengalir ke sungai. *Stormflow* (Aliran Permukaan): Air hujan yang langsung mengalir ke sungai setelah hujan deras (Caletka, 2021). Variasi: Aliran keluar bervariasi berdasarkan curah hujan, kondisi tanah, dan tutupan lahan.

c. Penyimpanan Air

1. Reservoir Alami

Definisi: Penyimpanan air dalam bentuk alami, seperti danau, lahan basah, dan akuifer. Peran: Menstabilkan debit sungai dengan menyimpan air selama musim hujan dan melepaskannya perlahan selama musim kering.

2. Reservoir Buatan

Definisi: Penyimpanan air buatan manusia, seperti bendungan dan waduk. Fungsi: Menyediakan air untuk irigasi, kebutuhan domestik, dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Manfaat Tambahan: Mengurangi risiko banjir dengan menahan air selama curah hujan tinggi.

**2. Pemanfaatan Model Hidrologi untuk Mengelola Keseimbangan Air**

a. Definisi Model Hidrologi

Model hidrologi adalah alat matematis atau komputasi yang digunakan untuk memprediksi pergerakan dan distribusi air di suatu wilayah. Model ini berguna untuk menganalisis

keseimbangan air dan merancang strategi pengelolaan sumber daya air (Van Loon, 2015) (Pulighe *et al.*, 2021).

b. Jenis Model Hidrologi

1. Model Empiris: Berdasarkan hubungan matematis sederhana antara komponen neraca air. Contoh: Persamaan Rational untuk debit puncak (Olang and Fürst, 2011).
2. Model Konseptual: Menggunakan parameter fisik untuk mensimulasikan interaksi antara berbagai komponen hidrologi (Pulighe *et al.*, 2021) Contoh: Model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) untuk DAS (Volpi *et al.*, 2018).
3. Model Distribusi Fisik: Mempertimbangkan detail spasial seperti topografi, penggunaan lahan, dan jenis tanah (Uniyal, Jha and Verma, 2015). Contoh: HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*).

c. Aplikasi Model Hidrologi

1. Prediksi Neraca Air: Model digunakan untuk memperkirakan distribusi air selama musim hujan dan kering.
2. Mitigasi Banjir dan Kekeringan: Simulasi aliran puncak untuk perencanaan struktur mitigasi seperti bendungan. Prediksi ketersediaan air minimum untuk mengatasi kekeringan (Vogt and Somma, 2013).
3. Pengelolaan DAS: Mengidentifikasi zona kritis yang membutuhkan konservasi atau intervensi manajemen.

4. Perencanaan Infrastruktur: Model membantu dalam desain waduk dan kanal untuk mengoptimalkan penyimpanan dan distribusi air.

### **3. Manfaat dan Tantangan dalam Analisis Keseimbangan Air**

#### **a. Manfaat**

1. Pengelolaan Sumber Daya Air: Neraca air membantu dalam merancang alokasi air yang adil dan efisien.
2. Mitigasi Risiko Bencana: Informasi neraca air digunakan untuk memberikan peringatan dini terhadap banjir dan kekeringan (Solh and van Ginkel, 2014).
3. Konservasi Ekosistem: Menjamin keberlanjutan aliran ekologis yang mendukung kehidupan akuatik.

#### **b. Tantangan**

1. Ketersediaan Data: Keterbatasan data input seperti curah hujan dan evapotranspirasi di wilayah terpencil.
2. Ketidakpastian Iklim: Perubahan pola cuaca membuat prediksi neraca air menjadi lebih kompleks.
3. Kompleksitas Model: Model yang lebih akurat sering kali memerlukan data yang sangat detail dan kapasitas komputasi tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alfieri, L. *et al.* (2015) 'Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios', *Global Environmental Change*, 35, pp. 199–212.
- Bell, S. *et al.* (2021) *Urban blue spaces: Planning and design for water, health and well-being*. Routledge.
- Bodrud-Doza, M. *et al.* (2020) 'Groundwater quality and human health risk assessment for safe and sustainable water supply of Dhaka City dwellers in Bangladesh', *Groundwater for sustainable development*, 10, p. 100374.
- Caletka, M. (2021) 'Surface runoff modelling using the SCS-CN method and delineation of flood extents by a non-hydrodynamic GIS tool'.
- Huang, S. *et al.* (2024) 'Urbanization enhances channel and surface runoff: A quantitative analysis using both physical and empirical models over the Yangtze River basin', *Journal of Hydrology*, 635, p. 131194.
- Kelly, M. *et al.* (2023) 'Flood Risk Assessment and Mapping: A Case Study from Australia's Hawkesbury-Nepean Catchment', *Hydrology*, 10(2), p. 26.
- Van Loon, A. F. (2015) 'Hydrological drought explained', *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), pp. 359–392.
- Olang, L. O. and Fürst, J. (2011) 'Effects of land cover change on flood peak discharges and runoff volumes: model estimates for the Nyando River Basin, Kenya', *Hydrological Processes*, 25(1), pp. 80–89.
- Pulighe, G. *et al.* (2021) 'Modeling climate change impacts on water balance of a Mediterranean watershed using SWAT+', *Hydrology*, 8(4), p. 157.
- Şen, Z. (2021) 'Reservoirs for water supply under climate change impact—a review', *Water Resources Management*, 35(11),

pp. 3827–3843.

- Singh, A. A. and Singh, A. K. (2021) 'Climatic controls on water resources and its management: challenges and prospects of sustainable development in Indian perspective', *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*, pp. 121–145.
- Solh, M. and van Ginkel, M. (2014) 'Drought preparedness and drought mitigation in the developing world' s drylands', *Weather and climate extremes*, 3, pp. 62–66.
- Theodore, L. and Dupont, R. R. (2019) *Water resource management issues: Basic principles and applications*. CRC Press.
- Uniyal, B., Jha, M. K. and Verma, A. K. (2015) 'Assessing climate change impact on water balance components of a river basin using SWAT model', *Water resources management*, 29, pp. 4767–4785.
- Vogt, J. V and Somma, F. (2013) *Drought and drought mitigation in Europe*. Springer Science & Business Media.
- Volpi, E. *et al.* (2018) 'Reservoir effects on flood peak discharge at the catchment scale', *Water Resources Research*, 54(11), pp. 9623–9636.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H. and Bierkens, M. F. P. (2012) 'Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment', *Water Resources Research*, 48(6).
- Waghwal, R. K. and Agnihotri, P. G. (2019) 'Flood risk assessment and resilience strategies for flood risk management: A case study of Surat City', *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40, p. 101155.
- Wang, M. *et al.* (2023) 'Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based on shared socio-economic pathways', *Science of The Total Environment*, 880, p. 163470.
- Wang, Y. *et al.* (2020) 'Effects of rapid urbanization on ecological

functional vulnerability of the land system in Wuhan, China: A flow and stock perspective', *Journal of Cleaner Production*, 248, p. 119284.



# **BAB 11**

## **PENGELOLAAN SUMBER DAYA AIR: KONSERVASI, PENGGUNAAN BERKELANJUTAN, DAN KEBIJAKAN**

Oleh Dr. Ir. Imam Rohani, ST., MT

### **A. Pendahuluan**

Pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan merupakan tantangan global yang semakin mendesak, terutama di tengah perubahan iklim dan pertumbuhan populasi yang pesat. Dalam konteks ini, konservasi air dan penggunaan berkelanjutan menjadi dua pilar utama yang harus diperhatikan dalam kebijakan pengelolaan air. Berbagai studi menunjukkan bahwa pendekatan yang terintegrasi dan berbasis pada indikator yang tepat sangat penting untuk mencapai tujuan tersebut.

Konservasi sumber daya air menjadi salah satu pilar utama dalam pengelolaan yang berkelanjutan. Pendekatan berbasis kearifan lokal, dapat memberikan solusi yang efektif untuk mengelola sumber daya air. Efisiensi penggunaan air dalam irigasi pertanian, penggunaan air hujan sebagai alternatif sumber air juga menjadi salah satu strategi yang dapat diterapkan untuk mengurangi ketergantungan pada air tanah yang berlebihan (Kusumastuti *et al.*, 2022). Pengelolaan alokasi air yang baik, dapat memastikan bahwa kebutuhan air terpenuhi tanpa merusak ekosistem (Ariyanto, 2022). Kebijakan pengelolaan yang berkelanjutan harus dirancang untuk memenuhi kebutuhan masyarakat saat ini dan di masa depan,

dengan tetap mempertahankan keberlanjutan lingkungan (Dewi, Hidayat and Suheri, 2023).

## **B. Konservasi Sumber Daya Air**

Berbagai teknik dan strategi konservasi air telah diterapkan untuk mengatasi masalah kekurangan air, terutama di daerah yang rentan terhadap kekeringan dan erosi. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah pemanfaatan tanaman sebagai bagian dari konservasi vegetatif, yang terbukti efektif dalam meningkatkan retensi air dan mengurangi aliran permukaan.

Selain itu, pembangunan embung sebagai salah satu metode konservasi tanah dan air juga telah diusulkan. Embung berfungsi untuk menampung air hujan, meningkatkan infiltrasi, dan mengurangi aliran permukaan, yang berkontribusi pada peningkatan kualitas hidrologi daerah aliran sungai (DAS). Dengan membangun embung, pemerintah dapat meningkatkan retensi air dan mengurangi dampak negatif dari aliran permukaan yang berlebihan (Rahman, Nursari and Baskoro, 2019).

Teknik konservasi tanah yang berkelanjutan, seperti pembuatan teras, guludan, dan penggunaan mulsa. Teknik-teknik ini tidak hanya berfungsi untuk mengurangi erosi tetapi juga untuk meningkatkan daya serap tanah terhadap air (Heryani *et al.*, 2020).

### **1. Prinsip Dasar Konservasi**

Konservasi sumber daya air merupakan upaya perlindungan dan pelestarian sumber daya air agar dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan manusia saat ini dan generasi mendatang. Berikut adalah prinsip-prinsip dasar

konservasi sumber daya air berdasarkan referensi yang tersedia:

- a. Ketersediaan air bersih sebagai kebutuhan dasar masyarakat. Masyarakat desa umumnya memiliki akses yang kurang terhadap sumber daya air bersih, sehingga perlu adanya upaya peningkatan pengetahuan dan kapasitas masyarakat dalam mengelola sumber daya air (Abidin, Yuwono and Lengkana, 2020).
- b. Konservasi sumber daya alam, termasuk sumber daya air, untuk menjaga ketersediaan dan keberlanjutannya bagi generasi mendatang. Konservasi dapat memberikan perlindungan, pemanfaatan, dan pelestarian sumber daya agar tetap tersedia di masa depan (Pelani, Yulia and Madiung, 2019).
- c. Pemanfaatan kearifan lokal masyarakat dalam strategi konservasi sumber daya alam, seperti adanya pantangan-pantangan yang diterapkan oleh masyarakat desa Batu Berian dalam menjaga kelestarian sumber daya laut (Kabani, 2023).
- d. Pentingnya kepemimpinan dan koordinasi antar pemangku kepentingan dalam mendukung keberhasilan implementasi kebijakan konservasi sumber daya alam. Hal ini penting untuk menghindari konflik pemanfaatan dan pengelolaan sumber daya di dalam kawasan konservasi (Hartono, 2011).
- e. Fungsi kawasan konservasi sebagai penyedia jasa lingkungan, seperti keindahan alam yang dapat menggerakkan industri pariwisata bahari. Hal ini dapat menjadi sumber pendapatan bagi masyarakat sekitar (Muliawan and Firdaus, 2019).
- f. Transformasi dari sistem pengelolaan air perkotaan tradisional menuju sistem yang berkelanjutan, dengan

- mempertimbangkan dampak perubahan iklim, permintaan air yang meningkat, dan praktik pengelolaan air yang tidak efektif (Worku, 2017).
- g. Peran aktif perempuan dalam pengelolaan air rumah tangga secara berkelanjutan, termasuk dalam praktik konservasi air (Ulya, 2019).
  - h. Pemahaman dan praktik pengelolaan sumber daya air yang baik di kalangan petani kecil, untuk menjaga keberlanjutan produksi pertanian di daerah semi-arid (Oremo, Mulwa and Oguge, 2019).
  - i. Inovasi teknologi dan sistem pemantauan air cerdas berbasis Internet of Things untuk mendukung pemanfaatan dan pengelolaan air yang berkelanjutan ('Intelligent Water Monitoring System Based on the Internet of Things', 2023).
  - j. Integrasi pengelolaan sumber daya air (Integrated Water Resources Management) sebagai pendekatan yang sistematis untuk menjamin pembangunan, alokasi, dan pemantauan pemanfaatan sumber daya air secara berkelanjutan (Fulazzaky, 2014).

## **2. Pemanenan Air Hujan**

Pemanenan air hujan (PAH) merupakan salah satu solusi yang dalam menghadapi tantangan ketersediaan air bersih, terutama di daerah perkotaan. PAH dapat menjadi alternatif yang efektif untuk memenuhi kebutuhan air bersih dengan mempertimbangkan biaya dan kemudahan implementasinya (Nadia and Mardyanto, 2016).

Edukasi dan pelatihan mengenai pengelolaan PAH juga merupakan aspek penting dalam keberhasilan implementasinya. Pemanenan air hujan dapat memenuhi kebutuhan air bersih masyarakat dengan cara yang efektif dan

efisien (Nagu, 2022). Pendekatan yang melibatkan edukasi dan partisipasi masyarakat sangat penting dalam memaksimalkan potensi PAH. Sistem pemanenan air hujan (PAH) ditunjukkan pada gambar 11.1.



**Gambar 11. 1 Pemanenan air hujan (PAH)**

(Sumber: Nagu, 2022)

PAH dapat berkontribusi pada pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Penerapan sistem pemanenan air hujan di perumahan dapat membantu mengatasi masalah kelangkaan air bersih dan genangan air selama musim hujan (Ali, Suhardjono and Hendrawan, 2017). PAH dapat menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan penggunaan air tanah.

### **3. Konservasi Air Tanah**

Konservasi air tanah merupakan upaya untuk menjaga dan memelihara ketersediaan air tanah agar dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Beberapa metode yang dapat diterapkan untuk konservasi air tanah antara lain:

- a. Pembuatan sumur resapan: Sumur resapan berfungsi untuk meningkatkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah sehingga dapat memperbaiki kualitas dan kuantitas air tanah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas air sumur menjadi lebih baik setelah dilalui air hujan, dengan penurunan kekeruhan, salinitas, natrium, dan klorida (Azis, Hamzah and Faisal, 2016);(Hambali, Apriyanti and Irvani, 2021).
- b. Pengelolaan air imbuhan: Peningkatan pemanfaatan air tanah dan sarana sanitasi setempat yang tidak dikelola dengan baik dapat berdampak negatif terhadap sistem air tanah, seperti penurunan muka air tanah dan pencemaran. Pengelolaan air imbuhan di permukiman perkotaan dapat dilakukan dengan pendekatan sanitasi (Hastuti and Nuraeni, 2017).
- c. Pemantauan fluktuasi muka air tanah: Fluktuasi muka air tanah merupakan parameter penting dalam pengelolaan sumber daya air tanah yang berkelanjutan. Fluktuasi muka air tanah dapat digunakan untuk estimasi pengisian air tanah (groundwater recharge) (Ardana, 2023).
- d. Pemodelan dan simulasi pengelolaan air tanah: Pengelolaan aliran air tanah merupakan tugas yang menantang karena meningkatnya permintaan air untuk berbagai keperluan. Pemodelan air tanah dengan simulasi dapat menjadi cara yang efektif untuk memberikan masukan bagi keputusan pengelolaan air tanah (Aditya, 2023).
- e. Konservasi tanah dan air di daerah aliran sungai (DAS): Perubahan penggunaan lahan hutan menjadi lahan kering untuk budidaya pertanian tanpa memperhatikan kaidah konservasi tanah dan air dapat menyebabkan degradasi lahan. Upaya konservasi tanah dan air di DAS

dapat dilakukan melalui tindakan seperti penanaman sesuai kontur, pembuatan teras, dan penanaman tanaman penutup tanah (Suhairin, 2020); (Hadi, 2023); (Syaf *et al.*, 2022).

- f. Pemanfaatan air tanah untuk irigasi lahan kering: Potensi dan peluang pemanfaatan air tanah untuk irigasi lahan kering di Nusa Tenggara secara teknis memungkinkan untuk diterapkan dengan mempertimbangkan potensi sumber air tanah, kondisi lahan, jenis tanaman, dan teknologi penyediaan air (Soedireja, 2017).

#### **4. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS)**

Salah satu aspek penting dalam pengelolaan DAS adalah perlunya regulasi yang jelas dan spesifik untuk setiap daerah. Diperlukan peraturan daerah yang dapat mengatasi permasalahan spesifik yang dihadapi, seperti erosi, sedimentasi, dan pencemaran (Lestari, Nugroho and Afandi, 2021).

Daya tampung sungai dan vegetasi untuk memiliki peranan penting dalam mengatasi masalah banjir yang sering terjadi. Pendekatan yang komprehensif dalam merumuskan strategi pengelolaan DAS dengan wilayah pesisir dapat membantu dalam menghadapi bencana dan krisis air (Pristianto, 2023).

Pencemaran air juga menjadi masalah utama dalam pengelolaan DAS. aktivitas masyarakat yang tidak terkelola dengan baik, seperti pembuangan sampah dan limbah domestik ke sungai, telah menyebabkan pencemaran yang signifikan di Sungai (Malawat and Pristianto, 2018). Oleh karena itu, pengelolaan yang terpadu dan partisipatif sangat diperlukan untuk meningkatkan kualitas air dan menjaga keberlanjutan sumber daya air.

Pengelolaan DAS harus mempertimbangkan perubahan iklim dan dampak aktivitas manusia. Perubahan penggunaan lahan dan konstruksi hidrolis dapat mempengaruhi aliran sungai secara signifikan (Zhang *et al.*, 2014).

### **C. Penggunaan Sumber Daya Air secara Berkelanjutan**

Pendekatan *Integrated Water Resources Management* (IWRM) menjadi sangat penting untuk memastikan pengelolaan yang efektif dan berkelanjutan dari sumber daya air. IWRM menekankan pentingnya kolaborasi antar berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, masyarakat, dan sektor swasta, untuk mencapai tujuan pengelolaan air yang berkelanjutan (Stålnacke and Gooch, 2010).

Salah satu aspek dari IWRM adalah transparansi dan akuntabilitas dalam pengelolaan sumber daya air. Pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan juga memerlukan pendekatan berbasis ekosistem yang mempertimbangkan kondisi iklim saat ini dan masa depan. Teknologi juga memainkan peran penting dalam pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Dalam konteks yang lebih luas, tantangan dalam pengelolaan sumber daya air sering kali berkaitan dengan masalah sosial dan ekonomi, penting untuk memahami dimensi sosial dan budaya dalam pengelolaan air, untuk mencapai keberlanjutan (Santos, 2023).

#### **1. Konsep Penggunaan Air Berkelanjutan**

Konsep penggunaan air berkelanjutan merupakan solusi penting untuk mengatasi masalah kekurangan air dan polusi air (Rizki, 2022). Salah satu konsep yang dapat diterapkan adalah sistem akuaponik, yang memanfaatkan efisiensi lahan dan penggunaan air secara optimal (Palinussa, 2023). Dalam sistem

akuaponik, sisa pakan ikan dan hasil metabolisme ikan dimanfaatkan oleh tanaman air untuk pertumbuhannya, sehingga lingkungan budidaya dan kualitas air tetap terjaga (Palinussa, 2023).

Selain itu, konsep pengelolaan air berkelanjutan juga dapat diterapkan melalui pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*). Pemanenan air hujan adalah konsep pengumpulan air hujan yang ditampung dalam reservoir untuk kemudian dimanfaatkan sebagai alternatif sumber air, sehingga dapat mengurangi penggunaan air tanah. Tantangan dalam penerapan konsep ini adalah memperhatikan aspek pemeliharaan, peningkatan efisiensi, dan daya terima masyarakat (Wigati *et al.*, 2022).

Konsep lain yang terkait dengan penggunaan air berkelanjutan adalah konsep pertanian berkelanjutan. Konsep ini menekankan pada penggunaan energi dan air yang lebih sedikit, minimalisasi jejak ekologi, dan rantai pasokan pangan yang lebih pendek (Hadid, 2023). Salah satu bentuk penerapannya adalah melalui pertanian organik, yang dapat mengurangi dampak jangka panjang dari penggunaan pupuk kimia dan pestisida (Yuriansyah *et al.*, 2020).

Selain itu, konsep pengelolaan sumber daya air berbasis kearifan lokal juga dapat diterapkan untuk menjaga keberlanjutan. Salah satu contohnya adalah konsep pengelolaan sumber daya air yang diterapkan oleh suku Sambom di Papua. Tujuannya adalah untuk mengurangi risiko kekurangan air tawar dan dampak negatif dari perubahan iklim (Wambrauw, Sambom and Agnesari, 2023).

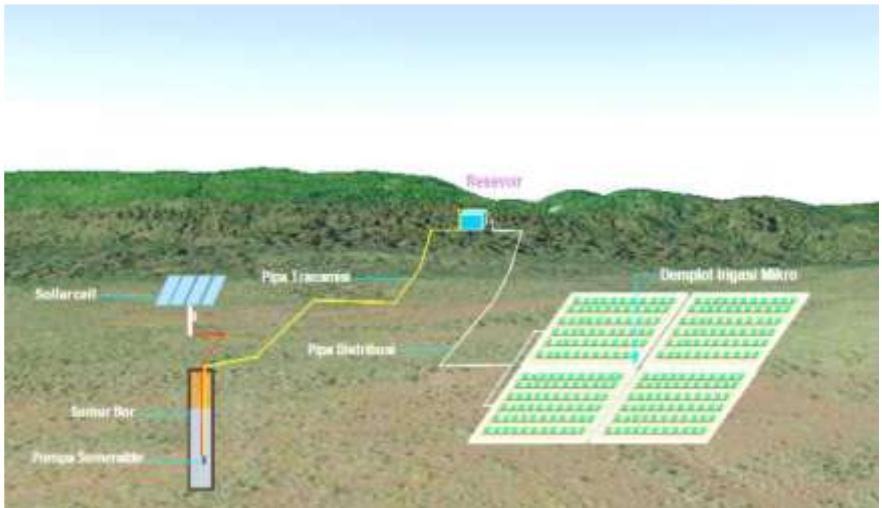
Dalam konteks pembangunan kota, konsep penggunaan air berkelanjutan juga dapat diterapkan melalui penyediaan dan pengelolaan ruang terbuka hijau perkotaan sesuai standar minimal 30%. Hal ini dapat membantu menjaga kelestarian

lingkungan dan ketersediaan elemen vital seperti air dan udara bersih (Widyawati, 2022).

## **2. Teknologi Hemat Air dalam Pertanian**

Sektor pertanian merupakan pengguna air terbesar di Indonesia, mencapai sekitar 80% dari total kebutuhan air. Namun, sistem irigasi konvensional yang saat ini banyak digunakan masih tergolong boros air (Budianto *et al.*, 2020). Oleh karena itu, pengembangan teknologi irigasi hemat air menjadi sangat penting untuk menjamin keberlanjutan produksi pertanian di Indonesia.

Salah satu teknologi irigasi hemat air yang telah banyak dikembangkan adalah irigasi mikro, seperti ditunjukkan pada gambar 11.2. (Rahmandani *et al.*, 2020). Irigasi mikro terbukti efektif dalam menghemat penggunaan air di lahan pertanian, terutama di pulau-pulau kecil dengan ketersediaan air yang terbatas (Rahmandani *et al.*, 2020). Selain itu, sistem irigasi tetes juga dapat menjadi solusi untuk menghemat penggunaan air pada budidaya tanaman hortikultura (Tenggara *et al.*, 2022).



**Gambar 11. 2 Konsep Desain Jaringan Irigasi Mikro dengan Sumber Air Sumur Bor**  
(Rahmandani *et al.*, 2020)

Selain teknologi irigasi, pendekatan sistem tanam juga dapat berkontribusi dalam menghemat penggunaan air. Sistem tanam seperti *System of Rice Intensification* (SRI) dan *Alternate Wetting and Drying* (AWD) terbukti dapat menghemat penggunaan air hingga 68,55%-75,45% dibandingkan dengan sistem konvensional (Fuadi, Purwanto and Tarigan, 2016); (Muiz, Harisuseno and Asmaranto, 2017). Hal ini disebabkan oleh perbedaan pola perawatan tanaman dan pola pemberian air yang diterapkan pada masing-masing sistem (Sofiyuddin *et al.*, 2019).

Selain itu, pemanfaatan kembali air limbah industri pengolahan susu sebagai air irigasi juga dapat menjadi solusi untuk menghemat penggunaan air. Teknologi ini dapat mengurangi beban limpasan air permukaan (*run off*) dan

konservasi kualitas air dalam suatu wilayah pertanian (Suryani and Bahri, 2015).

Untuk mendukung penerapan teknologi irigasi hemat air, beberapa penelitian juga telah mengembangkan sistem kontrol irigasi otomatis berbasis teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *logika fuzzy* (Suryatini, Maimunah and Fauzandi, 2019); (Wiranto, Setiawan and Saptomo, 2014); (Samsugi, Mardiyansyah and Nurkholis, 2020). Sistem ini dapat memantau kebutuhan air tanaman secara real-time dan mengatur pemberian air secara otomatis sesuai kebutuhan, sehingga dapat menghemat penggunaan air (Suryatini, Maimunah and Fauzandi, 2019).

Selain itu, penggunaan pompa air berbahan bakar gas juga terbukti dapat menurunkan biaya operasional irigasi bagi petani. Hal ini dapat menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air irigasi.

### 3. Pemanfaatan Air Abu-abu

Air abu-abu adalah air limbah yang berasal dari kegiatan rumah tangga seperti mencuci, mandi, dan dapur, tetapi tidak termasuk air limbah dari toilet (Meliyana, Rahmawati and Handayani, 2019). Pemanfaatan air abu-abu dapat menjadi solusi untuk mengurangi penggunaan air bersih dan mengurangi beban pada sistem pengolahan air limbah (Wokas, 2024).

Salah satu pemanfaatan air abu-abu adalah untuk menyiram tanaman. Air abu-abu mengandung nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang dapat bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman (Sahari, 2023). Selain itu, air abu-abu juga dapat digunakan untuk mencuci kendaraan, membersihkan lantai, dan menyiram halaman (Yudha, Caesario and Rizki, 2023).

Sebelum dimanfaatkan, air abu-abu perlu diolah terlebih dahulu untuk menghilangkan kontaminan dan menyesuaikan kualitasnya dengan kebutuhan (Ardinata, Herniti and Pranajati, 2022). Proses pengolahan dapat dilakukan dengan metode filtrasi, koagulasi, dan desinfeksi (Aini, 2018). Setelah diolah, air abu-abu dapat digunakan kembali untuk berbagai keperluan non-konsumsi.

Pemanfaatan air abu-abu juga dapat mengurangi beban pada sistem pengolahan air limbah dan mengurangi penggunaan air bersih (Sarfat, 2022). Hal ini dapat memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan, terutama di daerah yang mengalami kelangkaan air (Anisa, Yusuf and Nasir, 2020).

Selain itu, pemanfaatan air abu-abu juga dapat meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya konservasi air dan pengelolaan air limbah yang berkelanjutan (Mardesci, 2018). Dengan demikian, pemanfaatan air abu-abu dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi masalah air di masa depan (Pangestu, 2023).

#### 4. Manajemen Air Perkotaan

Pengelolaan air di perkotaan merupakan tantangan yang kompleks dan multidimensi yang membutuhkan pendekatan holistik dan terintegrasi (Rahayu, Rini and Wardhani, 2022). Beberapa isu utama yang dihadapi dalam manajemen air perkotaan mencakup:

##### a. Peningkatan Permintaan Air

Urbanisasi yang pesat dan pertumbuhan populasi telah meningkatkan permintaan air di perkotaan (Yang, 2012). Hal ini membutuhkan strategi untuk meningkatkan pasokan air, efisiensi penggunaan air, dan konservasi sumber daya air (Lewis, Staddon and Sirunda, 2019).

b. Kualitas Air yang Buruk

Pencemaran air, pembuangan limbah yang tidak memadai, dan degradasi lingkungan telah menyebabkan buruknya kualitas air di perkotaan (Ding *et al.*, 2022). Diperlukan upaya pengendalian sumber pencemaran, pengolahan air limbah, dan restorasi ekosistem air (Ding *et al.*, 2022).

c. Manajemen Drainase dan Banjir

Perubahan iklim dan urbanisasi telah meningkatkan risiko banjir di perkotaan (Bose, Bandyopadhyay and Rawal, 2016). Strategi manajemen air hujan yang terintegrasi, termasuk penggunaan pendekatan berbasis alam, diperlukan untuk mengatasi masalah ini (Bose, Bandyopadhyay and Rawal, 2016).

d. Tata Kelola dan Kelembagaan

Lemahnya koordinasi antar pemangku kepentingan, kurangnya kapasitas kelembagaan, dan kebijakan yang tidak memadai telah menghambat pengelolaan air perkotaan yang efektif (Lewis, Staddon and Sirunda, 2019). Diperlukan perbaikan tata kelola, peningkatan kapasitas, dan harmonisasi kebijakan (Rahayu, Rini and Wardhani, 2022); (Barron *et al.*, 2017).

e. Inovasi Teknologi

Teknologi digital, seperti pemantauan cerdas, sistem peringatan dini, dan optimasi operasional, dapat meningkatkan efisiensi dan ketahanan sistem pengelolaan air perkotaan (Banerjee, Bhaduri and Saraswat, 2022).

Untuk mengatasi tantangan ini, pendekatan yang terintegrasi dan holistik diperlukan, yang mencakup aspek teknis, tata kelola, dan sosial-ekonomi (Rahayu, Rini and Wardhani, 2022); (Barron *et al.*, 2017). Beberapa strategi yang dapat dipertimbangkan antara lain:

- a. Perencanaan dan desain kota yang berwawasan air, dengan mempertimbangkan siklus air perkotaan secara menyeluruh (Barron *et al.*, 2017).
- b. Penerapan praktik pengelolaan air hujan berbasis alam, seperti pengembangan infrastruktur hijau (Bose, Bandyopadhyay and Rawal, 2016).
- c. Peningkatan kapasitas kelembagaan, koordinasi antar pemangku kepentingan, dan harmonisasi kebijakan (Lewis, Staddon and Sirunda, 2019).
- d. Adopsi teknologi digital untuk pemantauan, pengambilan keputusan, dan peningkatan efisiensi operasional, seperti ditunjukkan pada tabel 11.1. (Banerjee, Bhaduri and Saraswat, 2022).

**Tabel 11. 1 Jenis-jenis teknologi digital yang dapat diterapkan dalam manajemen air diperkotaan**

No	<i>Technology</i>	<i>Acronym</i>
1	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>	SCADA
2	<i>Geographical Information System</i>	GIS
3	<i>Computer Models</i>	
4	<i>Decision Support System</i>	DSS
5	<i>Internet of Things</i>	Iot
6	<i>Artificial Intelligence</i>	AI
7	<i>Information and Communication Technology</i>	ICT
8	<i>Big Data Analytics</i>	

(Sumber: Banerjee, Bhaduri and Saraswat, 2022)

5. Pemberdayaan masyarakat dan peningkatan kesadaran publik tentang pengelolaan air yang berkelanjutan (Rahayu, Rini and Wardhani, 2022); (Barron *et al.*, 2017)

Dengan pendekatan yang terintegrasi dan inovatif, kota-kota dapat mengatasi tantangan pengelolaan air dan mewujudkan visi kota yang tangguh dan berkelanjutan (Barron *et al.*, 2017); (Banerjee, Bhaduri and Saraswat, 2022).

## **D. Kebijakan Pengelolaan Sumber Daya Air**

Kebijakan Pengelolaan Sumber Daya Air (PSDA) di Indonesia harus mempertimbangkan berbagai dimensi, termasuk teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Pendekatan yang holistik dan terintegrasi diperlukan untuk memastikan keberlanjutan dan efisiensi dalam pengelolaan sumber daya air.

### **a. Dimensi Teknis**

Dari perspektif teknis, pengelolaan sumber daya air harus melibatkan pemilahan dan pengolahan air yang efisien. teknologi dalam pengurangan sampah dan pengolahan air, peningkatan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sumber daya air (Hamsiah and Nuradji, 2023). Selain itu, sistem pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan harus mencakup dimensi teknis yang memadai, termasuk infrastruktur dan teknologi yang tepat untuk memastikan ketersediaan air yang cukup dan berkualitas (Huda, 2023). Ketersediaan sumber daya manusia yang terampil juga menjadi kunci dalam implementasi kebijakan ini. Contoh analisis keberlanjutan pengelolaan sumber daya air ditunjukkan pada gambar 11.2.

**Tabel 11. 2 Contoh status keberlanjutan pengelolaan sumber daya air**

Status Keberlanjutan Sumber Tirta			
No.	Atribut	Skor Keberlanjutan	Keterangan
1.	Lingkungan	76,00	Baik (Sangat Berkelanjutan)
2.	Sosial	74,06	Cukup (Cukup Berkelanjutan)
3.	Ekonomi	67,15	Cukup (Cukup Berkelanjutan)
Rata – rata		72,40	Cukup Berkelanjutan

Sumber: (Huda, 2023)

#### b. Dimensi Ekonomi

Secara ekonomi, pengelolaan sumber daya air harus mempertimbangkan nilai ekonomi dari air dan dampaknya terhadap perekonomian lokal. Keberlanjutan penyediaan air dipengaruhi oleh aspek ekonomi, termasuk biaya operasional dan investasi dalam infrastruktur (Dewi, Hidayat and Suheri, 2023). Regulasi yang baik dalam pengelolaan sumber daya perikanan dapat meningkatkan efisiensi dan mendukung pertumbuhan ekonomi. Kebijakan yang mendukung investasi dan efisiensi dalam pengelolaan sumber daya air sangat penting untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

#### c. Dimensi Sosial

Aspek sosial dalam PSDA mencakup partisipasi masyarakat dan pengakuan terhadap kearifan lokal. Nilai-nilai kearifan lokal dalam pengelolaan sumber daya air semakin memudar, yang dapat mengakibatkan hilangnya rasa kepemilikan masyarakat terhadap sumber daya tersebut (Hidayati, 2017). Oleh karena itu, penting untuk mengintegrasikan pendekatan partisipatif yang melibatkan masyarakat dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan air. Keberlanjutan pemanfaatan sumber daya alam harus seimbang dengan nilai-nilai sosial dan ekonomi

(Jasmine *et al.*, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa keterlibatan masyarakat dalam pengelolaan sumber daya air dapat meningkatkan efektivitas kebijakan yang diterapkan.

#### d. Dimensi Lingkungan

Dari perspektif lingkungan, pengelolaan sumber daya air harus mempertimbangkan dampak ekologis dari kebijakan yang diambil. Daya dukung lingkungan dalam penyediaan air bersih sangat dipengaruhi oleh kondisi ekosistem dan aktivitas manusia (Santoso, Prasetya and Saputra, 2020). Kebijakan yang diambil harus mempertimbangkan dampak lingkungan jangka panjang dan berupaya untuk menjaga keseimbangan ekosistem.

### 1. Pengendalian Banjir dan Kekeringan

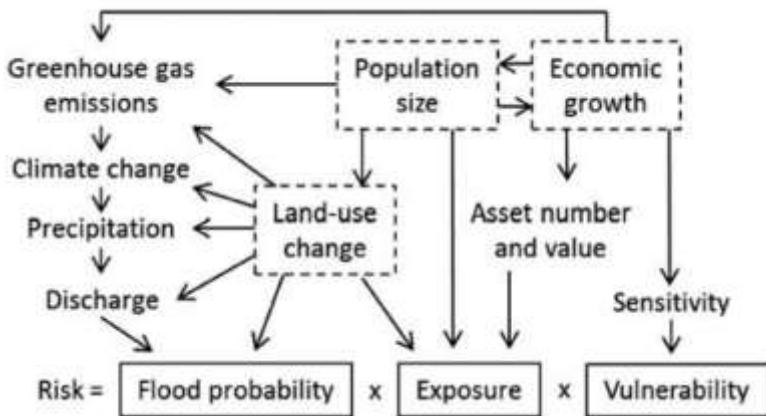
Banjir dan kekeringan merupakan dua fenomena alam yang saling terkait dan dapat berdampak signifikan pada kehidupan manusia. Pengendalian banjir dan kekeringan membutuhkan pendekatan yang komprehensif dan terintegrasi, dengan mempertimbangkan berbagai aspek seperti hidrologi, meteorologi, sosial-ekonomi, dan lingkungan.

#### a. Pengendalian Banjir

Banjir dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti curah hujan yang tinggi, perubahan iklim, dan aktivitas manusia yang tidak ramah lingkungan (Kundzewicz *et al.*, 2013). Untuk mengendalikan banjir, beberapa strategi yang dapat diterapkan antara lain:

1. Manajemen tata guna lahan: Mengatur tata guna lahan untuk mengurangi limpasan permukaan dan meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah (Lottering, Plessis and Donaldson, 2014). Hal ini dapat dilakukan melalui perencanaan tata ruang yang baik, konservasi lahan, dan pengelolaan daerah aliran sungai.

2. Infrastruktur pengendalian banjir: Membangun infrastruktur seperti bendungan, tanggul, dan sistem drainase yang efektif untuk menampung dan mengalirkan air banjir (Kundzewicz *et al.*, 2013). Desain infrastruktur harus mempertimbangkan perubahan iklim dan peningkatan intensitas hujan. Analisis resiko banjir seperti ditunjukkan pada gambar 11.3



**Tabel 11. 3 Analisis resiko banjir**

(Sumber: Kundzewicz *et al.*, 2013)

3. Sistem peringatan dini: Mengembangkan sistem peringatan dini banjir yang akurat dan efektif, dengan memanfaatkan teknologi pemantauan cuaca dan hidrologi (Bruin, Wong-Parodi and Morgan, 2014). Hal ini dapat membantu masyarakat untuk bersiap-siap dan mengurangi dampak banjir.
4. Partisipasi masyarakat: Melibatkan masyarakat dalam perencanaan dan pelaksanaan pengendalian banjir, serta meningkatkan kesadaran masyarakat tentang risiko banjir

dan tindakan mitigasi yang dapat dilakukan (Lottering, Plessis and Donaldson, 2014).

b. Pengendalian Kekeringan

Kekeringan dapat berdampak pada sektor pertanian, ketersediaan air bersih, dan kondisi sosial-ekonomi masyarakat (Udmale *et al.*, 2015); (Aprillya, 2023). Beberapa strategi untuk mengendalikan kekeringan antara lain:

1. Manajemen sumber daya air: Mengoptimalkan penggunaan dan alokasi sumber daya air, termasuk air permukaan dan air tanah, untuk memenuhi kebutuhan air selama periode kekeringan (Nurrahman and Pamungkas, 2014); (Hossain and Bari, 2023); (Hossain, Bari and Miah, 2021).
2. Konservasi air: Menerapkan teknologi dan praktik konservasi air, seperti pemanenan air hujan, daur ulang air, dan peningkatan efisiensi penggunaan air (Lottering, Plessis and Donaldson, 2014); (Liu *et al.*, 2021).
3. Diversifikasi mata pencaharian: Mendorong masyarakat untuk mengembangkan mata pencaharian yang lebih tahan terhadap kekeringan, seperti budidaya tanaman tahan kering atau peternakan (Udmale *et al.*, 2015); (Dewi and Prihestiwi, 2022).
4. Sistem peringatan dini dan mitigasi: Mengembangkan sistem peringatan dini kekeringan yang akurat, serta merencanakan dan melaksanakan tindakan mitigasi yang tepat, seperti penyediaan air bersih, bantuan pangan, dan asuransi pertanian (Islam and Shafiq, 2023); (Waghmare, Panhalkar and Pawar, 2022); (Niaz *et al.*, 2021); (Raha and Gayen, 2020).
5. Penelitian dan pengembangan: Mendorong penelitian dan pengembangan teknologi yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap kekeringan, seperti pengembangan

varietas tanaman tahan kering, teknik pengelolaan air, dan model prediksi kekeringan (Sharma, Kumar and Pathak, 2021); (Kar, Thomas and Singh, 2016); (Vu, Raghavan and Liong, 2015).

## 2. Pengendalian Pencemaran Air

Pencemaran air merupakan masalah yang serius dan membutuhkan penanganan yang komprehensif. Terdapat beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk mengendalikan pencemaran air, antara lain:

- a. Pemantauan Kualitas Air: Pemantauan kualitas air sungai secara berkala sangat penting untuk mengetahui status mutu air dan tingkat pencemaran. Beberapa parameter yang dapat diukur antara lain suhu, kekeruhan, TDS, pH, DO, BOD, COD, dan logam berat. Metode yang dapat digunakan untuk menentukan status mutu air adalah Indeks Pencemaran (IP) (Yohannes, Utomo and Agustina, 2019); (Pangesti, 2020); (Novianti, Zaman and Sarminingsih, 2021).
- b. Identifikasi Sumber Pencemar: Aktivitas antropogenik seperti pembuangan limbah rumah tangga, industri, dan pertanian merupakan sumber utama pencemaran air. Identifikasi sumber pencemar sangat penting untuk menentukan strategi pengendalian yang tepat (Pradana *et al.*, 2019); (Novianti, Zaman and Sarminingsih, 2021).
- c. Pengendalian Pencemaran Berbasis Masyarakat: Keterlibatan masyarakat dalam pengendalian pencemaran air sangat penting. Upaya yang dapat dilakukan antara lain sosialisasi, pelatihan, dan pemberdayaan masyarakat untuk mengelola limbah dengan baik (Haryono, 2023); (Ratnawati, 2022); (Pratama, Kurniawan and Ilhamdy, 2020).

- d. Pengendalian Pencemaran Berbasis Teknologi: Teknologi pengolahan limbah seperti Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) dan fitoremediasi dapat digunakan untuk mengurangi beban pencemaran air (Ratnawati, 2022); (Astuti and Rosemalia, 2022).
- e. Pengendalian Pencemaran Berbasis Regulasi: Pemerintah memiliki peran penting dalam mengendalikan pencemaran air melalui penegakan hukum, pemberian insentif, dan koordinasi antar pemangku kepentingan (Daromes, 2020); (Cikasimi and Jumiati, 2023).
- f. Perhitungan Beban Pencemaran dan Daya Tampung Sungai: Analisis beban pencemaran dan daya tampung sungai dapat digunakan untuk menentukan strategi pengendalian yang tepat (Pohan, Budiyo and Syafrudin, 2017); (Mujib *et al.*, 2022).
- g. Komunikasi dan Pengungkapan Lingkungan: Komunikasi yang efektif dan pengungkapan informasi lingkungan dapat memperkuat upaya pengendalian pencemaran air (Daromes, 2020); (Ahmad, 2023).

### **3. Pengelolaan Air di Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil**

Wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil sering kali menghadapi masalah terkait ketersediaan air bersih, kualitas air, dan pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Beberapa isu utama yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan air di wilayah ini antara lain:

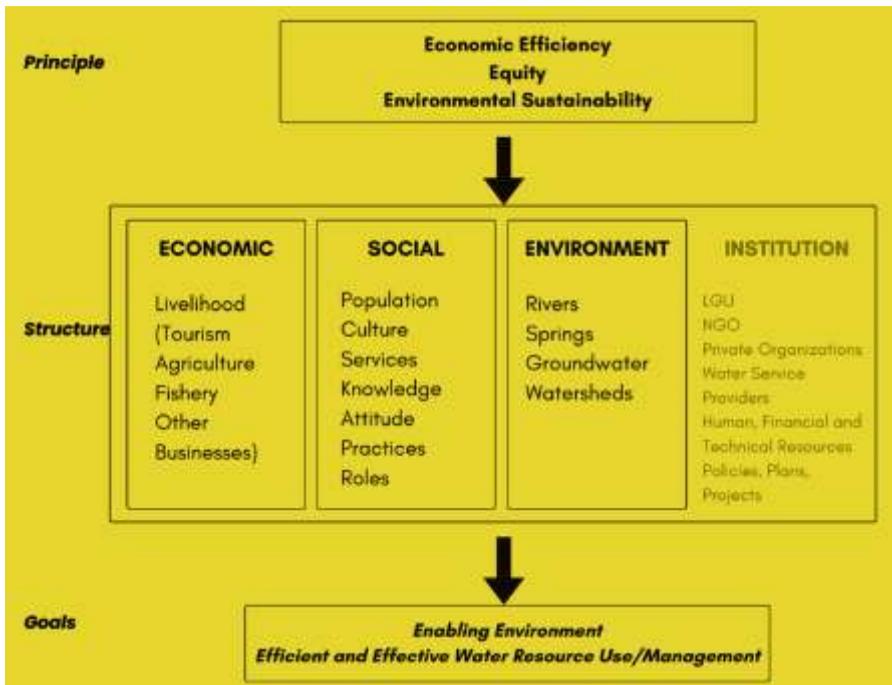
- a. Ketersediaan air tawar yang terbatas

Pulau-pulau kecil umumnya memiliki sumber air tawar yang terbatas, terutama air tanah. Peningkatan kebutuhan air akibat pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi dapat menyebabkan penurunan kualitas dan kuantitas air tanah,

seperti intrusi air laut (Kura *et al.*, 2013);(Bailey, Khalil and Chatikavanij, 2014).

b. Pengelolaan sumber daya air secara terpadu

Pendekatan pengelolaan sumber daya air secara terpadu (IWRM) diperlukan untuk mengintegrasikan berbagai kepentingan dan pemangku kepentingan dalam pengelolaan air di wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil, seperti ditunjukkan pada gambar 11. 4. (Aquino, 2023). Hal ini termasuk pengaturan zonasi, pembatasan pengunjung, dan pengembangan kelembagaan lokal (Haeril and Purnomo, 2019).



**Gambar 11. 3 Kerangka Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu (IWRM) di komunitas pulau-pulau kecil**  
(Sumber: Aquino, 2023)

c. Pemanfaatan teknologi dan praktik tradisional

Teknologi seperti desalinasi air laut dan pemanenan air hujan dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan ketersediaan air tawar (MacDonald *et al.*, 2020). Namun, perlu keseimbangan antara penggunaan teknologi modern dan praktik tradisional konservasi air untuk menjaga keberlanjutan (Kourtis *et al.*, 2019).

d. Pengelolaan habitat pesisir dan laut

Habitat pesisir dan laut seperti terumbu karang, mangrove, dan padang lamun memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan menyediakan sumber daya air (Riofrío-Lazo *et al.*, 2022);(Seitz *et al.*, 2013). Pengelolaan habitat ini perlu diintegrasikan dalam pengelolaan sumber daya air (Safitri *et al.*, 2023).

e. Peran masyarakat lokal dan kearifan lokal

Keterlibatan masyarakat lokal dan pemanfaatan kearifan lokal dalam pengelolaan sumber daya air sangat penting untuk menjamin keberlanjutan (Aquino, 2023). Namun, pengakuan dan penguatan hukum adat masih perlu ditingkatkan (Huda, Saefudin and Syakirin, 2018).

f. Pengaruh perubahan iklim

Perubahan iklim, seperti kenaikan permukaan laut dan peningkatan frekuensi bencana alam, dapat berdampak signifikan terhadap ketersediaan air tawar di pulau-pulau kecil (Terry and Chui, 2012); (Bailey, Khalil and Chatikavanij, 2014). Strategi adaptasi yang tepat, seperti kombinasi desalinasi dan pemanenan air hujan, perlu dikembangkan (Kourtis *et al.*, 2019).

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z., Yuwono, S.B. and Lengkana, D. (2020) 'Pendampingan Peningkatan Pengetahuan Pengelolaan Sumber Daya Air Di Desa Bayasa Jaya, Kecamatan Way Khilau, Kabupaten Pesawaran', *Sakai Sambayan Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 4(1), p. 34. Available at: <https://doi.org/10.23960/jss.v4i1.179>.
- Aditya, M.T. (2023) 'Pengelolaan Dan Optimalisasi Model Sumberdaya Air Tanah Dengan Metode Simulasi (Studi Literatur)', *Jurnal Multidisiplin West Science*, 2(04), pp. 234–246. Available at: <https://doi.org/10.58812/jmws.v2i04.281>.
- Ahmad, A. (2023) 'Merapah Akuntansi Hijau Dalam Harmoni Pemikiran Perintis (Ala "Prilly Latuconsina") Dan Industri Pusaka Lingkungan Jember Menuju Green City', *Jurnal Pendidikan Akuntansi (Jpak)*, 11(3), pp. 299–309. Available at: <https://doi.org/10.26740/jpak.v11n3.p299-309>.
- Aini, N. (2018) 'Penentuan Kadar Kalium Dalam Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit Daerah Tepian Langsung Kutai Timur Dengan Metode Ekstraksi', *Jurnal Integrasi Proses*, 7(1). Available at: <https://doi.org/10.36055/jip.v7i1.2614>.
- Ali, I., Suhardjono, S. and Hendrawan, A.P. (2017) 'Pemanfaatan Sistem Pemanenan Air Hujan (Rainwater Harvesting System) Di Perumahan Bone Biru Indah Permai Kota Watampone Dalam Rangka Penerapan Sistem Drainase Berkelanjutan', *Jurnal Teknik Pengairan*, 008(01), pp. 26–38. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.jtp.2017.008.01.03>.
- Anisa, H.A., Yusuf, M. and Nasir, S. (2020) 'Karakterisasi Batubara Jambi Untuk Peningkatan Kualitas Batubara Melalui Radiasi Gelombang Mikro', *Jurnal Pertambangan*,

- 4(4), pp. 174–179. Available at: <https://doi.org/10.36706/jp.v4i4.575>.
- Aprillya, M.R. (2023) 'Performance Fuzzy Analytical Hierarchy Process to Identify Drought Areas for Disaster Mitigation', *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 12(4), p. 335. Available at: <https://doi.org/10.11591/ijaas.v12.i4.pp335-342>.
- Aquino, J. (2023) 'Experiences, Challenges, and Initiatives on Water Resource Management of a Small Island Community: The Case of Basco, Batanes, Philippines', *Scienggj*, 16(Supplement), pp. 49–57. Available at: <https://doi.org/10.54645/202316supesz-63>.
- Ardana, P.D.H. (2023) 'Kajian Fluktuasi Muka Air Tanah Dan Kualitas Air Tanah Dangkal Berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) Di Kecamatan Denpasar Utara Kota Denpasar', *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro Sipil Dan Teknik Informasi*, 6(1), pp. 21–36. Available at: <https://doi.org/10.38043/telsinas.v6i1.4223>.
- Ardinata, S., Herniti, D. and Pranajati, A. (2022) 'Analisis Proksimat Batubara Menggunakan Standar Astm Pada Pt. Cahaya Bumi Perdana Kabupaten Sawahlunto Provinsi Sumatera Barat', *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 22(1). Available at: <https://doi.org/10.37412/jrl.v22i1.130>.
- Ariyanto, L. (2022) 'Alokasi Air Das Seputih Sebagai Upaya Pengelolaan Sumber Daya Air Berkelanjutan', *JICE (Journal of Infrastructural in Civil Engineering)*, 3(02), p. 11. Available at: <https://doi.org/10.33365/jice.v3i02.2136>.
- Astuti, D. and Rosemalia, I. (2022) 'Review: Penurunan BOD (Biological Oxygen Demand) Limbah Cair Domestik Dengan Fitoremediasi', *Jurnal Unitek*, 15(1), pp. 59–72. Available at: <https://doi.org/10.52072/unitek.v15i1.299>.
- Azis, A., Hamzah, Y. and Faisal, Z. (2016) 'Konservasi Air Tanah Melalui Pembuatan Sumur Resapan Air Hujan Di

- Kelurahan Maradekaya Kota Makassar', *Intek Jurnal Penelitian*, 3(2), pp. 87–90. Available at: <https://doi.org/10.31963/intek.v3i2.57>.
- Bailey, R.T., Khalil, A.F. and Chatikavanij, V. (2014) 'Estimating Current and Future Groundwater Resources of the Maldives', *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 51(1), pp. 112–122. Available at: <https://doi.org/10.1111/jawr.12236>.
- Banerjee, C., Bhaduri, A. and Saraswat, C. (2022) 'Digitalization in Urban Water Governance: Case Study of Bengaluru and Singapore', *Frontiers in Environmental Science*, 10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.816824>.
- Barron, N. *et al.* (2017) 'Towards Water Sensitive Cities in Asia: An Interdisciplinary Journey', *Water Science & Technology*, 76(5), pp. 1150–1157. Available at: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.287>.
- Bose, T., Bandyopadhyay, S. and Rawal, D. (2016) 'Impacts of Climate Variability on Urban Floods—A Case of Ahmedabad', *Environment and Urbanization Asia*, 7(2), pp. 234–242. Available at: <https://doi.org/10.1177/0975425316655649>.
- Bruin, W.B. d., Wong-Parodi, G. and Morgan, M.G. (2014) 'Public Perceptions of Local Flood Risk and the Role of Climate Change', *Environment Systems & Decisions*, 34(4), pp. 591–599. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10669-014-9513-6>.
- Budianto, M.B. *et al.* (2020) 'Model Irigasi Hemat Air Perpaduan System of Rice Intensification (SRI) Dengan Alternate Wetting and Drying (AWD) Pada Padi Sawah', *Jurnal Teknik Pengairan*, 11(2), pp. 128–136. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2020.011.02.06>.
- Cikasimi, W.A. and Jumiati, J. (2023) 'Pelaksanaan Peran Dinas Lingkungan Hidup Kota Payakumbuh Dalam Pengendalian

- Pencemaran Air Sungai Batang Agam Kota Payakumbuh', *Jurnal Manajemen Dan Ilmu Administrasi Publik (Jmiap)*, 5(1), pp. 18–22. Available at: <https://doi.org/10.24036/jmiap.v5i1.594>.
- Daromes, F.E. (2020) 'Peran Mediasi Pengungkapan Lingkungan Pada Pengaruh Kinerja Lingkungan Terhadap Nilai Perusahaan', *Jurnal Akuntansi*, 14(1), pp. 77–101. Available at: <https://doi.org/10.25170/jak.v14i1.1263>.
- Dewi, R.C., Hidayat, Y. and Suheri, A. (2023) 'Status keberlanjutan penyediaan air di Sub DAS Cikeruh, bagian hulu DAS Citarum, Jawa Barat', *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management)*, pp. 268–284. Available at: <https://doi.org/10.36813/jplb.7.3.268-284>.
- Dewi, S.P. and Prihestiwi, R.C. (2022) 'Urban Design Initiatives in Drought-Prone Areas Dealing Increasing Water Demand as Pandemic Covid-19 Impact', *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 9(2–2), pp. 75–86. Available at: <https://doi.org/10.11113/ijbes.v9.n2-2.1027>.
- Ding, Z. *et al.* (2022) 'Systematic Treatment of Water Ecological Environment in Plain River Network City: A Case Study of Jiangyin'. Available at: <https://doi.org/10.3233/atde220390>.
- Fuadi, N.A., Purwanto, M.Y.J. and Tarigan, S.D. (2016) 'Kajian Kebutuhan Air Dan Produktivitas Air Padi Sawah Dengan Sistem Pemberian Air Secara SRI Dan Konvensional Menggunakan Irigasi Pipa', *Jurnal Irigasi*, 11(1), p. 23. Available at: <https://doi.org/10.31028/ji.v11.i1.23-32>.
- Fulazzaky, M.A. (2014) 'Challenges of Integrated Water Resources Management in Indonesia', *Water*, 6(7), pp. 2000–2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/w6072000>.

- Hadi, F. (2023) 'Nilai Erosi Dengan Metode Rusle Dari Pemanfaatan Citra Sentinel-2 Di Wilayah Sungai Pasee Peusangan', *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian Dan Biosistem*, 11(2), pp. 172–187. Available at: <https://doi.org/10.29303/jrpb.v11i2.523>.
- Hadid, A. (2023) 'Adopsi Dan Strategi Pengembangan Pertanian Berkelanjutan Berbasis Pertanian Cerdas Iklim', *Agroland Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 30(3), pp. 275–286. Available at: <https://doi.org/10.22487/agrolandnasional.v30i3.1941>.
- Haeril, H. and Purnomo, E.P. (2019) 'Management of Small-Sustainable Coastal and Island Areas Based on Collaborative Management (Case Study in Bima Regency, West Nusa Tenggara)', *Journal of Local Government Issues*, 2(1), pp. 18–37. Available at: <https://doi.org/10.22219/logos.vol2.no1.18-37>.
- Hambali, R., Apriyanti, Y. and Irvani (2021) 'Pembangunan Prototipe Sumur Resapan Di Kawasan Perumahan Padat Penduduk Kota Pangkalpinang', *Abdi Insani*, 8(2), pp. 181–192. Available at: <https://doi.org/10.29303/abdiinsani.v8i2.406>.
- Hamsiah, H. and Nuradji, S. (2023) 'Edukasi Pemilahan Sampah Berbasis Masyarakat Sebagai Media Reduce Sampah Ke TPA Di Kelurahan Talise', *Jurnal Kolaboratif Sains*, 6(4), pp. 371–379. Available at: <https://doi.org/10.56338/jks.v6i4.3473>.
- Hartono, T.T. (2011) 'Kepemimpinan Untuk Mendukung Keberhasilan Implementasi Kebijakan Konservasi Sumber Daya Alam', *Buletin Ilmiah Marina Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*, 6(1), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.15578/marina.v6i1.5804>.
- Haryono, I. (2023) 'Pengaruh Perilaku Dan Kondisi Permukiman Masyarakat Terhadap Kualitas Air Di Sungai Jangkok, Kota

- Mataram', *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 23(1), pp. 73–83. Available at: <https://doi.org/10.14710/jkli.23.1.73-83>.
- Hastuti, E. and Nuraeni, R. (2017) 'Pendekatan Sanitasi Untuk Pemulihan Kondisi Air Tanah Di Perkotaan Studi Kasus : Kota Cimahi, Jawa Barat', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(1), p. 70. Available at: <https://doi.org/10.29122/jtl.v18i1.1664>.
- Heryani, N. *et al.* (2020) 'Pengelolaan Tanah dan Air Pada Budidaya Padi Gogo dan Palawija di Bawah Tegakan Tanaman Tahunan untuk Meningkatkan Produktivitas Lahan', *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 14(1), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.21082/jsdl.v14n1.2020.1-14>.
- Hidayati, D. (2017) 'Memudarnya Nilai Kearifan Lokal Masyarakat Dalam Pengelolaan Sumber Daya Air', *Jurnal Kependudukan Indonesia*, 11(1), p. 39. Available at: <https://doi.org/10.14203/jki.v11i1.36>.
- Hossain, M.F., Bari, M.N. and Miah, M.S.U. (2021) 'Opportunities and Challenges for Implementing Managed Aquifer Recharge Models in Drought-Prone Barind Tract, Bangladesh', *Applied Water Science*, 11(12). Available at: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01530-1>.
- Hossain, M.I. and Bari, M.N. (2023) 'The Unique Approaches to Water Management for Transforming Bangladesh's Drought-Prone Northwest Region Into a Lush and Granary Landscape'. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.105840>.
- Huda, N., Saefudin, Y. and Syakirin, M.B. (2018) 'Strengthening Indigenous Law to Make a Sustainable Development of the Coastal Area and Small Islands in Indonesia', *SHS Web of Conferences*, 54, p. 4003. Available at: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20185404003>.

- Huda, R. (2023) 'Evaluasi Tingkat Keberlanjutan Sistem Pengelolaan Sumber Daya Air Pada Masyarakat Desa Wringinsongo Tumpang Malang', *Antropocene: Jurnal Penelitian Ilmu Humaniora*, 2(3), pp. 100–109. Available at: <https://doi.org/10.56393/antropocene.v2i3.1692>.
- 'Intelligent Water Monitoring System Based on the Internet of Things' (2023) *Advances in Computer Signals and Systems*, 7(4). Available at: <https://doi.org/10.23977/acss.2023.070403>.
- Islam, M.S. and Shafiq, U.F.B. (2023) 'Impacts of Drought on the Market in the Northwest Region of Bangladesh: Availability, Diversity and Price', *Iubat Review*, 6(1), pp. 47–60. Available at: <https://doi.org/10.3329/iubatr.v6i1.67230>.
- Jasmine, L.F. *et al.* (2023) 'Perilaku Masyarakat Adat Terhadap Kearifan Lokal Dalam Pengelolaan Sumber Daya Alam (Kasus: Masyarakat Adat Baduy)', *Jurnal Sains Komunikasi Dan Pengembangan Masyarakat [Jskpm]*, 7(2), pp. 249–265. Available at: <https://doi.org/10.29244/jskpm.v7i2.951>.
- Kabani, R. (2023) 'Kearifan Lokal Masyarakat Desa Batu Berian Dalam Strategi Konservasi Sumber Daya Laut Sebagai Sumber Belajar Biologi', *Diklabio Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran Biologi*, 7(2), pp. 212–219. Available at: <https://doi.org/10.33369/diklabio.7.2.212-219>.
- Kar, S.K., Thomas, T. and Singh, R. (2016) 'Identification of Drought Prone Areas and Trend Analysis of Rainfall Phenomenon in Dhasan Basin', *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development*, 31(2), p. 9. Available at: <https://doi.org/10.5958/2231-6701.2016.00017.8>.
- Kourtis, I.M. *et al.* (2019) 'Sustainable Water Resources Management in Small Greek Islands Under Changing

- Climate', *Water*, 11(8), p. 1694. Available at: <https://doi.org/10.3390/w11081694>.
- Kundzewicz, Z.W. *et al.* (2013) 'Flood Risk and Climate Change: Global and Regional Perspectives', *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), pp. 1–28. Available at: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>.
- Kura, N.U. *et al.* (2013) 'Evaluation of Factors Influencing the Groundwater Chemistry in a Small Tropical Island of Malaysia', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(5), pp. 1861–1881. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph10051861>.
- Kusumastuti, D.P. *et al.* (2022) 'Panen Hujan Sebagai Sumber Air Alternatif Di Sekolah As Sholihin, Cipondoh, Tangerang', *Abdimas Galuh*, 4(2), p. 651. Available at: <https://doi.org/10.25157/ag.v4i2.7344>.
- Lestari, R., Nugroho, R. and Afandi, S.A. (2021) 'Proses Kebijakan Di Daerah: Formulasi Peraturan Daerah Provinsi Riau Tentang Pengelolaan Daerah Aliran Sungai', *JDP (Jurnal Dinamika Pemerintahan)*, 4(1), pp. 41–51. Available at: <https://doi.org/10.36341/jdp.v4i1.1632>.
- Lewis, E., Staddon, C. and Sirunda, J. (2019) 'Urban Water Management Challenges and Achievements in Windhoek, Namibia', *Water Practice & Technology*, 14(3), pp. 703–713. Available at: <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.055>.
- Liu, X. *et al.* (2021) 'Drought Disaster Risk Management Based on Optimal Allocation of Water Resources', *Natural Hazards*, 108(1), pp. 285–308. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04680-2>.
- Lottering, N., Plessis, D.D. and Donaldson, R. (2014) 'Coping With Drought: The Experience of Water Sensitive Urban Design (WSUD) in the George Municipality', *Water Sa*, 41(1), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.4314/wsa.v41i1.1>.

- MacDonald, M.C. *et al.* (2020) 'Mitigating Drought Impacts in Remote Island Atolls With Traditional Water Usage Behaviors and Modern Technology', *The Science of the Total Environment*, 741, p. 140230. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140230>.
- Malawat, Q. and Pristiano, H. (2018) 'Dampak Aktifitas Masyarakat Kota Sorong Terhadap Tingkat Pencemaran Air Sungai Remu'. Available at: <https://doi.org/10.31227/osf.io/9pcmy>.
- Mardesci, H. (2018) 'Diversifikasi Dan Pengolahan Produk Olahan Berbasis Air Kelapa', *Jurnal Teknologi Pertanian*, 7(2), pp. 45–50. Available at: <https://doi.org/10.32520/jtp.v7i2.349>.
- Meliyana, M., Rahmawati, C. and Handayani, L. (2019) 'Sintesis Silika Dari Abu Sekam Padi Dan Pengaruhnya Terhadap Karakteristik Bata Ringan', *Elkawnie*, 5(2), p. 164. Available at: <https://doi.org/10.22373/ekw.v5i2.5533>.
- Muiz, I.D., Harisuseno, D. and Asmaranto, R. (2017) 'Evaluasi Sistem Pemberian Air Daerah Irigasi Kedung Putri Guna Meningkatkan Intensitas Tanam Padi', *Jurnal Teknik Pengairan*, 8(2), pp. 194–204. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2017.008.02.5>.
- Mujib, M.A. *et al.* (2022) 'Evaluasi Daya Tampung Beban Pencemaran Air Sungai Menggunakan Pendekatan Metode Neraca Massa', *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 21(2), pp. 152–161. Available at: <https://doi.org/10.14710/jkli.21.2.152-161>.
- Muliawan, I. and Firdaus, M. (2019) 'Nilai Ekonomi Ekosistem Terumbu Karang Di Taman Wisata Perairan Kapoposang, Sulawesi Selatan', *Jurnal Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*, 13(2), p. 133. Available at: <https://doi.org/10.15578/jsekp.v13i2.6866>.

- Nadia, F. and Mardiyanto, M.A. (2016) 'Perencanaan Sistem Penampung Air Hujan Sebagai Salah Satu Alternatif Sumber Air Bersih Di Rusunawa Penjaringan Sari Surabaya', *Jurnal Teknik Its*, 5(2). Available at: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.19035>.
- Nagu, N.-. (2022) 'Pemanenan Air Hujan (Rainwater Harvesting) Sebagai Alternatif Penyediaan Air Bersih Di Desa Maregam', *Jurnal Sipil Sains*, 12(2). Available at: <https://doi.org/10.33387/sipilsains.v12i2.5028>.
- Niaz, R. *et al.* (2021) 'Logistic Regression Analysis for Spatial Patterns of Drought Persistence', *Complexity*, 2021(1). Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/3724919>.
- Novianti, N., Zaman, B. and Sarminingsih, A. (2021) 'Kajian Status Mutu Air Dan Identifikasi Sumber Pencemaran Sungai Cidurian Segmen Hilir Menggunakan Metode Indeks Pencemaran (IP)', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), pp. 22–29. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.20.1.22-29>.
- Nurrahman, F.I. and Pamungkas, A. (2014) 'Adaptations to Drought in Lamongan Municipality', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 135, pp. 90–95. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.330>.
- Oremo, F., Mulwa, R. and Ouge, N. (2019) 'Knowledge, Attitude and Practice in Water Resources Management Among Smallholder Irrigators in the Tsavo Sub-Catchment, Kenya', *Resources*, 8(3), p. 130. Available at: <https://doi.org/10.3390/resources8030130>.
- Palinussa, E.M. (2023) 'Desain Sistem Akuaponik Pada Kegiatan Budidaya Ikan Air Tawar Di Desa Waai, Kabupaten Maluku Tengah', *Jurnal Abdi Insani*, 10(4), pp. 2402–2410. Available at: <https://doi.org/10.29303/abdiinsani.v10i4.1169>.

- Pangesti, F.S.P. (2020) 'Status Mutu Air Sungai Cibanten Berdasarkan Indeks Pencemaran Air', *Jurnal Lingkungan Dan Sipil*, 3(1), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.47080/jls.v3i1.887>.
- Pangestu, A.I. (2023) 'Kajian Pengaruh Pemanfaatan Material Limbah Abu Batubara Dari PLTU', *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Satu Bumi*, 4(1). Available at: <https://doi.org/10.31315/psb.v4i1.8877>.
- Pelani, H., Yulia, Y. and Madiong, B. (2019) 'Pendampingan Peningkatan Pengetahuan Konservasi Sumber Daya Ikan Kepada Perempuan Di Kecamatan Mangarabombang Kabupaten Takalar', *Sainsmat Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, 8(2), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.35580/sainsmat82107142019>.
- Pohan, D.A.S., Budiyo, B. and Syafrudin, S. (2017) 'Analisis Kualitas Air Sungai Guna Menentukan Peruntukan Ditinjau Dari Aspek Lingkungan', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 14(2), p. 63. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.14.2.63-71>.
- Pradana, H.A. et al. (2019) 'Identifikasi Kualitas Air Dan Beban Pencemaran Sungai Bedadung Di Intake Instalasi Pengolahan Air PDAM Kabupaten Jember', *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 18(2), p. 135. Available at: <https://doi.org/10.14710/jkli.18.2.135-143>.
- Pratama, G., Kurniawan, I.D. and Ilhamdy, A.F. (2020) 'Pengendalian Pencemaran Limbah Domestik Sebagai Upaya Rehabilitasi Pesisir Di Desa Malangrapat, Kabupaten Bintan', *Prima Journal of Community Empowering and Services*, 4(1), p. 45. Available at: <https://doi.org/10.20961/prima.v4i1.41228>.
- Pristianto, H. (2023) 'Konsep Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Dalam Mengantisipasi Bencana Dan Krisis Air Di Ibu Kota Provinsi Papua Barat Daya', *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, 23(2),

- pp. 290–307. Available at:  
<https://doi.org/10.35965/eco.v23i2.2680>.
- Raha, S. and Gayen, S.K. (2020) 'Simulation of Meteorological Drought Using Exponential Smoothing Models: A Study on Bankura District, West Bengal, India', *Sn Applied Sciences*, 2(5). Available at: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2730-3>.
- Rahayu, P., Rini, E.F. and Wardhani, J.K. (2022) 'Governing the Urban Water Challenges of Surakarta', *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1089(1), p. 12088. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1089/1/012088>.
- Rahman, L.M., Nursari, E. and Baskoro, D.P.T. (2019) 'Pengaruh embung dan kombinasinya dengan teknik konservasi tanah dan air lainnya terhadap koefisien regim aliran dan koefisien aliran tahunan', *Jurnal Geografi Lingkungan Tropik*, 2(2). Available at: <https://doi.org/10.7454/jglitrop.v2i2.45>.
- Rahmandani, D. *et al.* (2020) 'Rancang Bangun Dan Evaluasi Kinerja Irigasi Mikro Di Pulau Haruku, Maluku', *Jurnal Irigasi*, 15(1), pp. 31–44. Available at: <https://doi.org/10.31028/ji.v15.i1.31-44>.
- Ratnawati, B. (2022) 'Sosialisasi Teknik Operasional Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) Di Kabupaten Klaten', *Senyum Boyolali*, 3(1), pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.36596/sb.v3i1.761>.
- Riofrío-Lazo, M. *et al.* (2022) 'Fish Diversity Patterns Along Coastal Habitats of the Southeastern Galapagos Archipelago and Their Relationship With Environmental Variables', *Scientific Reports*, 12(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07601-w>.
- Rizki, R. (2022) 'Pengaruh Efisiensi Energi Dan Air Pada Bangunan Dalam Penerapan Eco-Green', *Sinektika Jurnal*

- Arsitektur*, 19(2), pp. 120–128. Available at: <https://doi.org/10.23917/sinektika.v19i2.17059>.
- Safitri, D.P. *et al.* (2023) 'Sustainable Coastal Management in Supporting Blue Economy: An Indonesian Experience', *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1148(1), p. 12039. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1148/1/012039>.
- Sahari, B.A.S.L. (2023) 'Peningkatan Kualitas Batu Bara Dengan Metode Aglomerasi Dengan Minyak Goreng Bekas Menggunakan Peralatan Microwave', *Distilat Jurnal Teknologi Separasi*, 9(4), pp. 571–579. Available at: <https://doi.org/10.33795/distilat.v9i4.4172>.
- Samsugi, S., Mardiyansyah, Z. and Nurkholis, A. (2020) 'Sistem Pengontrol Irigasi Otomatis Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno', *Jurnal Teknologi Dan Sistem Tertanam*, 1(1), p. 17. Available at: <https://doi.org/10.33365/jtst.v1i1.719>.
- Santos, E. (2023) 'Sustainable Water Management: Understanding the Socioeconomic and Cultural Dimensions', *Sustainability*, 15(17), p. 13074. Available at: <https://doi.org/10.3390/su151713074>.
- Santoso, D.H., Prasetya, J.D. and Saputra, D.R. (2020) 'Analisis Daya Dukung Lingkungan Hidup Berbasis Jasa Ekosistem Penyediaan Air Bersih Di Pulau Karimunjawa', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), pp. 290–296. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.18.2.290-296>.
- Sarfat, M.R. (2022) 'Kualitas Dan Kelas Batubara Di Kecamatan Uluiwoi Kabupaten Kolaka Timur, Provinsi Sulawesi Tenggara', *Jurnal Geosains Dan Teknologi*, 5(3), pp. 151–162. Available at: <https://doi.org/10.14710/jgt.5.3.2022.151-162>.
- Seitz, R.D. *et al.* (2013) 'Ecological Value of Coastal Habitats for Commercially and Ecologically Important Species', *Ices*

- Journal of Marine Science*, 71(3), pp. 648–665. Available at: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst152>.
- Sharma, G., Kumar, C.K. and Pathak, R. (2021) 'Indicator-Based Assessment of Drought in Bhilwara District, Rajasthan', *International Journal of Environment and Climate Change*, pp. 141–153. Available at: <https://doi.org/10.9734/ijecc/2021/v11i830467>.
- Soedireja, H.R. (2017) 'Potensi Dan Upaya Pemanfaatan Air Tanah Untuk Irigasi Lahan Kering Di Nusa Tenggara', *Jurnal Irigasi*, 11(2), p. 67. Available at: <https://doi.org/10.31028/ji.v11.i2.67-80>.
- Sofiyuddin, H.A. *et al.* (2019) 'Evaluasi Koefisien Tanaman Padi Berdasarkan Konsumsi Air Pada Lahan Sawah', *Jurnal Irigasi*, 7(2), pp. 120–131. Available at: <https://doi.org/10.31028/ji.v7.i2.120-131>.
- Stålnacke, P. and Gooch, G. (2010) 'Integrated Water Resources Management', *Irrigation and Drainage Systems*, 24(3–4), pp. 155–159. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10795-010-9106-6>.
- Suhairin, S. (2020) 'Evaluasi Kemampuan Lahan Untuk Arah Penggunaan Lahan Di Daerah Aliran Sungai Maros Sulawesi Selatan', *Jurnal Agrotek Ummat*, 7(1), p. 50. Available at: <https://doi.org/10.31764/agrotek.v7i1.2352>.
- Suryani, Y. and Bahri, S. (2015) 'Pemanfaatan Ulang Efluen Industri Pengolahan Susu Sebagai Air Irigasi Untuk Tanaman Padi', *Jurnal Irigasi*, 10(2), p. 83. Available at: <https://doi.org/10.31028/ji.v10.i2.83-96>.
- Suryatini, F., Maimunah, M. and Fauzandi, F.I. (2019) 'Implementasi Sistem Kontrol Irigasi Tetes Menggunakan Konsep IoT Berbasis Logika Fuzzy Takagi-Sugeno', *Jtera (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, 4(1), p. 115. Available at: <https://doi.org/10.31544/jtera.v4.i1.2019.115-124>.

- Syaf, H. *et al.* (2022) 'Perencanaan Penggunaan Lahan Untuk Mempertahankan Pangan Daerah', *Jurnal Pertanian*, 13(2), pp. 60–77. Available at: <https://doi.org/10.30997/jp.v13i2.6949>.
- Tenggara, F.L. *et al.* (2022) 'Pemanfaatan Metode Irigasi Tetes Sederhana Untuk Budidaya Tanaman Hortikultura Di Desa Ungga, Kecamatan Praya Barat Daya, Kabupaten Lombok Tengah', *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan Ipa*, 5(2), pp. 267–271. Available at: <https://doi.org/10.29303/jpmpi.v5i2.1786>.
- Terry, J.P. and Chui, T.F.M. (2012) 'Evaluating the Fate of Freshwater Lenses on Atoll Islands After Eustatic Sea-Level Rise and Cyclone-Driven Inundation: A Modelling Approach', *Global and Planetary Change*, 88–89, pp. 76–84. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.03.008>.
- Udmale, P. *et al.* (2015) 'How Did the 2012 Drought Affect Rural Livelihoods in Vulnerable Areas? Empirical Evidence From India', *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13, pp. 454–469. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.08.002>.
- Ulya, A.U. (2019) 'Moslem Women's Participation in Sustainable Household Clean Water Management: The Case of Sekaran District', *Sustinere Journal of Environment and Sustainability*, 3(3), pp. 186–198. Available at: <https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v3i3.89>.
- Vu, M.T., Raghavan, V. and Liong, S. (2015) 'Ensemble Climate Projection for Hydro-Meteorological Drought Over a River Basin in Central Highland, Vietnam', *Ksce Journal of Civil Engineering*, 19(2), pp. 427–433. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0506-x>.
- Waghmare, P.T., Panhalkar, S.S. and Pawar, S.D. (2022) 'Drought Assessment of Eastern Satara District of Maharashtra

- Using Rainfall Anomaly Index', *Disaster Advances*, 15(8), pp. 29–34. Available at: <https://doi.org/10.25303/1508da029034>.
- Wambrauw, E.V., Sambom, M. and Agnesari, L. (2023) 'Konservasi Sumber Daya Air Berbasis Kearifan Lokal Kali Eleli Kampung Helaksili Distrik Abenaho Kabupaten Yalimo', *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, pp. 191–202. Available at: <https://doi.org/10.56860/jtsda.v3i2.95>.
- Widyawati, L. (2022) 'Ruang Terbuka Hijau Permukiman Di Jakarta Menuju Pembangunan Kota Berkelanjutan', *Jurnal Kalibrasi - Karya Lintas Ilmu Bidang Rekayasa Arsitektur Sipil Industri*, 5(2), pp. 148–159. Available at: <https://doi.org/10.37721/kalibrasi.v5i2.1080>.
- Wigati, R. *et al.* (2022) 'Implementasi Pemanenan Air Hujan (Rainwater Harvesting) Pada Masa Pandemi Covid-19 Di Kota Serang', *Dharmakarya*, 11(1), p. 78. Available at: <https://doi.org/10.24198/dharmakarya.v11i1.37903>.
- Wiranto, Setiawan, B.I. and Saptomo, S.K. (2014) 'Sistem Kontrol Irigasi Otomatis Nirkabel', *Jurnal Irigasi*, 9(2), p. 108. Available at: <https://doi.org/10.31028/ji.v9.i2.108-114>.
- Wokas, C. (2024) 'PENGARUH PENAMBAHAN SARI KACANG HIJAU (*Vigna Radiata*) TERHADAP KARAKTERISTIK KIMIA DAN ORGANOLEPTIK HARD CANDY AIR KELAPA (*Cocos Nucifera L.*)', *Jurnal Teknologi Pertanian (Agricultural Technology Journal)*, 14(2), pp. 142–151. Available at: <https://doi.org/10.35791/jteta.v14i2.50698>.
- Worku, H. (2017) 'Rethinking Urban Water Management in Addis Ababa in the Face of Climate Change: An Urgent Need to Transform From Traditional to Sustainable System', *Environmental Quality Management*, 27(1), pp. 103–119. Available at: <https://doi.org/10.1002/tqem.21512>.
- Yang, F. (2012) 'Study on Management Mechanism of Water Resources in the Process of Urbanization', *Advanced*

- Materials Research*, 610–613, pp. 2771–2775. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.610-613.2771>.
- Yohannes, B., Utomo, S.W. and Agustina, H. (2019) 'Kajian Kualitas Air Sungai Dan Upaya Pengendalian Pencemaran Air', *Ijeem - Indonesian Journal of Environmental Education and Management*, 4(2), pp. 136–155. Available at: <https://doi.org/10.21009/ijeem.042.05>.
- Yudha, I.G., Caesario, R. and Rizki, A. (2023) 'DINAMIKA POPULASI DAN STATUS PEMANFAATAN TONGKOL ABU-ABU Thunnus Tonggol DI PERAIRAN TELUK SEMANGKA', *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*, 13(2), pp. 187–194. Available at: <https://doi.org/10.24319/jtpk.13.187-194>.
- Yuriansyah, Y. *et al.* (2020) 'Pertanian Organik Sebagai Salah Satu Konsep Pertanian Berkelanjutan', *Pengabdianmu Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), pp. 127–132. Available at: <https://doi.org/10.33084/pengabdianmu.v5i2.1033>.
- Zhang, W.M. *et al.* (2014) 'A GIS and Web-Based Decision Support System for Regional Water Resource Management and Planning', *Applied Mechanics and Materials*, 599–601, pp. 1301–1304. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.599-601.1301>.



# **BAB 12**

## **PERUBAHAN IKLIM DAN DAMPAKNYA TERHADAP HIDROLOGI GLOBAL**

Oleh Fachruddin, S.TP., M.Si

### **A. Pendahuluan**

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan terbesar yang dihadapi umat manusia zaman sekarang, dan dampaknya paling nyata dirasakan melalui krisis air. Perubahan iklim memengaruhi pola cuaca, yang mengakibatkan intensitas dan frekuensi banjir yang meningkat, naiknya permukaan air laut, penyusutan lapisan es di kutub, kebakaran hutan, dan kekeringan yang meluas. Semua fenomena ini memengaruhi ekosistem, kehidupan manusia, dan ketahanan pangan secara global.

Meskipun air sering kali menjadi korban perubahan iklim, ia juga dapat menjadi alat penting dalam melawannya. Pengelolaan air yang berkelanjutan memiliki peran krusial dalam membangun ketahanan masyarakat dan melindungi ekosistem. Dengan cara ini, air dapat menjadi salah satu solusi dalam menghadapi perubahan iklim. Upaya seperti konservasi sumber daya air, perbaikan infrastruktur pengelolaan air, dan pemulihan lahan basah mampu mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan.

Selain membangun ketahanan, pengelolaan air yang baik juga membantu mengurangi emisi karbon. Proses-proses seperti penggunaan air secara efisien dan pengelolaan limbah air dapat

menurunkan konsumsi energi, yang pada akhirnya mengurangi emisi gas rumah kaca. Dengan demikian, air tidak hanya menjadi bagian dari solusi adaptasi, tetapi juga mitigasi perubahan iklim.

Peran setiap individu sangat penting dalam upaya ini. Tindakan sederhana di tingkat individu dan rumah tangga, seperti menghemat air, memperbaiki kebocoran, atau menggunakan teknologi hemat energi, dapat memberikan dampak yang signifikan jika dilakukan secara kolektif. Dalam menghadapi krisis iklim, kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan individu menjadi kunci untuk menciptakan masa depan yang lebih berkelanjutan.

### **B. Perubahan Iklim Di Dunia**

Perubahan iklim dapat dipantau melalui berbagai indikator utama yang mencerminkan kondisi lingkungan global. Salah satu indikator utamanya adalah peningkatan suhu rata-rata global yang menunjukkan tren pemanasan bumi akibat akumulasi gas rumah kaca seperti karbon dioksida ( $CO_2$ ), metana ( $CH_4$ ), dan nitrogen oksida ( $N_2O$ ) di atmosfer. Selain itu, kenaikan permukaan laut akibat mencairnya es di kutub dan ekspansi termal air laut menjadi tanda yang jelas dari dampak pemanasan global. Indikator lain adalah pencairan gletser dan lapisan es di berbagai wilayah dunia yang mengancam keberlanjutan ekosistem kutub. Perubahan pola curah hujan juga menjadi bukti nyata, di mana beberapa wilayah mengalami hujan lebat yang intens, sementara lainnya dilanda kekeringan berkepanjangan. Frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem, seperti badai, gelombang panas, dan banjir, semakin meningkat sebagai akibat langsung dari perubahan iklim. Di sisi lain, pemanasan dan peningkatan keasaman lautan telah merusak ekosistem laut, termasuk terumbu karang. Perubahan ini juga berdampak pada keanekaragaman hayati, menyebabkan

gangguan pada pola migrasi, waktu berbunga tanaman, dan populasi satwa liar. Secara keseluruhan, indikator-indikator ini memberikan gambaran komprehensif mengenai dampak perubahan iklim yang memerlukan perhatian serius dan tindakan global untuk mitigasi serta adaptasi.

## **1. Indikator Perubahan Iklim Benua Asia**

Perubahan iklim di Asia ditandai oleh berbagai indikator yang mencerminkan dampak lingkungan, ekonomi, dan sosial. Bab ini akan membahas indikator-indikator utama perubahan iklim di Asia berdasarkan penelitian terbaru.

### **a. Peningkatan Suhu Rata-rata Tahunan**

Suhu udara permukaan rata-rata tahunan (SAT) di Asia telah mengalami peningkatan yang signifikan, dengan tingkat  $0,13^{\circ}\text{C}$  per dekade dari tahun 1901 hingga 2020. Tahun 2020 diperkirakan menjadi salah satu tahun terpanas sejak awal abad ke-20 (Ren *et al.*, 2023).

### **b. Peningkatan Suhu Ekstrem**

Frekuensi hari-hari dengan suhu di atas persentil ke-90 terus meningkat, terutama di wilayah garis lintang tinggi. Fenomena ini menunjukkan pola suhu ekstrem yang semakin umum terjadi (Dong *et al.*, 2018).

### **c. Anomali Curah Hujan Tahunan**

Curah hujan tahunan di Asia menunjukkan tren peningkatan yang signifikan, dengan rata-rata  $0,52\%$  per dekade dari tahun 1901 hingga 2019. Tren ini lebih mencolok di wilayah lintang tinggi (Ren *et al.*, 2023).

### d. Pergeseran Pola Curah Hujan

Perubahan pola curah hujan di Indonesia telah dianalisis menggunakan data observasi yang dikumpulkan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dalam rentang waktu dari tahun 1981 hingga 2023. Analisis ini memberikan gambaran tentang dinamika iklim di Indonesia, khususnya terkait fluktuasi curah hujan tahunan yang bervariasi secara signifikan di berbagai wilayah.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa laju perubahan curah hujan tahunan secara nasional mencakup variasi yang cukup ekstrem. Peningkatan tertinggi curah hujan mencapai 2784 mm dalam periode 30 tahun, yang menunjukkan adanya wilayah tertentu dengan intensitas curah hujan yang semakin tinggi. Di sisi lain, penurunan curah hujan terendah tercatat sebesar 750 mm dalam periode yang sama, mengindikasikan adanya wilayah dengan pengurangan curah hujan yang signifikan.

Perubahan ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti perubahan iklim global, fenomena cuaca ekstrem, atau aktivitas manusia yang memengaruhi siklus hidrologi, termasuk deforestasi, urbanisasi, dan perubahan penggunaan lahan. Temuan ini penting untuk memahami risiko terkait ketersediaan air, bencana hidrometeorologi seperti banjir atau kekeringan, serta implikasi terhadap sektor pertanian dan kehidupan masyarakat secara keseluruhan.



**Gambar 12. 1 Laju Perubahan Curah Hujan Tahunan**

Sumber : (BMKG, 2024)

Hasil Penelitian yang lain, Asia Selatan diproyeksikan mengalami peningkatan kemungkinan banjir dan periode hari kering berturut-turut. Pergeseran pola curah hujan ini membawa implikasi signifikan terhadap ketahanan pangan dan manajemen sumber daya air (Falak *et al.*, 2022).

e. Peristiwa Cuaca Ekstrem

Kerentanan terhadap Cuaca Ekstrem, Asia Selatan sangat rentan terhadap kejadian cuaca ekstrem seperti banjir, kekeringan, dan siklon. Peristiwa-peristiwa ini diperkirakan akan menjadi lebih sering dan parah akibat perubahan iklim (Ahamed, 2023) (Suppiah, Bathols and Preston, 2006).

Tantangan di Wilayah Asia-Pasifik, Wilayah Asia-Pasifik menghadapi tantangan besar dari siklon tropis, curah hujan ekstrem, dan kekeringan yang sering terjadi. Fenomena ini memperburuk kerentanan yang sudah ada dan memengaruhi kehidupan jutaan orang (Suppiah, Bathols and Preston, 2006).

f. Kualitas Udara dan Emisi

1) Peningkatan Emisi Karbon di Asia Selatan

Penggunaan batubara dan bahan bakar fosil yang terus meningkat di Asia Selatan telah menyebabkan lonjakan emisi karbon dioksida dan nitrogen dioksida. Hal ini berkontribusi tidak hanya terhadap perubahan iklim, tetapi juga pada penurunan kualitas udara (Falak et al., 2022).

2) Dampak pada Lingkungan dan Kesehatan

Kombinasi antara emisi yang tinggi dan perubahan pola cuaca telah meningkatkan risiko kesehatan masyarakat serta memperburuk kondisi lingkungan di banyak wilayah di Asia.

## 2. Indikator Perubahan Iklim Benua Amerika

Perubahan iklim telah menjadi salah satu isu global yang paling mendesak, dan pengamatan indikatornya di Amerika sangat penting untuk memahami dampaknya secara mendalam. Indikator-indikator ini mencakup berbagai faktor lingkungan dan sosial-ekonomi yang membantu menggambarkan kondisi saat ini, dampak yang sedang berlangsung, dan proyeksi masa depan. Dalam bab ini, kita akan membahas indikator utama perubahan iklim yang telah diidentifikasi dalam berbagai literatur penelitian.

a. *Tren* Suhu dan Curah Hujan

Salah satu indikator utama perubahan iklim adalah tren jangka panjang dalam suhu udara rata-rata dan curah hujan. Di wilayah khatulistiwa, *tren* ini dipantau dengan ketat karena memiliki implikasi besar terhadap proyeksi kondisi iklim masa depan, termasuk kenaikan permukaan laut. Sebagai contoh, penelitian Pabón-Caicedo (2022) menunjukkan bahwa perubahan dalam pola suhu dan curah hujan memberikan wawasan penting mengenai dinamika iklim regional.

Di Amerika Serikat, tren suhu permukaan rata-rata dilacak baik secara nasional maupun global. Data ini memberikan pandangan luas tentang pola iklim yang lebih besar dan membantu dalam memahami hubungan antara perubahan iklim lokal dan global (EPA, 2016). Pemantauan konsisten terhadap tren ini juga menjadi dasar untuk memodelkan dampak perubahan iklim di masa depan.

b. Gas Rumah Kaca dan Pola Cuaca

Gas rumah kaca memainkan peran penting dalam perubahan iklim. Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (EPA) telah mengidentifikasi lebih dari 40 indikator yang berkaitan dengan gas rumah kaca, cuaca, dan iklim. Indikator-indikator ini mencakup perubahan dalam komposisi atmosfer, seperti peningkatan konsentrasi karbon dioksida dan metana, serta peristiwa cuaca ekstrem yang semakin sering terjadi (EPA, 2015).

Perubahan pola cuaca, termasuk badai yang lebih sering dan intens, gelombang panas, serta kekeringan, merupakan dampak langsung dari peningkatan gas rumah kaca. Dengan melacak indikator ini, para peneliti dapat memahami bagaimana

perubahan atmosferik memengaruhi stabilitas sistem iklim global.

### c. Siklus dan Manajemen Air

Siklus air adalah elemen kritis yang dipengaruhi oleh perubahan iklim. Indikator seperti pola curah hujan, volume aliran sungai, tutupan salju, dan ketinggian air tanah memberikan informasi penting untuk mengelola sumber daya air secara berkelanjutan. Peters-Lidard et al. (2021) menunjukkan bahwa pemahaman yang lebih baik tentang indikator ini dapat membantu mengurangi dampak terhadap ketersediaan dan kualitas air.

Di Amerika, perubahan pola curah hujan telah menyebabkan tantangan dalam manajemen air. Beberapa wilayah mengalami peningkatan curah hujan yang ekstrem, sementara yang lain menghadapi kekeringan berkepanjangan. Selain itu, penurunan tutupan salju di pegunungan telah mengurangi pasokan air yang biasanya tersedia selama musim semi dan musim panas.

### d. Ekosistem dan Dampak Masyarakat

Perubahan iklim tidak hanya memengaruhi lingkungan fisik, tetapi juga memiliki dampak yang signifikan terhadap ekosistem dan masyarakat. Indikator yang berkaitan dengan ekosistem mencakup perubahan keanekaragaman hayati, hilangnya habitat, dan perubahan dalam siklus hidup spesies tertentu. Kehilangan habitat akibat kenaikan suhu dan pengasaman laut telah menyebabkan ancaman besar terhadap spesies endemik di beberapa wilayah Amerika (EPA, 2015).

Selain itu, dampak terhadap kesehatan manusia juga menjadi perhatian utama. Peristiwa cuaca ekstrem, seperti gelombang panas dan banjir, meningkatkan risiko penyakit yang ditularkan melalui air dan vektor. Peningkatan kualitas dan

akses data mengenai dampak ini diperlukan untuk menginformasikan kebijakan kesehatan masyarakat yang lebih efektif.

e. Tantangan dalam Pelacakan dan Analisis

Meskipun indikator-indikator ini memberikan pandangan yang komprehensif tentang dampak perubahan iklim, masih terdapat tantangan signifikan dalam melacak perubahan ini secara sistematis. Salah satu tantangan utama adalah kurangnya baseline data yang memadai untuk perbandingan. Hal ini menghambat kemampuan para peneliti untuk memahami tren jangka panjang dan dampak kumulatif dari perubahan iklim.

Kenney dan Janetos (2020) menekankan perlunya peningkatan pengumpulan dan analisis data untuk mengisi kesenjangan ini. Upaya ini mencakup penggunaan teknologi canggih, seperti sensor satelit dan model iklim berbasis kecerdasan buatan, yang dapat memberikan informasi yang lebih akurat dan real-time.

### **3. Indikator Perubahan Iklim di Eropa**

Perubahan iklim di Eropa juga diamati melalui berbagai indikator yang mencerminkan tren signifikan dalam suhu, curah hujan, dan kekeringan. Indikator-indikator ini memberikan gambaran regional yang penting untuk mendukung strategi mitigasi dan adaptasi.

a. Tren Suhu di Eropa

Peningkatan suhu yang mencolok telah tercatat di seluruh Eropa, dengan kenaikan terbesar di Eropa Tenggara. Misalnya, pada bulan Agustus, hari pertumbuhan derajat meningkat sebesar  $0,93\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Doshi *et al.*, 2023). Tren ini menunjukkan bahwa Eropa Tenggara menjadi wilayah yang sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim.

Proyeksi iklim menunjukkan bahwa wilayah Eropa Timur dan Utara akan mengalami peningkatan suhu paling signifikan di bawah skenario gas rumah kaca yang tinggi (RCP 8.5) (Kjellström *et al.*, 2018; Moghim, Teuling and Uijlenhoet, 2022). Hal ini menyoroti kebutuhan mendesak untuk mengurangi emisi gas rumah kaca guna memitigasi dampaknya.

### b. Perubahan Curah Hujan di Eropa

Pola curah hujan di Eropa menjadi semakin bervariasi, dengan peningkatan intensitas ekstrem yang diproyeksikan terjadi di wilayah utara (Moghim, Teuling and Uijlenhoet, 2022). Sementara itu, pergeseran distribusi curah hujan menunjukkan peningkatan di wilayah utara dan penurunan di selatan, menggambarkan migrasi pola musiman yang signifikan (Kjellström *et al.*, 2018).

Pola ini memiliki dampak besar terhadap sumber daya air dan ekosistem di berbagai wilayah. Misalnya, peningkatan curah hujan ekstrem di Eropa Utara dapat meningkatkan risiko banjir, sedangkan penurunan curah hujan di Eropa Selatan berpotensi memperburuk kekeringan dan kelangkaan air.

### c. Ariditas dan Kelembaban di Eropa

Analisis indeks kekeringan mengungkapkan bahwa wilayah Eropa Selatan menjadi semakin kering, sementara Eropa Utara tetap lembap. Perubahan ini terlihat jelas dalam indeks ariditas, yang menunjukkan variasi hingga 8% untuk periode masa depan (Nistor, 2021). Tren ini memengaruhi berbagai sektor, termasuk pertanian, kehutanan, dan pengelolaan sumber daya air.

Distribusi kelas kering di Eropa juga mengalami pergeseran signifikan. Wilayah yang sebelumnya lembap mulai menunjukkan tanda-tanda kekeringan kronis, terutama di bawah skenario perubahan iklim yang lebih ekstrem. Kondisi ini

menimbulkan risiko besar terhadap sumber daya alam dan pengelolaan lanskap (Nistor, 2021). Selain itu, dampak ini dapat memperburuk ketegangan sosial dan ekonomi di daerah yang bergantung pada sumber daya tersebut.

#### **4. Indikator Perubahan Iklim di Afrika**

Perubahan iklim menyajikan tantangan yang kompleks di seluruh benua Afrika. Indikator-indikator perubahan ini mencerminkan dampak mendalam pada lingkungan, ekonomi, dan masyarakat. Dengan kenaikan suhu yang cepat, pola curah hujan yang tidak terduga, dan peristiwa cuaca ekstrem yang semakin sering, kebutuhan akan strategi adaptasi menjadi semakin mendesak. Dalam bab ini, kita akan mengeksplorasi indikator utama perubahan iklim di Afrika yang diidentifikasi melalui berbagai penelitian dan laporan internasional.

##### **a. Suhu Meningkatkan di Afrika**

Afrika telah mengalami peningkatan suhu yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Proyeksi menunjukkan bahwa suhu di beberapa wilayah akan meningkat lebih dari 1,5°C dibandingkan dengan rata-rata pra-industri, menempatkan ekosistem dan mata pencaharian manusia dalam risiko besar (Kassa, 2022). Wilayah Sahel, misalnya, mencatat salah satu peningkatan suhu tertinggi di dunia, yang memengaruhi pola cuaca dan produktivitas pertanian.

Laporan "*State of the Climate in Africa 2022*" mencatat bahwa tingkat kenaikan suhu di Afrika melampaui rata-rata global. Hal ini memperburuk kerentanan yang sudah ada, seperti ketergantungan pada pertanian subsisten, yang sangat sensitif terhadap perubahan iklim (UN, 2023). Selain itu, peningkatan suhu juga mempercepat penggurunan, terutama di wilayah

utara dan selatan benua, mempersempit ruang hidup bagi flora dan fauna endemik.

### b. Peristiwa Cuaca Ekstrim

Frekuensi peristiwa cuaca ekstrem, seperti kekeringan dan banjir, meningkat secara signifikan di Afrika. Kekeringan menyumbang 48% dari kematian yang dilaporkan akibat bencana iklim pada tahun 2022, sementara banjir berkontribusi sebesar 43% (UN, 2023). Peristiwa-peristiwa ini tidak hanya merusak infrastruktur tetapi juga menyebabkan kerugian ekonomi besar, diperkirakan mencapai lebih dari US\$8,5 miliar dalam satu tahun.

Wilayah Tanduk Afrika telah menjadi episentrum kekeringan yang parah, dengan jutaan orang menghadapi kelangkaan air dan kerawanan pangan. Sebaliknya, negara-negara seperti Nigeria dan Mozambik telah dilanda banjir besar, yang merusak pertanian dan permukiman. Kedua jenis peristiwa ini menggarisbawahi ketidakpastian dan variabilitas yang tinggi dari sistem iklim Afrika.

### c. Ketahanan Pangan dan Dampak Ekonomi

Ketergantungan Afrika pada pertanian yang bergantung pada curah hujan menjadikannya sangat rentan terhadap perubahan pola curah hujan. Penurunan curah hujan yang signifikan di beberapa wilayah telah menyebabkan penurunan hasil panen, khususnya tanaman pokok seperti jagung, sorgum, dan millet (Cheng, 2023). Penurunan ini tidak hanya mengancam ketahanan pangan tetapi juga menekan ekonomi nasional yang bergantung pada ekspor hasil pertanian.

Sebaliknya, beberapa wilayah melaporkan hujan lebat yang tidak teratur, yang dapat merusak tanaman siap panen dan mengakibatkan hilangnya mata pencaharian petani kecil. Krisis

ini semakin memperburuk kemiskinan di pedesaan, mendorong migrasi ke kota-kota besar yang sudah padat penduduk. Dengan demikian, tekanan ekonomi akibat perubahan iklim menciptakan lingkaran setan yang sulit diputus.

#### d. Solusi Inovatif dan Tantangan Adaptasi

Meskipun indikator perubahan iklim di Afrika menunjukkan tren yang mengkhawatirkan, beberapa wilayah telah mulai menerapkan solusi inovatif. Misalnya, pertanian cerdas iklim sedang diadopsi di banyak negara untuk meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca. Teknik seperti penggunaan varietas benih tahan kekeringan dan penerapan irigasi mikro telah menunjukkan hasil yang menjanjikan.

Namun, tantangan besar tetap ada. Pendanaan adaptasi dan mitigasi seringkali tidak mencukupi, terutama di negara-negara dengan ekonomi lemah. Selain itu, kurangnya data yang andal dan terperinci menyulitkan perencanaan berbasis bukti. Kolaborasi internasional yang lebih erat, termasuk transfer teknologi dan pendanaan iklim, sangat penting untuk membantu Afrika menghadapi dampak perubahan iklim.

### **5. Indikator Perubahan Iklim di Australia**

Perubahan iklim di Australia telah menjadi perhatian utama karena berbagai perubahan lingkungan yang signifikan, termasuk kenaikan suhu, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan peristiwa cuaca ekstrem. Indikator-indikator ini mencerminkan kerentanan benua terhadap dampak perubahan iklim, yang diproyeksikan akan meningkat dalam beberapa dekade mendatang. Berikut ini adalah uraian rinci mengenai indikator utama perubahan iklim di Australia.

### a. Suhu Meningkat

Salah satu indikator utama perubahan iklim di Australia adalah peningkatan suhu rata-rata. Selama abad terakhir, suhu rata-rata di Australia telah meningkat sekitar  $1^{\circ}\text{C}$  (Makuei, McArthur and Kuleshov, 2013). Kenaikan ini berdampak signifikan pada berbagai aspek lingkungan dan kehidupan. Gelombang panas, misalnya, telah menjadi lebih sering dan intens. Hal ini tidak hanya memperburuk risiko kekeringan parah tetapi juga berkontribusi terhadap meningkatnya frekuensi kebakaran semak yang meluas (Ulrich, 2022). Kebakaran semak yang intens ini mengancam keanekaragaman hayati, merusak ekosistem, dan menimbulkan dampak ekonomi serta sosial yang besar.

### b. Perubahan Curah Hujan

Selain suhu, pola curah hujan juga mengalami perubahan yang signifikan. Terdapat pergeseran pola curah hujan, di mana terjadi peningkatan curah hujan di wilayah barat laut dan penurunan signifikan di wilayah tenggara dan barat daya (Makuei, McArthur and Kuleshov, 2013). Perubahan ini mengakibatkan ketidakseimbangan dalam distribusi sumber daya air, yang memengaruhi sektor pertanian dan keberlanjutan ekosistem. Selain itu, frekuensi kejadian hujan lebat semakin meningkat, sering kali menyebabkan banjir yang merusak infrastruktur dan mengancam kehidupan masyarakat (Ulrich, 2022). Kondisi ini menunjukkan bagaimana perubahan iklim memperparah tantangan yang dihadapi oleh komunitas lokal dalam mengelola sumber daya alam.

### c. Peristiwa Cuaca Ekstrem

Peningkatan peristiwa cuaca ekstrem (*Extreme Climate Events/ECE*) juga menjadi indikator penting perubahan iklim di

Australia. Gelombang panas laut, kekeringan berkepanjangan, dan peristiwa cuaca ekstrem lainnya telah menyebabkan kerusakan ekologis yang meluas (Babcock *et al.*, 2019). Sebagai contoh, kebakaran hutan yang terjadi pada 2019-2020 mencerminkan dampak gabungan dari kekeringan berkepanjangan dan suhu ekstrem. Peristiwa ini menghancurkan habitat satwa liar, mengurangi keanekaragaman hayati, dan menciptakan tantangan kesehatan bagi masyarakat lokal (Ulrich, 2022). Kerentanan terhadap peristiwa ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih tanggap terhadap mitigasi dan adaptasi perubahan iklim.

### C. Dampaknya Terhadap Hidrologi Global

Perubahan iklim memiliki dampak yang sangat besar pada hidrologi global, menyebabkan perubahan signifikan dalam ketersediaan air dan frekuensi kejadian cuaca ekstrem. Ketika suhu global meningkat, siklus hidrologi juga mengalami percepatan, yang pada akhirnya memperburuk kejadian banjir dan kekeringan. Interaksi kompleks ini memerlukan perhatian lebih dalam berbagai dimensi perubahan hidrologi.

**Tabel 12. 1 Dampak Pemanasan Global Peningkatan Intensitas Curah Hujan**

Tingkat Pemanasan Global	Peningkatan Frekuensi	Peningkatan Intensitas
1.5°C	1.5 kali	10.5% lebih basah
2°C	1.7 kali	14.0% lebih basah
4°C	2.7 kali	30.2% lebih basah

(Sumber: IPCC, 2021)

Pemanasan global secara signifikan meningkatkan intensitas dan frekuensi kejadian curah hujan ekstrem, sesuai dengan data yang menunjukkan bahwa pada pemanasan 1.5°C, kejadian ini terjadi 1.5 kali lebih sering dengan intensitas 10.5% lebih basah dibandingkan dengan iklim tanpa pengaruh manusia. Ketika suhu global meningkat ke 2°C, frekuensi curah hujan ekstrem meningkat menjadi 1.7 kali lebih sering, sementara intensitasnya naik sebesar 14.0% lebih basah. Pada tingkat pemanasan yang lebih tinggi, yaitu 4°C, frekuensi kejadian ekstrem melonjak menjadi 2.7 kali lebih sering dengan intensitas curah hujan meningkat hingga 30.2% lebih basah. Peningkatan ini disebabkan oleh kemampuan atmosfer yang lebih besar untuk menahan uap air akibat suhu yang lebih tinggi, mempercepat siklus hidrologi dan meningkatkan risiko banjir, tekanan pada infrastruktur, serta gangguan pada ekosistem.

### **1. Percepatan Siklus Hidrologi**

Pemanasan global diperkirakan meningkatkan penguapan sekitar 5,2% dan curah hujan sebesar 6,5% (Ehtasham, Sherani and Nawaz, 2024). Hal ini berdampak langsung pada intensitas dan frekuensi peristiwa cuaca ekstrem, termasuk banjir dan kekeringan.

### **2. Dampak pada Kualitas Air dan Waduk**

Percepatan siklus hidrologi memengaruhi kualitas air dan pengisian waduk. Peristiwa cuaca ekstrem yang lebih sering dan intens menghasilkan tantangan baru dalam pengelolaan sumber daya air (Wang and Liu, 2023; Ehtasham, Sherani and Nawaz, 2024).

### **3. Peningkatan dan Penurunan Ketersediaan Air**

Perubahan iklim menciptakan variabilitas regional yang signifikan dalam sumber daya air. Beberapa daerah mungkin

mengalami peningkatan curah hujan yang intens, sementara yang lain menghadapi kelangkaan air yang parah (Ehtasham et al., 2024).

## **D. Proyeksi Debit Sungai**

Proyeksi menunjukkan perubahan campuran dalam debit sungai. Wilayah seperti Timur Tengah diperkirakan mengalami peningkatan debit sungai, sedangkan penurunan terjadi di beberapa bagian Eropa dan Amerika Selatan pada tahun 2050-an (Gebrechorkos, Leyland and Darby, 2023).

### **1. Tantangan dan Strategi Adaptasi**

#### **a. Dampak Sosial Hidroiklim Ekstrem**

Cuaca ekstrem akibat perubahan iklim menimbulkan dampak sosial yang signifikan, termasuk risiko terhadap ketahanan pangan dan kesehatan masyarakat. Langkah-langkah adaptasi yang spesifik lokasi sangat diperlukan untuk mengurangi risiko tersebut (Darby & Gebrechorkos, 2023).

#### **b. Strategi Pengelolaan Sumber Daya Air**

Pengelolaan sumber daya air yang efektif menjadi kunci untuk mengatasi tantangan ini. Strategi yang melibatkan pendekatan adaptif dan penggunaan teknologi canggih dapat membantu mengurangi dampak perubahan iklim pada hidrologi (Sun and Xia, 2023; American Society of Civil Engineers and Larbi, 2024).

### **2. Peran Pemerintah, Regulator, Industri, dan Masyarakat dalam Menangani Dampak Perubahan Iklim terhadap Sumber Daya Air**

Menangani dampak perubahan iklim memerlukan upaya kolektif dari berbagai pemangku kepentingan. Peran masing-

masing pemangku kepentingan sangat penting untuk memastikan bahwa kita dapat secara efektif mengurangi dampak perubahan iklim dan memastikan keberlanjutan sumber daya air kita dalam jangka panjang.

### **E. Kesimpulan**

Meskipun perubahan iklim menimbulkan ancaman signifikan terhadap hidrologi global, pendekatan manajemen adaptif dan kemajuan teknologi memberikan harapan. Dengan implementasi strategi yang tepat, pengelolaan sumber daya air dapat ditingkatkan untuk menghadapi perubahan kondisi iklim, menciptakan peluang baru dalam mitigasi dampak perubahan iklim. Perlunya peran pemerintah, regulator, industri, dan masyarakat dalam menangani dampak perubahan iklim terhadap sumber daya air.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahamed, T. (2023) 'Special issue on the assessment of climate change impacts on regional economics in South Asia', *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, 7(2), pp. 323–328. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41685-023-00300-y>.
- American Society of Civil Engineers and Larbi, J. (2024) *Impact of Climate Change on Hydrological Processes and Water Resources: Insights, Challenges, and Strategies for Resilience*. American Society of Civil Engineers. Available at: <https://doi.org/10.1061/infographic.000017>.
- Babcock, R.C. *et al.* (2019) 'Severe Continental-Scale Impacts of Climate Change Are Happening Now: Extreme Climate Events Impact Marine Habitat Forming Communities Along 45% of Australia's Coast', *Frontiers in Marine Science*, 6. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00411>.
- BMKG (2024) *Analisis Laju Perubahan Curah Hujan Tahunan - Iklim, BMKG - Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*. Available at: <https://www.bmkg.go.id/iklim/analisis-laju-perubahan-curah-hujan> (Accessed: 8 January 2025).
- Cheng, Z. (2023) 'The Impact of Climate Change on African Food Security and Economy', *Lecture Notes in Education Psychology and Public Media*, 25, pp. 277–281. Available at: <https://doi.org/10.54254/2753-7048/25/20230802>.
- Dong, S. *et al.* (2018) 'Observed Changes In Temperature Extremes Over Asia And Their Attribution', *Climate Dynamics*, 51(1), pp. 339–353. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3927-z>.

- Doshi, S.C. *et al.* (2023) 'Spatiotemporal trend analysis of climate indices for the European continent', *Journal of Water and Climate Change*, 14(9), pp. 3112–3130. Available at: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.183>.
- Ehtasham, L., Sherani, S.H. and Nawaz, F. (2024) 'Acceleration of the hydrological cycle and its impact on water availability over land: an adverse effect of climate change', *Meteorology Hydrology and Water Management*, 12(1), pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/10.26491/mhwm/188920>.
- EPA, O. (2015) *Climate Change Indicators in the United States*. Available at: <https://www.epa.gov/climate-indicators> (Accessed: 12 January 2025).
- Falak, F. *et al.* (2022) 'Indicators of Climate Change, Geospatial and Analytical Mapping of Trends in India, Pakistan and Bangladesh: An Observational Study', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), p. 17039. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph192417039>.
- Gebrechorkos, S.H., Leyland, J. and Darby, S. (2023) *Global High-Resolution Climate Change Projection and Its Impacts on Global Hydrology and Hydrological Extremes*. EGU23-2455. Copernicus Meetings. Available at: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2455>.
- IPCC (2021) *Climate Change 2021 The Physical Science Basis*. Available at: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf) (Accessed: 13 January 2025).
- Kassa, A.H. (2022) 'Current Climate Change Impacts and Risks Reviewed in Africa by Giving Especial Emphasis in Ethiopia: Short Review', *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 3(6), pp. 326–332.

- Kenney, M.A. and Janetos, A.C. (2020) 'National Indicators of Climate Changes, Impacts, and Vulnerability', *Climatic Change*, 163(4), pp. 1695–1704. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02939-4>.
- Kjellström, E. *et al.* (2018) 'European Climate Change at Global Mean Temperature Increases Of 1.5 And 2 °C Above Pre-Industrial Conditions as Simulated By The EURO-CORDEX Regional Climate Models', *Earth System Dynamics*, 9(2), pp. 459–478. Available at: <https://doi.org/10.5194/esd-9-459-2018>.
- Makuei, G., McArthur, L. and Kuleshov, Y. (2013) *Analysis of Trends in Temperature and Rainfall in Selected Regions of Australia Over The Last 100 Years*, *SciSpace - Paper*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. Available at: <https://typeset.io/papers/analysis-of-trends-in-temperature-and-rainfall-in-selected-5bu76o786d> (Accessed: 12 January 2025).
- Moghim, S., Teuling, A.J. and Uijlenhoet, R. (2022) 'A Probabilistic Climate Change Assessment for Europe', *International Journal of Climatology*, 42(13), pp. 6699–6715. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.7604>.
- Nistor, M.-M. (2021) 'Chapter 5 - High-Resolution Projections of The Aridity in Europe Under Climate Change', in M.-M. Nistor (ed.) *Climate and Land Use Impacts on Natural and Artificial Systems*. Elsevier, pp. 73–90. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822184-6.00009-0>.
- Pabón-Caicedo, J.D. (2022) 'El Cambio Climático En La América Ecuatorial', *Ikara. Revista De Geografías Iberoamericanas*, (1), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.18239/ikara.3019>.
- Peters-Lidard, C.D. *et al.* (2021) 'Indicators of climate change impacts on the water cycle and water management',

- Climatic Change*, 165(1), p. 36. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03057-5>.
- Ren, G. *et al.* (2023) 'Observed changes in temperature and precipitation over Asia, 1901-2020', *Climate Research*, 90, pp. 31–43. Available at: <https://doi.org/10.3354/cr01713>.
- Sun, Y. and Xia, L. (2023) 'A Review of Research on the Impact of Global Climate Change on Hydrology and Water Resources', *International Journal of Energy*, 3(1), pp. 66–70. Available at: <https://doi.org/10.54097/ije.v3i1.10650>.
- Suppiah, R., Bathols, J. and Preston, B.L. (2006) *Climate Change in the Asia Pacific Region, SciSpace - Paper*. Climate Change & Development Roundtable. Available at: <https://typeset.io/papers/climate-change-in-the-asia-pacific-region-28jbtscdaf> (Accessed: 11 January 2025).
- Ulrich, B. (2022) 'The Nature of Climate-Related Disasters in Australia', in A. Lukasiewicz and T. O'Donnell (eds) *Complex Disasters: Compounding, Cascading, and Protracted*. Singapore: Springer Nature, pp. 57–79. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2428-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2428-6_4).
- UN, W.M. (2023) *State of the Climate in Africa 2022*. United Nations. Available at: <https://doi.org/10.18356/9789263113306>.
- Wang, X. and Liu, L. (2023) 'The Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle and Water Resource Management', *Water*, 15(13), p. 2342. Available at: <https://doi.org/10.3390/w15132342>.

## BIODATA PENULIS



### **Ir. Meylis Safriani, S.T., M.T**

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

Penulis lahir di Meulaboh tanggal 01 Mei 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Sipil melanjutkan S2 pada Jurusan Magister Teknik Sipil Bidang Sumber Daya Air di Universitas Syiah Kuala. Penulis menekuni bidang Menulis, sudah menerbitkan 4 judul buku.

Mendapat Gelar Insyiyur (Ir) di Prodi PII Universitas Ajmajaya Jakarta. Mulai bekerja di Universitas Teuku Umar di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar Indonesia sejak Tahun 2016 sampai sekarang. Aktif pada Organisasi Persatuan Insinyur Indonesia (PII) sejak tahun 2021 sampai sekarang. Merupakan awarde riset Hibah Skim riset keilmuan e-rispro LPDP, beberapa Hibah Penelitian yang telah diterima adalah Hibah dari Simlintabmas-Dikti Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi: Hibah Riset dari Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dan Hibah Internasional SUPA GIZ Jerman. Aktif sebagai tim di pusat riset

Collaborative Research Center of Disaster, Climate Change, for Earthquake , Tsunami, and Community Resilience (CRC ETRC), Pusat Riset Pembangunan Rendah Karbon, dan Pusat Riset Pengelolaan Sumber Daya Lingkungan Universitas Teuku Umar sejak Tahun 2023 hingga sekarang.

Aktif di Tim Greencampus Universitas Teuku Umar dari tahun 2028 hingga 2023. Sudah memiliki sertifikat kompetensi ahli Utama Sumber Daya Air. Terlibat sebagai tim ahli pada Penyusunan Rencana Pengelolaan dan Perlindungan Ekosistem Gambut (RPPEG) Kabupaten Nagan Raya dan Aceh Barat Tahun 2025-2045. Terlibat sebagai tim ahli hidrologi dalam kegiatan *Water Management Concept* in Peatlands in Nagan Raya dan West Aceh District yang didanai oleh SUPA GIZ Tahun 2023-2024.

E-mail: [meylissafriani@utu.ac.id](mailto:meylissafriani@utu.ac.id)

## **BIODATA PENULIS**



**Ir. Arsyad, S.T., M.T**

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Saintek, Universitas Muhammadiyah Enrekang.

Penulis lahir di Pangembang, Takalar tanggal 14 Pebruari 1977. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Saintek, Universitas Muhammadiyah Enrekang. Provinsi Sulawesi Selatan

Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Sipil Pengairan di Universitas Muhammadiyah Makassar Tahun 2009 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Sumber Daya Air di Universitas Muslim Indonesia ( UMI ) Makassar dan selesai 2016, serta melanjutkan Pendidikan Profesi Insinyur di Universitas Muslim Indonesia ( UMI ) Makassar.

## **BIODATA PENULIS**



**Ir. M. Aguslim, S.T., M.T**

Dosen Program Studi Teknik Pengairan  
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Palopo tanggal 12 Agustus 1975. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pengairan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar sejak tahun 2013. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil tahun 2008 pada jurusan Teknik Sipil Program Studi Teknik Pengairan di Universitas yang sama dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Sipil Program Studi Sumber Daya Air Universitas Hasanuddin Makassar pada tahun 2013 dan selesai pada tahun 2018, selain mengajar penulis juga aktif dalam berbagai organisasi baik organisasi sosial kemasyarakatan (Muhammadiyah) juga organisasi profesi (PII).

## BIODATA PENULIS



### **Dr. Ir. H. Apriyanto, S.E., M.Si., M.M**

Dosen Program Sarjana Terapan Akuntansi Perpajakan  
Politeknik Tunas Pemuda

Memperoleh gelar sarjana (S-1) dan S-2 (Magister) dari Institut Pertanian Bogor (IPB), sekarang IPB University, sedangkan gelar doktor (S-3) dalam bidang manajemen pendidikan diperoleh dari Universitas Islam Nusantara Bandung. Kegiatan mengajarnya dimulai sejak tahun 1997 hingga kini pada beberapa Perguruan Tinggi Swasta di wilayah Jakarta, Bogor, Tangerang, dan Bekasi (JABOTABEK). Pada tahun 2010, mendapat tugas tambahan menjadi Ketua Dewan Pembina Yayasan Rizky Putra Harapan Bangsa, yang mewadahi SMK Tunas Pemuda, Politeknik Tunas Pemuda, dan STIE Triguna Tangerang.

Penulis dapat dihubungi melalui:

e-mail: [apriaries0604@gmail.com](mailto:apriaries0604@gmail.com)

## BIODATA PENULIS



**Ir. Zulharnah, M.T**

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Fajar

Penulis lahir di Ujung Pandang ( sekarang Makassar) pada tanggal 31 Maret 1964 sebagai anak pertama dari tujuh bersaudara, pasangan orang tua Hasan Ramli dan Hj. Hasnah andi Sapati . Pendidikan SMA dilakukan di kota Palopo, dan pada tahun 1983 melanjutkan studi di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia, Makassar. Setelah lulus, bekerja pada Kopersi Ukhuwah Unit Konsultan Teknik (UKT) Universitas Muslim Indonesia hingga tahun 1993 dan juga sebagai asisten pembimbing tugas mata kuliah Irigasi dan Manajemen Proyek di Jurusan Sipil hingga tahun 2002. Sebelumnya, pada saat yang sama di tahun 1994 hingga 1997 aktif di konsultan pengawasan pada proyek peningkatan jalan dan juga di Real Estate/Developer. Pada tahun 1999 dipercayakan sebagai kepala Laboratorium Teknik Sipil di Pusat Pengembangan Aptisi Wilayah IX Sulawesi yang pada akhirnya terangkat sebagai ASN tenaga kependidikan di LLDIKTI tahun

2014. Pendidikan Pascasarjana diselesaikan di Universitas Hasanuddin, Makassar pada tahun 2013 dalam bidang Teknik Sipil. Sebelumnya pada tahun 2006 penulis pernah mengajar di Universitas Atmajaya, Makassar dan pada tahun yang sama menjadi Instruktur pada Retooling Program Training Batch IV Proyek TPSDP Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi. Pada tahun 2008 penulis mengajar pada Fakultas Teknik Jurusan Sipil di Universitas Fajar, Makassar hingga tahun 2014. Beberapa Mata Kuliah yang pernah dan masih diajarkan hingga saat ini adalah Menggambar Bangunan Sipil, Hidrologi, Irigasi dan bangunan Air, Drainase Perkotaan serta melakukan penelitian. Sebagai ASN tenaga kependidikan, penulis tetap mengajar sebagai dosen luar biasa di Universitas Fajar hingga tahun 2021. Sebelum memasuki purna bakti, penulis mengajukan permohonan peralihan tugas ke fungsional sebagai dosen DPK Universitas Fajar pada tahun 2021.

## **BIODATA PENULIS**



**Amalia Nurdin, S.T., M.T**

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir di Ujung Pandang tanggal 12 Desember 1987. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sulawesi Barat. Penulis menamatkan Pendidikan Dasar di SD Kelapa Tiga Satu Makassar, SLTP Negeri 1 Makassar, dan SMA Negeri 1 Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 2010 pada Program Studi Teknik Kelautan dan melanjutkan S2 tahun 2013 di Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.

Mengawali karir di Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Polewali Mandar dan melanjutkan karir di bidang Telecommunication Engineering di Makassar. Pada akhir tahun 2018 lulus PNS dalam formasi dosen Asisten Ahli pada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi dan di tempatkan di Fakultas Teknik Universitas Sulawesi Barat Program Studi Teknik Sipil konsentrasi Keairan dan mengampu

mata kuliah Drainase, Irigasi dan Bangunan Air, Pengembangan Sumber Daya Air dan Rekayasa Hidrologi. Penulis telah menulis dua buku chapter dengan sub tema Pengelolaan Air Limbah Berkelanjutan dan Konsep-Konsep Drainase yang Berwawasan Lingkungan.

## **BIODATA PENULIS**



**Fitry Hasdanita, S.T., M.T**  
Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar

Penulis lahir di Meulaboh, pada tanggal 18 Maret 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Teknik Sipil Matematika Fakultas Teknik Universitas Teumu Umar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil di Universitas Syiah pada tahun 2024, menyelesaikan Pendidikan S2 Program Magister Teknik Sipil di universitas yang sama pada tahun 2018. Pada tahun 2022 menjadi dosen di Universitas Teuku Umar.

## BIODATA PENULIS



**Suprapti, S.T., M.T**

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta

Penulis lahir di Sukoharjo, tanggal 16 Juni 1972. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana Jakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil di Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS) pada tahun 1997 dan S2 pada Jurusan Teknik Sipil, Teknik Sumber Daya Air di ITB tahun 2014. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan studi S3 di ITB dengan jurusan yang sama hingga saat ini.

Ikut serta berkolaborasi dalam membuat buku ini, merupakan pengalaman pertama bagi penulis. Semoga karya pertama ini dapat bermanfaat dan sebagai pemicu untuk langkah selanjutnya secara kontinue dapat membuat buku dengan topik dan bahasan yang lain, terutama di bidang ilmu Teknik Sipil Sumber Daya Air, insyaa Allaah. Karya tulis merupakan wujud nyata ilmu yang akan dapat dinikmati bagi generasi selanjutnya sebagai amal jariyah yang tidak akan terputus.

## BIODATA PENULIS



**Dr. Amrullah Mansida, S.T., M.T., Asean Eng**

Dosen Program Studi Teknik Pengairan  
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Magister Teknik Sumber Daya Air (Teknik Pengairan) Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S<sub>1</sub> pada program Studi Teknik pengairan Unismuh Makassar, melanjutkan S<sub>2</sub> dan menyelesaikan S<sub>3</sub> program Studi Teknik Sipil di Universitas Hasanuddin. Penulis menekuni bidang Menulis Teknik sipil, Teknik Sungai, Morfologi Sungai, Drainase Perkotaan, Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Pengembangan Sumber Daya Air, Insinyur Indonesia, Sistem manajemen K3, Manajemen Risiko; Teori, Kasus, dan Solusi serta Etika Profesi Teknik, Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja, metode penelitian dan pengembangannya, dan Manajemen Teknik: Panduan Praktis untuk Keberhasilan Dalam proyek Teknik, Konservasi Tanah dan Air, Teknik Sungai berkelanjutan dan *Drainase* Perkotaan Berkelanjutan.

Pengalaman penulis sebagai mengajar matakuliah Hidrologi Teknik I, Hidrologi Teknik II, Marfologi Sungai, Teknik Sungai, Pengembangan Sumber Daya Air, Perencanaan dan

pengelolaan Waduk, Etika Profesi, dan Standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), Hidrologi Terapan Lanjut, Teknik Sungai berkelanjutan (Hidrodinamika Sungai) dan Hidrometeorologi (Mitigasi Bencana), sekarang. Selain menjadi akademisi di kampus penulis juga sebagai praktisi dengan pengabdian dalam berpartisipasi membangun bangsa melalui keterlibatan sebagai konsultan perencanaan, pengawasan bidang pengembangan sumber daya air dan menjadi asesor sertifikat SKA Asosiasi serta asesor BKD.

## BIODATA PENULIS



**Dr. Ir. Imam Rohani, S.T., M.T**  
Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir di Luwu, tanggal 1 Juli 1981. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sulawesi Barat. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik sipil universitas Tadulako dan melanjutkan S2 & S3 pada Jurusan Teknik sipil universitas Hasanuddin. Karya Buku yang telah diterbitkan antara lain: Mekanika Fluida Untuk Bidang Ilmu Rekayasa, Aliran Eksternal dan Mekanika Fluida Untuk Bidang Ilmu Rekayasa Lanjut.

## BIODATA PENULIS



**Fachruddin, S.TP., M.Si**

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

Fachruddin, S.TP., M.Si., lahir di Aceh Utara pada 1 Januari 1987, merupakan anak bungsu dari lima bersaudara. Ia adalah putra pasangan H. M. Ali (almarhum), seorang petani profesional asal Aceh Utara, dan Hj. Zainabah. Fachruddin menempuh pendidikan dasar hingga menengah pertama di kampung halamannya, Aceh Utara, sebelum melanjutkan ke SMK di Bireuen pada tahun 2003. Gelar Sarjana Teknik Pertanian diraihinya dari Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, pada tahun 2006. Selama masa studi, ia aktif dalam berbagai organisasi, seperti Pelajar Islam Indonesia, Himpunan Mahasiswa Islam, dan Palang Merah Indonesia, yang membentuk kecakapannya dalam kepemimpinan dan pengabdian sosial.

Selepas menyelesaikan pendidikan sarjana, Fachruddin memulai kariernya sebagai asisten dosen di Jurusan Teknik Pertanian Universitas Syiah Kuala serta di AMIK Indonesia pada tahun 2011 hingga 2012. Hasratnya untuk mendalami ilmu

membawa Fachruddin melanjutkan studi di Program Magister Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor (IPB), dan berhasil meraih gelar Master pada tahun 2015. Ketertarikannya yang mendalam terhadap Sistem Informasi Geografis (SIG) mendorongnya untuk terlibat dalam berbagai proyek di bidang teknik sipil, lingkungan, dan pertanian.

Karier akademiknya semakin berkembang ketika ia menjabat sebagai Dosen Tetap Non-PNS di Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala dari tahun 2016 hingga 2022. Sejak tahun 2022, ia menjadi Dosen Tetap di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, yang berlokasi di Kabupaten Aceh Barat, Provinsi Aceh. Saat ini, ia aktif mengajar dan melakukan penelitian, khususnya terkait aplikasi SIG di bidang teknik sipil, lingkungan, dan pertanian.

Fachruddin juga merupakan penulis buku *Sistem Informasi Geografis (SIG) Bidang Teknik Pertanian* dan memiliki sejumlah publikasi yang dapat diakses melalui profil Google: <https://scholar.google.com/citations?user=Vvt5gkkAAAAJ&hl=en&authuser=3>. Orcid id: <https://orcid.org/0009-0001-1959-8677>.

Penulis dapat melalui email: [fachruddin@utu.ac.id](mailto:fachruddin@utu.ac.id)

# HIDROLOGI

Buku ini menyajikan kajian mendalam mengenai pengaruh beban lebih pada motor induksi tiga fasa, sebuah topik yang sangat penting dalam dunia rekayasa listrik dan industri. Motor induksi tiga fasa adalah salah satu jenis motor listrik yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena keandalannya dan efisiensinya. Namun, ketika motor tersebut mengalami beban lebih (overload), berbagai dampak negatif dapat terjadi, mulai dari penurunan performa hingga kerusakan permanen pada motor.

Melalui buku ini, pembaca akan diajak untuk memahami lebih dalam mengenai karakteristik motor induksi tiga fasa, mekanisme kerja, serta dampak yang ditimbulkan oleh kondisi beban lebih. Buku ini mencakup analisis teknis terkait perhitungan arus, torsi, dan efisiensi motor, serta bagaimana kondisi beban lebih dapat mempengaruhi komponen-komponen motor, seperti kumparan stator dan rotor, hingga sistem kelistrikan yang mendukungnya.

Selain itu, buku ini juga memberikan penjelasan tentang berbagai metode untuk mengukur dan mendiagnosis beban lebih pada motor induksi tiga fasa, serta langkah-langkah perbaikan dan pencegahan yang dapat diambil untuk memperpanjang umur motor dan meningkatkan efisiensinya. Melalui contoh-contoh kasus praktis, buku ini menyajikan wawasan yang sangat bermanfaat bagi para insinyur, teknisi, dan mahasiswa teknik elektro yang ingin lebih memahami dinamika pengoperasian motor induksi dalam kondisi beban lebih.



- ✉ [lingkaredukasindonesia.id@gmail.com](mailto:lingkaredukasindonesia.id@gmail.com)
- 🌐 <https://www.lingkaredukasindonesia.com>
- 📱 @Lingkar\_Edukasi\_Indonesia