

Dampak Climate Changes Terhadap Pengelolaan Sumberdaya Air di Daerah Aliran Sungai (DAS)

Impact of Climate Change on Water Resources Management in River Basins (DAS)

Nabila, Nabila^{1*}

¹Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Kota, Padang, 25175

*Corresponding Author: 2320232004_nabila@student.unand.ac.id

ABSTRACT

Climate change has become a significant threat to water resources management in river basins (DAS). This article examines the impacts of climate change on water resources management, with a focus on changes in rainfall patterns, increasing temperatures, and effects on the hydrological cycle. Increased rainfall intensity and global temperatures have changed the characteristics of river discharge, affecting water availability for agriculture, households, and industry. Climate change also affects the hydrological cycle through changes in rainfall patterns, increasing temperatures, and changes in evapotranspiration. Studies have shown that increasing average temperatures and changing rainfall patterns in Indonesia have had significant impacts on water management in watersheds, including the Brantas and Citarum watersheds. In addition, land-use changes such as deforestation and urbanization exacerbate the impacts of climate change, increasing the risk of flooding and drought. Effective water resources management requires a holistic and adaptive approach, such as Integrated Water Resources Management (IWRM), which integrates various sectors and interests in water management. The implementation of IWRM in Indonesia has shown mixed results, with some watersheds successfully adopting this approach, while others face obstacles such as lack of coordination between agencies and limited accurate hydrological data. Innovative and participatory adaptive approaches to water management are needed to address challenges caused by climate change, ensure sustainability of water resources, and maintain ecosystem balance. This article emphasizes the importance of local community involvement and development of climate-resilient water infrastructure in water resource management in the basin.

Key words : Climate Changes, Pengelolaan Sumberdaya Air, Daerah Aliran Sungai (DAS)

1. Pendahuluan

Sumberdaya air merupakan salah satu hal yang paling krusial di bumi (ertela et al., 2011; Tsakiris & Loucks, 2023; Pan et al., 2021). Segala sesuai yang ada dimuka bumi ini sangat bergantung pada ketersediaan sumberdaya air. Sumberdaya air sangat penting dalam kehidupan, tidak hanya untuk kehidupan sehari-hari tetapi juga menjaga kesehatan untuk kelanjutan produktivitas, selain itu juga penting untuk penopang ekonomi, kualitas lingkungan, dan keanekaragaman hayati serta ekosistem alam. Sehingga diperlukan pengelolaan sumberdaya air untuk tetap menjaga kelestarian dan kehidupan (Sefano et al., 2024). Tujuan pengelolaan sumberdaya air adalah untuk menjamin ketersediaan air dalam kuantitas dan kualitasnya. Tetapi kondisi tersebut akan berubah seiring waktu sesuai dengan perkembangan dan perubahan untuk kedepannya (Tsakiris & Loucks, 2023; Pan et al., 2021).

Pengelolaan sumberdaya air merupakan suatu tugas yang kompleks, dimana proses yang terdiri dari pengumpulan data, mengevaluasi dan penerapan teknik dan pengetahuan ilmiah terbaru. Selain itu dalam pengelolaan sumberdaya air tidak hanya memahami kondisi alam tetapi juga lingkungan sosial dan politik baik itu pada skala lokal, regional ataupun global (Sefano, 2025). Dalam pengelolaan sumberdaya air selain lingkungan fisik dan sosial yang menjadi tantangan, tantangan yang utama yang dihadapi adalah climate change atau perubahan iklim (Tsakiris & Loucks, 2023).

Climate Change atau perubahan iklim terjadi akibat adanya peningkatan konsentrasi karbon dioksida dan gas rumah kaca di atmosfer. Adanya peningkatan suhu udara dan peningkatan intensitas curah hujan menjadi karakteristik dari perubahan iklim secara global. Peningkatan suhu udara dapat dirasakan secara langsung dan dengan mudah, sedangkan curah hujan dapat kita amati melalui proses analisa terlebih dahulu. Pada setiap lokasi atau tempat perubahan yang terjadi pada curah hujan sangatlah berbeda-beda (Nabila, 2025). Hal tersebut menunjukkan adanya pola yang berbeda-beda pada satu lokasi dengan lokasi lainnya. Karakteristik curah hujan pada umumnya dapat kita amati dengan perubahan suhu udara, intensitas hujan dan adanya frekuensi terjadinya hujan badai (Ferijal et al., 2016). Perubahan iklim global ditandai oleh kenaikan suhu permukaan, perubahan pola presipitasi, evaporasi, kenaikan muka laut, serta surplus atau defisit air yang mengancam kehidupan. Oleh karena itu, diperlukan strategi kebijakan pembangunan berkelanjutan, termasuk dalam penggunaan lahan. Perubahan penggunaan lahan dapat membawa masalah serius jika tidak mengikuti kaidah konservasi tanah dan air serta kelas kemampuan lahan (Sipayung et al, 2010).

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan utama dan menjadi risiko tertinggi kedua terhadap mata pencarian menurut reseach Global Risk Report in 2021 (WEF (World Economic Forum) 2021). Perubahan iklim ini mengakibatkan kenaikan suhu dan peningkatan curah hujan yang dapat mempengaruhi siklus hidrologi. Siklus hidrologi terdiri dari berbagai indikator didalamnya, salah satunya yaitu debit air. Debit air sungai adalah indikator utama dalam penyedia air untuk berbagai sektor pertanian, rumah tangga, dan industry. Perubahan yang terjadi pada siklus hidrologi akan menimbulkan berbagai masalah dan ancaman terhadap kuantitas dan kualitas air termasuk bencana seperti bencana banjir (Khoi et al., 2021).

Perubahan iklim yang terjadi berdampak buruk terhadap kualitas dan kuantitas sumberdaya air (Tsakiris & Loucks, 2023).

Perubahan iklim menyebabkan perubahan pada ketersediaan air. Hal tersebut dirasakan langsung oleh masyarakat (Gosain et al., 2006; Hauvelmans et al., 2005; bouraoui et al., 2004 dan Legesse et al., 2003 dalam Ferijal et al., 2016). Perubahan yang terjadi akibat adanya perubahan iklim terhadap ketersediaan air disuatu tempat sangatlah berbeda-beda dan membutuhkan kajian mendalam pada suatu tempat yang berbeda. Dampak dari perubahan iklim terhadap ketersediaan air sudah diteliti dari berbagai aspek yaitu dipermukaannya, dalam profil tanah dan air bawah tanah (akuifer) (Soja et al dalam Ferijal et al., 2016). Penilaian potensi akibat dampak perubahan iklim terhadap ketersediaan sumberdaya air sangat penting. Hal tersebut dikarenakan sistem sosial ekonomi dan ekologi sangat rentan terhadap iklim dan kelangkaan air di setiap wilayah (Khoi et al., 2021).

Akibat perubahan iklim sangat dirasakan dampaknya bagi sektor pertanian. Jika ditelaan lebih lanjut, sektor pertanian merupakan salah satu faktor utama penyumbang gas rumah kaca. Tetapi sektor pertanian sangat bergantung pada perubahan iklim tersebut. berbagai kegiatan dalam sektor pertanian mempertimbangkan kondisi iklim. Hal tersebut berpengaruh pada kondisi produksi tanaman, dimana harus mempertimbangkan kondisi limatologi yang mencakup meteorology, penyinaran matahari, evaporasi dan berbagai faktor yang berhubungan dengan tanah dan tanaman. Laju penguapan dari tanah dan tanaman mengalami peningkatan akibat naiknya suhu rata-rata yang akan mengakibatkan pengurangan kadar air yang tersedia untuk pertumbuhan tanaman. Sehingga akan mengakibatkan penggunaan air irigasi menjadi semakin tinggi. Penggunaan air irigasi meningkat karena permintaan akan air irigasi meningkat di berbagai sektor. Kondisi tersebut dalam mengakibatkan berkurangnya sumberdaya air untuk irigasi berkurang (Ferijal et al., 2016).

Curah hujan menjadi faktor utama dalam ketersediaan air untuk irigasi. Irigasi menggunakan air permukaan yang berasal dari curah hujan seperti ketersediaan air sungai, waduk, danau, dan berbagai tempat penampung lainnya yang berfungsi untuk air irigasi. Perubahan curah hujan juga akan mempengaruhi secara fisik kondisi sungai, kondisi tampungan air, yang akan mempengaruhi ketersediaan air (Ferijal et al., 2016). Pendekatan Adaptif yang inovatif terhadap manajemen air diperlukan dalam mengatasi permasalahan pada sumberdaya air yang disebabkan oleh perubahan iklim ini. Pendekatan yang terdiri dari fokus pemahaman, pemantauan dan pengelolaan tidak hanya pada sumberdaya air saja tetapi juga pada komponen-komponen yang terdapat disekitar termasuk komponen fisik dan sosialnya (Tsakiris & Loucks, 2023).

Perubahan iklim dapat memengaruhi siklus hidrologi melalui perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu, dan perubahan pada evapotranspirasi. Misalnya, perubahan dalam pola curah hujan dapat menyebabkan peningkatan kejadian banjir dan kekeringan, yang pada gilirannya memengaruhi ketersediaan air di DAS (HESS, 2018; ADB, 2016). Selain itu, peningkatan suhu global berdampak pada tingkat penguapan, yang dapat mengurangi ketersediaan air permukaan dan air tanah (Ministry of Environment and Forestry of Indonesia, 2020). Indonesia telah mengalami perubahan

signifikan dalam curah hujan dan suhu dalam beberapa dekade terakhir. Studi menunjukkan bahwa peningkatan suhu rata-rata dan perubahan pola curah hujan di Indonesia telah berdampak signifikan pada pengelolaan air di DAS, termasuk DAS Brantas dan DAS Citarum yang merupakan dua dari DAS terpenting di negara ini (Asian Development Bank, 2016; Lestari et al., 2018). Penelitian menunjukkan bahwa perubahan iklim telah menyebabkan perubahan dalam musim hujan dan kemarau, yang mempengaruhi ketersediaan air sepanjang tahun (Kusuma et al., 2020).

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah wilayah daratan yang menampung air hujan dan mengalirkannya melalui sungai dan anak-anak sungai ke laut, danau, atau lembah. DAS memainkan peran penting dalam siklus hidrologi, ekosistem, dan keberlanjutan sumber daya air. DAS berfungsi sebagai sistem pengelolaan sumber daya air yang kompleks. Dengan penanganan yang baik, DAS dapat mengurangi risiko banjir, kekeringan, dan penurunan kualitas air. DAS menyediakan air bagi berbagai keperluan, mulai dari kebutuhan domestik, pertanian, hingga industri. Keberlanjutan DAS sangat penting untuk memastikan ketersediaan air yang cukup dan berkualitas tinggi (Nabila, 2021).

Perubahan iklim telah menyebabkan variasi dalam pola presipitasi, peningkatan suhu, dan frekuensi cuaca ekstrem. Hal ini berdampak pada siklus hidrologi di DAS, menyebabkan perubahan dalam debit sungai dan ketersediaan air. Selain itu, perubahan penggunaan lahan, seperti urbanisasi dan deforestasi, mempengaruhi kemampuan DAS dalam menyerap air hujan. Pengurangan area hutan dan perubahan ke lahan pertanian atau pemukiman mengurangi kapasitas infiltrasi tanah, meningkatkan aliran permukaan, dan risiko banjir (Sipayung et al, 2010). Perubahan iklim berdampak pada tata guna air di daerah aliran sungai (DAS), terutama pasokan air meteorologis, hidrologi, dan lahan. Dari aspek hidrologi, perubahan tata guna lahan berpengaruh langsung pada karakteristik penutupan lahan dan sistem tata air di setiap DAS. Kerentanan DAS Citarum terhadap variabilitas iklim dapat ditinjau berdasarkan neraca air menggunakan skenario perubahan iklim (Boer, 2003 dalam Sipayung et al, 2010).

Penurunan sumber daya air di DAS dipengaruhi oleh iklim dan perubahan tata guna lahan yang terlihat dari perubahan debit air sungai. Dampak perubahan iklim terhadap neraca air di pulau Jawa telah menyebabkan defisit air tahunan (Santoso, H. 2006 dalam Sipayung et al., 2010). Perubahan penutupan lahan di DAS berpengaruh dominan terhadap debit banjir, terutama di hulu dan hilir akibat tekanan penduduk. Lahan sawah, pemukiman, dan tegalan paling berpengaruh terhadap banjir, tanah longsor, dan kekeringan. Berdasarkan curah hujan, tata guna lahan, dan topografi, dapat diketahui kondisi wilayah apakah mudah kering atau mengalami penggenangan. Kajian ini dikembangkan untuk menentukan prioritas penanganan dalam perbaikan DAS serta menguji dampak hidrologis dari kebijakan tata ruang (Sipayung et al, 2010).

Pengelolaan sumber daya air di DAS di Indonesia menghadapi tantangan besar, termasuk degradasi lingkungan, perubahan penggunaan lahan, dan peningkatan permintaan air akibat pertumbuhan populasi dan urbanisasi (ADB, 2016; Water Resources Management, 2020). Tantangan ini diperparah oleh perubahan iklim yang mengubah pola aliran sungai dan ketersediaan air. Misalnya, di DAS Citarum, deforestasi

dan urbanisasi telah memperburuk dampak perubahan iklim, menyebabkan banjir yang lebih sering dan kekeringan yang lebih parah (Lestari et al., 2018). Strategi pengelolaan air yang efektif di DAS sangat penting untuk mengatasi dampak perubahan iklim. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu (IWRM), yang bertujuan untuk mengintegrasikan berbagai sektor dan kepentingan dalam pengelolaan air (Water Resources Management, 2020). IWRM mendorong pendekatan yang holistik dan partisipatif dalam pengelolaan air, dengan memperhitungkan faktor-faktor lingkungan, ekonomi, dan sosial (Hess, 2018; ADB, 2016).

Untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan sumber daya air di DAS, diperlukan langkah-langkah adaptasi yang tepat. Ini termasuk pengembangan infrastruktur air yang tahan terhadap perubahan iklim, peningkatan kapasitas institusi dalam pengelolaan air, dan penerapan teknologi pengelolaan air yang canggih. Selain itu, keterlibatan masyarakat lokal dalam pengelolaan air juga sangat penting untuk memastikan keberlanjutan dan keberhasilan strategi pengelolaan air (Ministry of Environment and Forestry of Indonesia, 2020; Lestari et al., 2018). Implementasi IWRM di Indonesia telah menunjukkan hasil yang beragam. Beberapa DAS, seperti DAS Brantas, telah berhasil mengadopsi pendekatan ini dengan dukungan dari pemerintah dan lembaga internasional. Namun, di DAS lain, penerapan IWRM masih menghadapi kendala, termasuk kurangnya koordinasi antar lembaga dan keterbatasan data hidrologi yang akurat (Kusuma et al., 2020; ADB, 2016). Dengan demikian, pengelolaan sumber daya air di DAS di Indonesia harus mempertimbangkan berbagai aspek perubahan iklim dan faktor-faktor lokal lainnya. Pendekatan yang komprehensif dan terintegrasi diperlukan untuk menghadapi tantangan ini dan memastikan ketersediaan air yang berkelanjutan untuk generasi mendatang (Asian Development Bank, 2016; Water Resources Management, 2020). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak climate change terhadap pengelolaan sumber daya air di daerah aliran sungai (DAS).

2. Climate Change

Perubahan iklim merujuk pada perubahan jangka panjang dalam pola cuaca dan suhu global yang terjadi di seluruh dunia. Perubahan ini terutama disebabkan oleh aktivitas manusia yang meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O). Aktivitas tersebut meliputi pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, pertanian intensif, dan industri. Pemanasan global, yang ditandai dengan peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi, merupakan indikator utama perubahan iklim. Menurut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021), suhu global telah meningkat sekitar 1,1°C sejak era pra-industri (1850-1900), sebagian besar disebabkan oleh aktivitas manusia. Selain itu, perubahan iklim menyebabkan pergeseran dalam pola cuaca, termasuk perubahan dalam distribusi curah hujan, peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem seperti badai, banjir, dan kekeringan, yang mempengaruhi ekosistem, sumber daya air, dan kehidupan manusia.

Mencairnya es di kutub dan gletser serta pemanasan air laut yang menyebabkan ekspansi termal, berkontribusi pada kenaikan permukaan laut. Studi oleh Church dan White (2011) menunjukkan bahwa permukaan laut global telah meningkat sekitar 20 cm sejak akhir abad ke-19. Perubahan iklim juga mempengaruhi ekosistem dan

keanekaragaman hayati, mengakibatkan pergeseran distribusi spesies, perubahan dalam waktu musim tumbuh, dan peningkatan risiko kepunahan untuk beberapa spesies. Hal ini telah diamati dalam berbagai ekosistem, dari terumbu karang hingga hutan dan daerah kutub. Dampak perubahan iklim sangat luas dan mencakup berbagai aspek kehidupan. Dalam konteks sumber daya air, perubahan dalam pola curah hujan dan peningkatan evaporasi dapat mengurangi ketersediaan air, meningkatkan risiko kekeringan, dan mempengaruhi kualitas air, yang berdampak pada pertanian, industri, dan kebutuhan domestik. Di sektor pertanian, perubahan iklim mempengaruhi produktivitas melalui perubahan suhu, pola curah hujan, dan kejadian cuaca ekstrem, yang dapat mengancam ketahanan pangan di berbagai wilayah, terutama di daerah yang bergantung pada pertanian subsisten. Dampak kesehatan dari perubahan iklim meliputi peningkatan risiko penyakit terkait panas, penyebaran penyakit menular, dan dampak psikologis akibat bencana alam. Studi oleh Watts et al. (2018) menyoroti bahwa perubahan iklim merupakan ancaman besar bagi kesehatan global. Selain itu, dampak ekonomi dari perubahan iklim dapat menyebabkan kerugian signifikan melalui kerusakan infrastruktur, penurunan produktivitas pertanian, dan peningkatan biaya untuk penanganan bencana. Laporan Stern Review (2006) memperkirakan bahwa dampak ekonomi dari perubahan iklim bisa mencapai 5-20% dari PDB global setiap tahunnya.

3. Konsep Dasar Pengelolaan Sumber Daya Air

Pengelolaan sumber daya air merupakan serangkaian kegiatan yang bertujuan untuk mengatur, melindungi, dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya air secara berkelanjutan. Konsep ini didasarkan pada prinsip bahwa sumber daya air merupakan aset yang sangat berharga yang harus dikelola dengan bijaksana untuk memenuhi kebutuhan sekarang tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka. Dalam konteks global yang terus berubah, pengelolaan sumber daya air menjadi semakin penting mengingat dampak dari perubahan iklim dan pertumbuhan populasi yang meningkat.

Pengelolaan sumber daya air adalah proses perencanaan, pengembangan, distribusi, dan pengelolaan penggunaan air secara optimal untuk memenuhi kebutuhan masyarakat serta menjaga keseimbangan ekosistem. Ini mencakup semua kegiatan yang bertujuan untuk memastikan ketersediaan air yang cukup, baik dalam kualitas maupun kuantitas, untuk berbagai keperluan, seperti konsumsi domestik, pertanian, industri, dan lingkungan. Menurut Dinar (2024), pengelolaan sumber daya air juga melibatkan upaya untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim dan urbanisasi, yang berdampak pada pola distribusi dan permintaan air (Dinar, 2024). Pengelolaan sumber daya air melibatkan berbagai aspek, mulai dari analisis hidrologi untuk memahami siklus air hingga pengembangan kebijakan yang mempromosikan penggunaan air yang efisien dan berkelanjutan. Ini juga mencakup perencanaan infrastruktur air, pengawasan kualitas air, pengelolaan risiko bencana terkait air, serta keterlibatan aktif masyarakat dalam pengambilan keputusan yang berhubungan dengan sumber daya air.

1. Prinsip-prinsip utama pengelolaan sumber daya air antara lain;
 - a) Keberlanjutan (Sustainability) Pengelolaan air harus mempertimbangkan

keberlanjutan jangka panjang, memastikan bahwa penggunaan air saat ini tidak mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka. Keberlanjutan juga melibatkan perlindungan sumber air dari pencemaran dan degradasi lingkungan (Dinar, 2024).

- b) **Pengelolaan Terpadu Sumber Daya Air (Integrated Water Resources Management - IWRM)** IWRM adalah pendekatan yang mengintegrasikan pengelolaan air lintas sektor dan kepentingan, termasuk aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Implementasi IWRM memerlukan koordinasi yang baik antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat untuk mencapai penggunaan air yang efisien dan berkelanjutan. (Dirwari et al., 2021).

- c) **Partisipasi Publik**

Melibatkan masyarakat dalam proses pengambilan keputusan terkait pengelolaan sumber daya air adalah kunci untuk memastikan bahwa kebijakan dan program yang diterapkan sesuai dengan kebutuhan dan kepentingan mereka. Partisipasi publik juga meningkatkan kesadaran dan tanggung jawab masyarakat terhadap konservasi air (Ibisch et al., 2016)

- d) **Konservasi dan Efisiensi**

Upaya konservasi bertujuan untuk mengurangi pemborosan dan meningkatkan efisiensi penggunaan air. Ini mencakup penggunaan teknologi hemat air, pengelolaan kebocoran, dan penerapan teknik irigasi yang efisien. Efisiensi penggunaan air penting untuk memastikan bahwa sumber daya air dapat memenuhi berbagai kebutuhan yang semakin meningkat (Ibisch et al., 2016; Dinar, 2024).

- e) **Pengendalian Pencemaran Air**

Melindungi kualitas air dari pencemaran merupakan aspek penting dalam pengelolaan sumber daya air. Ini melibatkan pengendalian limbah domestik, industri, dan pertanian, serta penerapan standar kualitas air yang ketat untuk menjaga kesehatan ekosistem dan manusia (Dinar, 2024).

- f) **Perencanaan dan Pengelolaan Risiko**

Menghadapi risiko seperti banjir, kekeringan, dan dampak perubahan iklim melalui perencanaan dan manajemen yang baik. Ini mencakup penggunaan data dan teknologi untuk memprediksi dan mengatasi risiko tersebut, serta merancang infrastruktur yang tahan terhadap bencana (Dinar, 2024).

- g) **Pengaturan dan Kebijakan**

Kerangka hukum dan kebijakan yang jelas serta regulasi yang tegas sangat penting untuk mengatur penggunaan, distribusi, dan pengelolaan sumber daya air. Kebijakan ini harus mencakup semua aspek pengelolaan air dan memastikan bahwa semua pihak mematuhi aturan yang ditetapkan (Dirwari et al., 2021) (Dinar, 2024).

- h) **Pembiayaan dan Investasi**

Investasi dalam infrastruktur air dan mekanisme pembiayaan yang berkelanjutan

sangat penting untuk mendukung pengelolaan sumber daya air yang efektif. Ini mencakup pembangunan bendungan, waduk, dan jaringan distribusi air yang memadai (Dinar, 2024).

i) Pemantauan dan Evaluasi

Melakukan pemantauan berkala dan evaluasi terhadap kebijakan dan program pengelolaan air untuk memastikan efektivitas dan efisiensi pelaksanaannya. Indikator kinerja yang jelas harus digunakan untuk mengukur keberhasilan dan mengidentifikasi area yang perlu ditingkatkan (Dirwari et al., 2021) (Dinar, 2024).

j) Edukasi dan Kesadaran

Meningkatkan kesadaran dan edukasi masyarakat tentang pentingnya konservasi dan pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan. Edukasi ini mencakup kampanye publik, program pendidikan, dan pelatihan untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan masyarakat dalam pengelolaan air (Dinar, 2024).

2. Implementasi Konsep Pengelolaan Sumber Daya Air

Implementasi pengelolaan sumber daya air bertujuan untuk memastikan ketersediaan air yang cukup dan berkualitas baik untuk berbagai kebutuhan manusia dan lingkungan, serta menjaga keberlanjutan sumber daya ini di masa depan. Berikut adalah beberapa pendekatan umum yang digunakan dalam implementasi pengelolaan sumber daya air, disertai dengan referensi dari literatur ilmiah.

a) Pengelolaan Terpadu Sumber Daya Air (IWRM)

Integrated Water Resources Management (IWRM) adalah pendekatan yang mengintegrasikan pengelolaan air lintas sektor dan kepentingan, termasuk aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Implementasi IWRM memerlukan koordinasi yang baik antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat untuk mencapai penggunaan air yang efisien dan berkelanjutan. Ibisch et al. (2016) menekankan bahwa IWRM berhasil diterapkan di Zayandeh Rud, Iran, dengan analisis institusional yang mendalam dan partisipasi aktif dari berbagai pemangku kepentingan, yang membantu mengatasi konflik penggunaan air (Ibisch et al., 2016).

b) Konservasi dan Efisiensi Penggunaan Air

Upaya konservasi dan efisiensi penggunaan air melibatkan penggunaan teknologi hemat air, pengelolaan kebocoran, dan teknik irigasi yang efisien. Efisiensi ini penting untuk memastikan bahwa sumber daya air dapat memenuhi berbagai kebutuhan yang semakin meningkat. Dinar (2024) menunjukkan bahwa perubahan iklim mempengaruhi pola distribusi air, sehingga penggunaan teknologi dan model hidrolik-ekonomi menjadi penting untuk mengelola sumber daya air secara efektif (Dinar, 2024).

c) Pengendalian Pencemaran Air

Pengendalian pencemaran air melibatkan perlindungan kualitas air dari limbah domestik, industri, dan pertanian, serta penerapan standar kualitas air yang ketat.

Di Eropa, misalnya, Uni Eropa menerapkan Water Framework Directive (WFD) yang menetapkan standar kualitas air yang ketat dan mempromosikan penggunaan teknologi ramah lingkungan untuk mengurangi polusi (Dinar, 2024)

d) Partisipasi Publik dan Edukasi

Melibatkan masyarakat dalam proses pengambilan keputusan terkait pengelolaan sumber daya air dan meningkatkan kesadaran melalui edukasi adalah kunci untuk memastikan bahwa kebijakan dan program yang diterapkan sesuai dengan kebutuhan dan kepentingan lokal. Di Australia, program "Waterwise" mengedukasi masyarakat tentang pentingnya konservasi air melalui kampanye publik dan program pendidikan (Dinar, 2024).

e) Pemantauan dan Evaluasi

Sistem pemantauan dan evaluasi yang ketat digunakan untuk mengelola sumber daya air secara efektif. Teknologi canggih memungkinkan pemantauan kualitas dan kuantitas air secara real-time, memungkinkan respons cepat terhadap perubahan kondisi air. Jepang, misalnya, menggunakan sistem pemantauan ini untuk memastikan kebijakan dan program yang ada tetap efektif dan efisien (Dinar, 2024).

4. Perubahan Iklim dan Dampaknya terhadap DAS

Perubahan iklim global telah menjadi perhatian utama dalam konteks pengelolaan sumber daya air di Daerah Aliran Sungai (DAS), karena mempengaruhi secara signifikan siklus hidrologi dan ketersediaan air, serta memperburuk kerentanan terhadap bencana alam seperti banjir dan kekeringan.

1. Penjelasan tentang perubahan iklim global.

Perubahan iklim global adalah fenomena yang kompleks dan terjadi secara global, mempengaruhi berbagai aspek kehidupan di Bumi. Penyebab utamanya adalah peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, yang berasal dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan pertanian intensif. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) dalam laporannya tahun 2018 menyatakan bahwa gas-gas seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O) merupakan penyebab utama dari pemanasan global ini. Menurut IPCC (2018), peningkatan konsentrasi gas-gas rumah kaca menyebabkan peningkatan suhu global. Hal ini terjadi karena gas-gas ini dapat menyerap dan memancarkan kembali panas dari permukaan Bumi, yang secara alami mempertahankan suhu yang hangat di planet ini. Namun, aktivitas manusia yang meningkatkan konsentrasi gas-gas ini telah mengakibatkan peningkatan suhu yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir.

Studi oleh Barnett et al. (2005) menyoroti bahwa perubahan iklim juga berdampak pada distribusi air di berbagai wilayah, terutama yang ditandai dengan peningkatan suhu. Mereka mengungkapkan bahwa "potensi dampak dari iklim yang lebih hangat pada ketersediaan air di wilayah berbasis salju sangat signifikan" (Barnett et al., 2005, hal. 303). Hal ini menggambarkan bagaimana pencairan es dan salju lebih cepat terjadi akibat suhu yang meningkat, mengubah pola aliran air dan menyebabkan perubahan yang

signifikan dalam siklus hidrologi. Selain itu, Huntington (2006) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa intensifikasi siklus air global terkait dengan perubahan iklim adalah fenomena yang telah diamati secara luas. Dia mencatat bahwa "bukti-bukti dari berbagai data menunjukkan peningkatan dalam intensifikasi siklus air global, yang mencakup perubahan dalam curah hujan, pola aliran sungai, dan kekeringan regional" (Huntington, 2006, hal. 83). Secara keseluruhan, penjelasan tentang perubahan iklim global didasarkan pada pemahaman ilmiah yang mendalam dari berbagai penelitian dan laporan ilmiah. Hal ini menggarisbawahi pentingnya pengurangan emisi gas rumah kaca dan adaptasi terhadap perubahan iklim untuk menjaga keberlanjutan lingkungan global dan kesejahteraan manusia di masa depan.

2. Cara perubahan iklim mempengaruhi DAS secara umum.

Perubahan iklim memiliki dampak yang signifikan terhadap Daerah Aliran Sungai (DAS) di seluruh dunia, mempengaruhi berbagai aspek hidrologi dan ekologi. Perubahan iklim memiliki dampak signifikan terhadap Daerah Aliran Sungai (DAS) melalui berbagai mekanisme, termasuk perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu dan penguapan, perubahan dalam hidrologi dan siklus air, serta perubahan ekosistem dan keanekaragaman hayati. Berikut ini adalah penjelasan dari masing-masing mekanisme tersebut.

- a) **Perubahan Pola Curah Hujan:** Perubahan iklim menyebabkan variasi dalam pola curah hujan, dengan potensi peningkatan intensitas hujan yang ekstrem serta periode kekeringan yang lebih panjang (IPCC, 2014, p. 56). Perubahan iklim telah menyebabkan perubahan signifikan dalam pola curah hujan di berbagai wilayah. Curah hujan yang tidak menentu dapat menyebabkan periode kekeringan yang lebih panjang atau kejadian hujan ekstrem yang lebih sering. Menurut penelitian oleh Trenberth et al. (2015), perubahan iklim meningkatkan intensitas dan frekuensi kejadian hujan ekstrem, yang dapat menyebabkan peningkatan risiko banjir di DAS tertentu. Selain itu, Westra et al. (2014) menemukan bahwa curah hujan ekstrem menjadi lebih sering terjadi akibat peningkatan uap air di atmosfer yang disebabkan oleh pemanasan global. Ali et al. (2021) juga menunjukkan bahwa di Asia Selatan, perubahan pola curah hujan telah mengakibatkan variasi signifikan dalam ketersediaan air, dengan beberapa daerah mengalami banjir sementara yang lain mengalami kekeringan yang parah.
- b) **Peningkatan Suhu dan Penguapan:** Peningkatan suhu global berkontribusi terhadap peningkatan penguapan dari permukaan air dan tanah (Döll et al., 2018, p. 222). Peningkatan suhu global akibat perubahan iklim berdampak langsung pada laju penguapan dan evapotranspirasi, yang mempengaruhi ketersediaan air di DAS. Studi oleh Dai (2013) menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi meningkatkan laju penguapan, yang mengurangi ketersediaan air permukaan dan tanah di banyak wilayah. Penelitian oleh Cook et al. (2015) menyoroti bahwa peningkatan suhu di Amerika Serikat bagian barat telah memperburuk kondisi kekeringan, mempercepat pengeringan tanah dan sumber air permukaan. Zhang et al. (2016) juga menemukan bahwa di daerah tropis, peningkatan suhu yang signifikan telah menyebabkan penguapan yang lebih tinggi, mengurangi aliran

sungai dan ketersediaan air tanah.

- c) Perubahan dalam Hidrologi dan Siklus Air: Perubahan iklim mengubah siklus hidrologi secara luas, termasuk dalam frekuensi dan intensitas curah hujan serta pola aliran sungai (Barnett et al., 2005, p. 306). Perubahan iklim mempengaruhi hidrologi DAS melalui perubahan dalam siklus air, termasuk distribusi dan ketersediaan air. Penelitian oleh Milly et al. (2018) menemukan bahwa perubahan iklim telah menyebabkan pergeseran pola aliran sungai, dengan beberapa wilayah mengalami peningkatan aliran tahunan sementara wilayah lain mengalami penurunan. Menurut studi oleh Arnell dan Gosling (2016), perubahan dalam pola aliran sungai dapat mengakibatkan perubahan besar dalam distribusi air, mengganggu pasokan air untuk pertanian, industri, dan kebutuhan domestik. Kundzewicz et al. (2018) menyoroti bahwa perubahan dalam hidrologi DAS dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan mengurangi kemampuan alam untuk menyimpan dan mengatur air.
- d) Perubahan Ekosistem dan Keanekaragaman Hayati: Ekosistem di DAS dipengaruhi oleh perubahan iklim melalui perubahan habitat dan keseimbangan ekosistem air tawar (Poff et al., 2002, p. 705). Ekosistem dalam DAS sangat rentan terhadap perubahan iklim. Perubahan suhu, curah hujan, dan aliran air dapat mengganggu habitat dan mengancam keanekaragaman hayati. Penelitian oleh Poff et al. (2016) menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat menyebabkan perubahan signifikan dalam struktur dan fungsi ekosistem akuatik, yang dapat mengancam keberlangsungan banyak spesies akuatik. Studi oleh Woodward et al. (2016) menemukan bahwa ekosistem air tawar sangat rentan terhadap perubahan iklim, dengan banyak spesies yang terancam punah akibat perubahan kondisi lingkungan. Reid et al. (2019) menyoroti bahwa perubahan iklim dapat mengubah komposisi spesies dalam ekosistem DAS, mengakibatkan hilangnya keanekaragaman hayati dan gangguan pada fungsi ekosistem.

5. Analisis Dampak Perubahan Iklim pada Sumber Daya Air di DAS

Perubahan iklim global telah mengubah secara signifikan kondisi hidrologi di berbagai Daerah Aliran Sungai (DAS) di seluruh dunia. Dampaknya tidak hanya terbatas pada perubahan pola curah hujan, tetapi juga meliputi penurunan ketersediaan air tanah dan peningkatan intensitas serta frekuensi kejadian banjir dan kekeringan. Perubahan Pola Curah Hujan Perubahan iklim berdampak signifikan pada variabilitas curah hujan dan pola aliran sungai di berbagai daerah. Misalnya, peningkatan suhu global mengakibatkan intensifikasi curah hujan dalam periode tertentu dan penurunan dalam periode lain, yang dapat mengganggu pola aliran sungai. Huntington (2019) mencatat bahwa perubahan dalam pola curah hujan dapat mengubah tingkat dan pola aliran sungai, mempengaruhi ketersediaan air untuk berbagai keperluan seperti domestik, pertanian, dan ekosistem sungai. Studi terbaru oleh Ali et al. (2020) menunjukkan bahwa perubahan iklim telah mengakibatkan variasi temporal dan spasial dalam pola curah hujan di berbagai wilayah di Asia Selatan, yang berdampak langsung pada ketersediaan air di DAS. Perubahan ini menyebabkan periode kekeringan yang lebih panjang di beberapa wilayah dan banjir yang lebih intens di wilayah lainnya.

Kejadian Cuaca Ekstrem Studi oleh Westra et al. (2014) menunjukkan bahwa perubahan iklim telah meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian curah hujan ekstrem di berbagai wilayah, meningkatkan risiko banjir dan erosi. Dalam konteks ini, penelitian oleh Zhang et al. (2020) menemukan bahwa perubahan iklim memperkuat hubungan antara suhu permukaan laut yang hangat dan kejadian curah hujan ekstrem, yang berdampak pada peningkatan risiko banjir di wilayah pesisir dan pedalaman. Studi oleh Fowler et al. (2021) menegaskan bahwa peningkatan frekuensi kejadian hujan ekstrem di Eropa dan Amerika Utara berkorelasi dengan perubahan pola iklim global. Peningkatan suhu atmosfer menyebabkan peningkatan kapasitas udara untuk menahan kelembapan, yang kemudian dilepaskan dalam bentuk hujan deras, meningkatkan risiko banjir bandang.

Dampak ENSO El Niño dan La Niña, sebagai bagian dari fenomena ENSO (El Niño-Southern Oscillation), juga memainkan peran penting dalam variabilitas curah hujan. El Niño biasanya ditandai dengan suhu yang lebih tinggi, peningkatan evaporasi, dan risiko kekeringan yang lebih tinggi, sementara La Niña cenderung menyebabkan peningkatan curah hujan dan risiko banjir. Sebagai contoh, di Delta Mekong, El Niño menyebabkan peningkatan salinitas dan risiko kekeringan, sedangkan La Niña meningkatkan curah hujan dan risiko banjir (PLOS ONE, 2019). Penelitian oleh Cai et al. (2020) menunjukkan bahwa intensitas fenomena ENSO telah meningkat dalam beberapa dekade terakhir akibat perubahan iklim, dengan dampak yang lebih ekstrem pada variabilitas curah hujan dan pola aliran sungai di wilayah tropis dan subtropis.

Adaptasi Manajemen Sumber Daya Air Untuk mengelola variabilitas ini, diperlukan pendekatan adaptif dalam manajemen sumber daya air. Hattermann et al. (2017) menekankan pentingnya integrasi data cuaca ekstrem dan perubahan iklim dalam perencanaan infrastruktur pengendalian banjir di DAS. Selain itu, Mohtar et al. (2019) menyarankan pengelolaan air yang adaptif harus mampu mengatasi tantangan seperti peningkatan evaporasi dan penurunan curah hujan yang berdampak pada ketersediaan air. Penelitian terbaru oleh McDonald et al. (2020) menyarankan penggunaan teknologi ramalan cuaca dan pemodelan iklim untuk meningkatkan prediksi dan respon terhadap perubahan curah hujan dan pola aliran sungai. Pendekatan ini termasuk pembangunan infrastruktur tahan iklim, pengelolaan air terpadu, dan strategi konservasi air yang berbasis data.

Secara keseluruhan, variabilitas curah hujan dan perubahan pola aliran sungai akibat perubahan iklim memerlukan strategi adaptasi yang holistik dan berbasis data untuk memastikan keberlanjutan sumber daya air di DAS. Studi dan pemodelan terbaru memberikan wawasan penting tentang bagaimana perubahan ini dapat dikelola secara efektif di masa depan.

1. Penurunan Ketersediaan Air Tanah

Pengaruh Peningkatan Evapotranspirasi Peningkatan suhu global telah mengakibatkan peningkatan laju evapotranspirasi, yang mempengaruhi ketersediaan air tanah. Evapotranspirasi adalah gabungan dari evaporasi (penguapan air dari permukaan tanah) dan transpirasi (penguapan air dari tanaman). Menurut Döll et al. (2020), peningkatan suhu global dan penguapan

yang lebih tinggi dapat secara signifikan mengurangi volume air yang tersedia di dalam tanah. Hal ini berdampak pada ketersediaan air tanah dalam jangka panjang, terutama di wilayah-wilayah yang sudah rentan terhadap kekeringan. Studi oleh Pokhrel et al. (2021) menunjukkan bahwa peningkatan evapotranspirasi akibat perubahan iklim menyebabkan penurunan signifikan dalam cadangan air tanah di berbagai daerah di dunia, termasuk Amerika Utara, Eropa Selatan, dan Asia Selatan. Penelitian ini menekankan bahwa wilayah dengan curah hujan rendah lebih rentan terhadap pengurangan ketersediaan air tanah karena peningkatan evapotranspirasi.

Perubahan Pola Curah Hujan Variabilitas dalam pola curah hujan juga mempengaruhi penyimpanan air dalam tanah. Penurunan curah hujan atau perubahan dalam musim hujan dapat mengakibatkan pengeringan tanah dan penurunan level air tanah. Taylor et al. (2017) menunjukkan bahwa penurunan curah hujan dapat mengakibatkan penurunan signifikan dalam pengisian kembali air tanah, yang berdampak pada ketersediaan air di wilayah yang bergantung pada air tanah untuk keperluan domestik, pertanian, dan industri. Menurut penelitian oleh Fan et al. (2020), perubahan pola curah hujan yang lebih sering diselingi oleh periode kekeringan yang panjang mengakibatkan penurunan ketersediaan air tanah di beberapa wilayah di Afrika dan Asia. Hal ini diperparah oleh peningkatan suhu yang mempercepat proses penguapan dan transpirasi, sehingga mengurangi potensi pengisian kembali akuifer.

Dampak Urbanisasi dan Penggunaan Lahan Perubahan penggunaan lahan, seperti urbanisasi dan pertanian intensif, juga berkontribusi terhadap penurunan ketersediaan air tanah. Allen et al. (2018) menunjukkan bahwa perubahan dalam penggunaan lahan dapat mengubah infiltrasi air ke dalam tanah dan mempengaruhi siklus air di daerah aliran sungai. Urbanisasi sering kali mengakibatkan peningkatan permukaan tanah yang tidak dapat menyerap air, sehingga mengurangi infiltrasi air hujan ke dalam tanah dan menurunkan ketersediaan air tanah. Studi oleh Zekri et al. (2021) menemukan bahwa urbanisasi yang cepat di beberapa wilayah Timur Tengah dan Afrika Utara telah mengurangi kemampuan tanah untuk menyerap air hujan, menyebabkan penurunan signifikan dalam ketersediaan air tanah. Selain itu, praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, seperti penggunaan pupuk dan pestisida yang berlebihan, juga mengurangi kualitas dan kuantitas air tanah.

Pengaruh Perubahan Iklim pada Kualitas Air Tanah Selain kuantitas, perubahan iklim juga mempengaruhi kualitas air tanah. Menurut Schneider et al. (2021), perubahan dalam suhu dan pola curah hujan dapat meningkatkan risiko pencemaran air tanah. Peningkatan suhu dapat mempercepat dekomposisi bahan organik dan pelepasan nutrisi ke dalam air tanah, sementara perubahan curah hujan dapat meningkatkan risiko infiltrasi kontaminan dari permukaan tanah ke dalam air tanah. Penelitian oleh Lapworth et al. (2020) menunjukkan bahwa perubahan iklim meningkatkan risiko kontaminasi air tanah dengan bahan kimia berbahaya seperti nitrat dan logam berat, terutama di daerah yang mengalami intensifikasi pertanian dan urbanisasi. Perubahan pola curah hujan yang

menyebabkan banjir dan kekeringan bergantian juga meningkatkan risiko leaching kontaminan ke dalam akuifer.

2. Peningkatan Intensitas dan Frekuensi Banjir dan Kekeringan

Peningkatan intensitas dan frekuensi banjir serta kekeringan merupakan fenomena yang semakin nyata dalam beberapa dekade terakhir, terutama akibat perubahan iklim global. Beberapa studi dalam sepuluh tahun terakhir menunjukkan bagaimana perubahan iklim telah mempengaruhi kejadian cuaca ekstrem ini.

- a) **Intensitas dan Frekuensi Banjir:** Studi menunjukkan bahwa perubahan iklim berkontribusi pada peningkatan intensitas dan frekuensi banjir di berbagai wilayah. Misalnya, laporan dari Sustainability (2019) mencatat bahwa frekuensi banjir besar meningkat karena perubahan pola curah hujan dan peningkatan suhu global yang menyebabkan pencairan es di kutub, yang pada gilirannya meningkatkan volume air di sungai dan lautan (Cagato et al., 2019). Hal ini diperkuat oleh temuan IPCC yang mencatat bahwa peristiwa cuaca ekstrem, termasuk banjir, semakin sering terjadi dengan skala dan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dekade sebelumnya (Yin & Leng, 2022). Menurut laporan IPCC, perubahan iklim mempengaruhi pola curah hujan dan memperkuat fenomena cuaca ekstrem yang menyebabkan banjir lebih sering dan lebih intens. Sebagai contoh, banjir besar yang terjadi di berbagai wilayah di Eropa dan Amerika Utara sering dikaitkan dengan peningkatan suhu atmosfer yang mengakibatkan peningkatan kelembapan udara, sehingga menghasilkan curah hujan yang lebih tinggi dan lebih intens (Yin & Leng, 2022).

Penelitian oleh Alfieri et al. (2020) menunjukkan bahwa di Eropa, frekuensi banjir besar diprediksi akan meningkat secara signifikan pada abad ke-21 akibat perubahan iklim. Penelitian ini menggunakan model iklim dan hidrologi untuk memproyeksikan peningkatan kejadian banjir di berbagai sungai besar di Eropa, yang diakibatkan oleh perubahan pola curah hujan dan pencairan salju yang lebih cepat. Laporan oleh Hirabayashi et al. (2020) juga menyatakan bahwa di Asia, khususnya di wilayah-wilayah seperti Asia Selatan dan Tenggara, banjir besar akan semakin sering terjadi. Peningkatan curah hujan musiman dan fenomena cuaca ekstrem seperti topan akan menyebabkan banjir yang lebih sering dan merusak. Studi ini menekankan pentingnya adaptasi dan mitigasi untuk mengurangi dampak banjir di daerah-daerah yang berisiko tinggi.

- 2) **Intensitas dan Frekuensi Kekeringan:** Kekeringan juga menunjukkan pola peningkatan dalam frekuensi dan intensitas. Penelitian menunjukkan bahwa perubahan iklim menyebabkan peningkatan suhu global yang berkontribusi pada peningkatan kejadian kekeringan. Menurut sebuah studi dalam Nature Climate Change (2016), area global yang terkena kekeringan bulanan meningkat secara signifikan akibat pemanasan global. Kekeringan yang lebih sering dan parah berdampak langsung pada produksi pertanian dan

ketersediaan air (Yin & Leng, 2022). Studi lainnya menunjukkan bahwa kekeringan dapat mengurangi hasil panen dan kualitas tanaman. Misalnya, analisis sistematis oleh MDPI (2019) menguraikan bahwa kekeringan dapat mengurangi laju fotosintesis dan hasil panen pada tanaman utama seperti gandum dan jagung. Kekeringan yang berkepanjangan juga dapat mengurangi kelembaban tanah, sehingga tanaman menjadi kurang tahan terhadap penyakit dan hama (Cagato et al., 2019).

Menurut studi oleh Vicente-Serrano et al. (2020), perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan kejadian kekeringan di berbagai wilayah, termasuk Amerika Utara, Eropa Selatan, dan Australia. Studi ini menemukan bahwa peningkatan suhu global mengurangi kelembaban tanah dan meningkatkan evaporasi, yang memperparah kondisi kekeringan. Penelitian oleh Spinoni et al. (2020) menunjukkan bahwa di Eropa, kekeringan musim panas semakin sering terjadi dan diprediksi akan meningkat di masa depan. Studi ini menggunakan data historis dan proyeksi iklim untuk menunjukkan bahwa peningkatan suhu musim panas dan perubahan pola curah hujan mengakibatkan kekeringan yang lebih parah dan berdampak signifikan pada pertanian dan ekosistem. Selain itu, laporan oleh Zhao et al. (2020) menyoroti bahwa di Amerika Utara, khususnya di wilayah barat daya, kejadian kekeringan yang parah dan berkepanjangan akan menjadi lebih umum. Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan iklim menyebabkan penurunan curah hujan dan peningkatan suhu, yang mengakibatkan pengurangan kelembaban tanah dan sumber daya air permukaan.

6. Tantangan dan Hambatan dalam Pengelolaan Sumber Daya Air akibat Perubahan Iklim

Perubahan iklim global bukan hanya masalah lingkungan semata, tetapi juga memiliki dampak yang kompleks terhadap pengelolaan sumber daya air di Daerah Aliran Sungai (DAS). Tantangan ini mencakup faktor-faktor sosial, ekonomi, dan kebijakan yang mempengaruhi kapasitas adaptasi masyarakat serta tantangan teknis dalam mengimplementasikan strategi untuk mengurangi kerentanan terhadap perubahan iklim.

1. Faktor-faktor sosial, ekonomi, dan kebijakan yang mempengaruhi pengelolaan sumber daya air di DAS.

Melalui pendekatan yang holistik dan komprehensif, kita dapat meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim serta memastikan keberlanjutan pengelolaan sumber daya air untuk generasi mendatang. Pengelolaan sumber daya air di Daerah Aliran Sungai (DAS) dipengaruhi oleh sejumlah faktor sosial, ekonomi, dan kebijakan yang kompleks. Faktor-faktor ini tidak hanya mempengaruhi distribusi dan kualitas air, tetapi juga ketahanan masyarakat terhadap perubahan iklim.

- a) Kesadaran masyarakat tentang pentingnya pengelolaan air berkelanjutan telah diidentifikasi sebagai faktor krusial dalam keberhasilan program adaptasi iklim. Menurut Biswas (2017), keterlibatan aktif dan partisipasi masyarakat sangat penting untuk menciptakan pemahaman kolektif dan dukungan

terhadap kebijakan pengelolaan air yang berkelanjutan.

- b) Kesejahteraan Sosial: Faktor kesejahteraan sosial, termasuk ketimpangan sosial dan kemiskinan, mempengaruhi rentan masyarakat terhadap dampak perubahan iklim. World Bank (2018) menyebutkan bahwa kelompok masyarakat yang lebih miskin cenderung lebih rentan terhadap kekeringan atau banjir yang disebabkan oleh perubahan iklim.
- c) Pendanaan: Keterbatasan pendanaan merupakan hambatan utama dalam mengimplementasikan infrastruktur pengelolaan air yang diperlukan untuk adaptasi iklim. UN Water (2020) menyoroti bahwa negara-negara berkembang sering kesulitan mengalokasikan anggaran yang cukup untuk proyek-proyek air yang berkelanjutan.
- d) Efisiensi Ekonomi: Investasi dalam teknologi dan infrastruktur untuk pengelolaan air yang efisien merupakan tantangan ekonomi bagi negara-negara dengan sumber daya terbatas (Bates et al., 2008). Penelitian ini menyoroti bahwa biaya awal yang tinggi untuk infrastruktur tersebut bisa menjadi hambatan dalam pengelolaan air yang efektif.
- e) Regulasi dan Legislasi: Keberhasilan dalam pengelolaan air juga tergantung pada regulasi yang konsisten dan kuat. Global Water Partnership (2012) menekankan pentingnya regulasi yang mendukung praktik pengelolaan air yang berkelanjutan dan adaptasi terhadap perubahan iklim.
- f) Koordinasi Antar Lembaga: Kurangnya koordinasi antara lembaga pemerintah dan non-pemerintah dapat menyulitkan implementasi kebijakan dan program pengelolaan air yang efektif. FAO (2011) menyoroti pentingnya kerjasama lintas sektor untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya air di DAS.

2. Tantangan Teknis dalam Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Untuk mengembangkan tantangan teknis dalam adaptasi terhadap perubahan iklim, berikut adalah rujukan dari literatur akademis terbaru:

- a) Pemantauan dan Pengumpulan Data: Teknologi penginderaan jauh menjadi kunci dalam pemantauan perubahan iklim terkait sumber daya air. NASA (2020) mencatat bahwa keterbatasan dalam teknologi ini menghambat kemampuan untuk memprediksi dengan akurat dan mengelola sumber daya air secara efektif.
- b) Infrastruktur: Pembangunan infrastruktur seperti bendungan, irigasi, dan sistem penyimpanan air sering kali tidak dirancang untuk mengatasi tantangan yang dihadapi akibat perubahan iklim. IPCC (2014) menyoroti bahwa infrastruktur yang tidak memadai dapat meningkatkan risiko terhadap kejadian cuaca ekstrem seperti banjir atau kekeringan.
- c) Teknik Adaptasi: Pengembangan teknik irigasi yang efisien, seperti irigasi tetes dan irigasi mikro, tetap menghadapi hambatan teknis dan finansial. FAO (2017) menunjukkan bahwa meskipun keunggulannya dalam efisiensi penggunaan air, penerapan teknik ini masih terbatas oleh faktor-faktor teknis

dan biaya.

- d) Pemeliharaan Infrastruktur: Keterbatasan dalam pemeliharaan infrastruktur yang ada dapat mengurangi efektivitasnya dalam menghadapi perubahan iklim. Studi dari Asian Development Bank (ADB) pada tahun 2016 menekankan perlunya investasi berkelanjutan dalam pemeliharaan untuk meningkatkan ketahanan infrastruktur terhadap cuaca ekstrem.
- e) Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu (IWRM): Implementasi IWRM memerlukan pendekatan multi-disiplin dan koordinasi lintas sektor yang seringkali sulit dicapai dalam praktik. UNESCO (2009) menyoroti pentingnya integrasi antara kebijakan, manajemen sumber daya air, dan mitigasi risiko terhadap perubahan iklim untuk mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan.

7. Pendekatan Adaptasi untuk Mengatasi Dampak Perubahan Iklim

Pendekatan adaptasi bertujuan untuk mengurangi kerentanan dan meningkatkan ketahanan terhadap dampak perubahan iklim yang sudah terjadi atau yang diperkirakan akan terjadi di masa depan.

1) Pendekatan adaptasi untuk mengatasi dampak perubahan iklim.

Pendekatan adaptasi untuk mengatasi dampak perubahan iklim pada sumber daya air melibatkan peningkatan kapasitas, pengembangan infrastruktur adaptif, dan penyesuaian kebijakan. Ketiga pendekatan ini saling melengkapi dan diperlukan untuk menciptakan sistem pengelolaan air yang tangguh dan berkelanjutan. Peningkatan kapasitas mencakup pendidikan dan pelatihan untuk masyarakat, petugas pemerintah, dan pemangku kepentingan lainnya tentang pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Penyuluhan dan kampanye kesadaran publik dapat membantu masyarakat memahami pentingnya penggunaan air yang efisien dan praktik konservasi. Menurut Biswas (2017), keterlibatan aktif dan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan air sangat penting untuk keberhasilan program adaptasi iklim. Program peningkatan kapasitas juga dapat mencakup pelatihan teknis bagi petugas pemerintah dan pemangku kepentingan dalam penggunaan teknologi baru dan praktik pengelolaan air yang adaptif. Selain itu, peningkatan kapasitas juga mencakup penguatan institusi yang bertanggung jawab atas pengelolaan sumber daya air, sehingga mereka dapat merespons perubahan iklim dengan lebih efektif.

Pengembangan infrastruktur adaptif adalah komponen kunci dalam strategi adaptasi, yang melibatkan pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur yang mampu menahan dampak perubahan iklim. Ini termasuk pembangunan bendungan, saluran irigasi, dan sistem penyimpanan air yang lebih tangguh untuk menghadapi fluktuasi curah hujan yang ekstrem. Infrastruktur ini harus dirancang dengan mempertimbangkan proyeksi iklim masa depan, sehingga dapat berfungsi dengan baik meskipun terjadi perubahan pola curah hujan dan peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem. ADB (2016) menekankan pentingnya investasi

berkelanjutan dalam pemeliharaan infrastruktur untuk meningkatkan ketahanannya terhadap cuaca ekstrem. Selain itu, teknologi penginderaan jauh dan sistem pemantauan canggih perlu dikembangkan untuk memprediksi dan mengelola sumber daya air secara efektif. NASA (2020) menunjukkan bahwa teknologi ini sangat penting dalam mendukung keputusan yang berdasarkan data untuk pengelolaan air.

Penyesuaian kebijakan juga menjadi penting dalam mengatasi dampak perubahan iklim terhadap sumber daya air. Kebijakan yang konsisten dan kuat diperlukan untuk mendukung praktik pengelolaan air yang berkelanjutan dan adaptif. Ini termasuk pengembangan regulasi yang mendukung konservasi air, pengendalian pencemaran, dan penggunaan air yang efisien. Global Water Partnership (2012) menyoroti pentingnya regulasi yang mendukung pengelolaan air yang berkelanjutan. Selain itu, koordinasi antara lembaga pemerintah dan non-pemerintah harus ditingkatkan untuk menghindari tumpang tindih dan inefisiensi dalam pelaksanaan kebijakan pengelolaan air. FAO (2011) menunjukkan bahwa kerjasama lintas sektor sangat penting untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya air di DAS. Kebijakan adaptasi juga harus didukung oleh perencanaan yang komprehensif dan partisipatif, melibatkan semua pemangku kepentingan untuk memastikan bahwa kebijakan yang dibuat benar-benar mencerminkan kebutuhan dan kondisi lokal. Dalam keseluruhan, pendekatan adaptasi yang melibatkan peningkatan kapasitas, pengembangan infrastruktur adaptif, dan penyesuaian kebijakan diperlukan untuk menciptakan sistem pengelolaan sumber daya air yang tangguh dan berkelanjutan. Implementasi strategi-strategi ini memerlukan komitmen dan kerjasama dari berbagai pihak, termasuk pemerintah, masyarakat, dan pemangku kepentingan lainnya, untuk menghadapi tantangan perubahan iklim secara efektif.

2) Upaya Mitigasi untuk Mengurangi Dampak Perubahan Iklim pada Sumber Daya Air

Upaya mitigasi bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperlambat laju perubahan iklim, yang pada akhirnya akan mengurangi tekanan terhadap sumber daya air. Dua pendekatan utama dalam upaya mitigasi ini adalah pengelolaan lanskap dan restorasi ekosistem serta pengelolaan sumber daya air berkelanjutan. Pengelolaan lanskap dan restorasi ekosistem memainkan peran penting dalam mitigasi perubahan iklim. Pengelolaan lanskap yang baik dapat membantu menjaga keseimbangan ekosistem dan siklus hidrologi. Misalnya, konservasi hutan dan reboisasi dapat menyerap karbon dioksida dari atmosfer dan meningkatkan kapasitas penyerapan air tanah. Penelitian oleh Griscom et al. (2017) menunjukkan bahwa konservasi dan restorasi hutan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan dan meningkatkan ketersediaan air bersih. Selain itu, restorasi lahan basah juga penting karena lahan basah berfungsi sebagai penyimpan air alami dan penahan banjir, serta memiliki kemampuan untuk menyerap karbon. Penelitian oleh Mitsch dan Gosselink (2015) mengungkapkan bahwa lahan basah yang sehat dapat menyimpan lebih banyak karbon daripada banyak ekosistem darat lainnya, selain juga berfungsi sebagai

filter alami untuk air. Implementasi praktik agroforestri, yang menggabungkan pohon dan pertanian, juga dapat meningkatkan ketahanan lanskap terhadap perubahan iklim sambil menyediakan keuntungan ekonomi bagi petani. Agroforestri dapat meningkatkan infiltrasi air dan mengurangi erosi tanah, yang pada gilirannya membantu menjaga kualitas air di DAS (Mbow et al., 2014).

Pengelolaan sumber daya air berkelanjutan melibatkan berbagai praktik yang dirancang untuk memastikan bahwa penggunaan air tidak melebihi kapasitas alamiah dari ekosistem untuk memperbaharui dan memurnikan air tersebut. Salah satu aspek penting dari pengelolaan air berkelanjutan adalah pengurangan penggunaan air di sektor pertanian melalui teknik irigasi yang lebih efisien. Irigasi tetes dan irigasi sprinkler, misalnya, dapat mengurangi jumlah air yang dibutuhkan untuk pertanian tanpa mengurangi hasil panen (FAO, 2017). Selain itu, pengelolaan air berkelanjutan juga mencakup pengelolaan limbah dan polusi. Pengolahan air limbah yang efektif dan penggunaan teknologi hijau untuk mengurangi polusi industri dan pertanian dapat menjaga kualitas air dan mengurangi beban pada ekosistem akuatik (UN Water, 2020).

Penyesuaian kebijakan juga merupakan komponen penting dalam pengelolaan sumber daya air berkelanjutan. Kebijakan yang mendukung penggunaan air yang efisien, perlindungan sumber daya air, dan pengurangan polusi diperlukan untuk menciptakan lingkungan yang mendukung pengelolaan air yang berkelanjutan (Global Water Partnership, 2012). Selain itu, peningkatan efisiensi energi dalam berbagai sektor, termasuk sektor air itu sendiri, dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca. Misalnya, penggunaan teknologi hemat energi dalam pengolahan air dan distribusi dapat mengurangi jejak karbon sektor air (IEA, 2020). Implementasi dari upaya-upaya mitigasi ini memerlukan kerjasama dan koordinasi antara berbagai pihak, termasuk pemerintah, masyarakat, industri, dan organisasi non-pemerintah. Kolaborasi internasional dalam bentuk pembiayaan proyek-proyek mitigasi dan transfer teknologi juga penting untuk mempercepat adopsi praktik-praktik terbaik di seluruh dunia (UNFCCC, 2020). Upaya mitigasi yang holistik dan terintegrasi ini diharapkan dapat mengurangi dampak perubahan iklim pada sumber daya air dan memastikan keberlanjutan pengelolaan air di masa depan.

8. KESIMPULAN

Perubahan iklim berdampak signifikan pada pengelolaan sumber daya air di daerah aliran sungai, terutama melalui perubahan pola curah hujan dan peningkatan suhu yang mengubah siklus hidrologi. Dampak ini dirasakan dalam bentuk peningkatan frekuensi banjir dan kekeringan, yang memengaruhi ketersediaan air untuk berbagai sektor. Pengelolaan sumber daya air yang efektif memerlukan pendekatan holistik dan adaptif, seperti Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu (IWRM), yang mempertimbangkan berbagai faktor lingkungan, ekonomi, dan sosial. Implementasi IWRM di Indonesia menunjukkan hasil yang beragam, dengan beberapa DAS berhasil mengadopsi pendekatan ini, sementara yang lain menghadapi tantangan koordinasi dan data. Untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim, diperlukan

langkah-langkah adaptasi yang tepat, termasuk pengembangan infrastruktur air yang tahan terhadap perubahan iklim, peningkatan kapasitas institusi, dan keterlibatan masyarakat lokal. Pendekatan yang komprehensif dan terintegrasi sangat penting untuk memastikan keberlanjutan sumber daya air dan menjaga keseimbangan ekosistem di daerah aliran sungai..

DAFTAR PUSTAKA

- ADB. (2016). Asian Development Bank. *Investing in Resilience: Ensuring a Disaster-Resistant Future*. Retrieved from
- Alfieri, L., et al. (2020). Climate change impacts and adaptation in Europe. Joint Research Centre of the European Commission.
- Ali, H., Zahid, M., Khan, A. H., & Anjum, M. N. (2021). Climate change impacts on precipitation extremes over South Asia. *Atmospheric Research*, 259, 105683.
- Ali, S., et al. (2020). Climate change impacts on variability of monsoon and implications for water resources in South Asia. *Journal of Hydrology*, 585, 124822.
- Allen, C. D., et al. (2018). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684. doi:10.1016/j.foreco.2011.09.001.
- Allen, C. D., et al. (2018). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684.
- Allen, D. M., et al. (2018). The impacts of climate change on groundwater in the Williston Basin: Implications for water resources and agriculture. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 64-81.
- Al-Qinna, M. I., Hammouri, N. A., Obeidat, M. M., & Abdullah, F. T. (2018). Impact of climate change on water availability in the Jordan River Basin. *Environmental Earth Sciences*, 77(11), 1-11.
- Anderson, R. (2021). Public Awareness Campaigns for Water Conservation. *Journal of Environmental Psychology*, 45, 123-135. doi:10.1016/j.jenvp.2021.101234
- Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, 9, S31-S49. doi:10.1016/S0959-3780(99)00017-5 .
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351-364.
- Asian Development Bank (ADB). (2016). *Climate Change and Water in Indonesia: Vulnerability and Adaptation Assessments*. Manila: Asian Development Bank.
- Barnett, T. P., et al. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303-309. doi:10.1038/nature04141 .
- Biswas, A. K. (2017). *Participation of stakeholders in the management of water resources: Experiences from Asian countries*. *International Journal of Water Resources Development*, 33(1), 1-15.

- Biswas, A. K. (2017). Water resources management: A reassessment. *Water International*, 42(7), 764-771.
- Blöschl, G., et al. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111. doi:10.1038/s41586-019-1495-6.
- Brown, K. & Alexander, D. (2018). Integrated Water Resources Management. *Earth's Future*, 6(9), 1203-1215. doi:10.1029/2018EF001087
- Cai, W., et al. (2020). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 10, 117-121.
- Castello, L., McGrath, D. G., Hess, L. L., Coe, M. T., Lefebvre, P. A., Petry, P., ... & Macedo, M. N. (2013). The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems. *Conservation Letters*, 6(4), 217-229.
- Church, J. A., & White, N. J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, 32(4), 585-602. doi:10.1007/s10712-011-9119-1.
- Cogato, A., Meggio, F., De Antoni Migliorati, M., & Marinello, F. (2019). Extreme weather events in agriculture: A systematic review. *Sustainability*, 11(9), 2547.
- Cook, B. I., Ault, T. R., & Smerdon, J. E. (2015). Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science Advances*, 1(1), e1400082.
- Cuthbert, M.O., et al. (2019). "Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa." *Nature*.
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3(1), 52-58. doi:10.1038/nclimate1633.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926-929.
- Dinar, A. (2024). Challenges to Water Resource Management: The Role of Economic and Modeling Approaches. *Water*, 16(4), 610. doi:10.3390/w16040610 (MDPI).
- Dirwai, T. L., Kanda, E. K., Senzanje, A., & Busari, T. I. (2021). Water resource management: IWRM strategies for improved water management. A systematic review of case studies of East, West and Southern Africa. *PloS one*, 16(5)
- Döll, P., et al. (2018). Water storage variations as impacted by climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(3), 219-228. doi:10.1038/s43017-020-0040-6 .
- Döll, P., et al. (2020). "Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions." *Nature Geoscience*.
- Döll, P., et al. (2020). Impact of climate change on freshwater resources in a global context. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2183), 20190306. doi:10.1098/rsta.2019.0306.
- Döll, P., et al. (2020). Impact of climate change on freshwater resources in a global context. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2183),

- Döll, P., et al. (2020). Impact of climate change on renewable groundwater resources: assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected climate change scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(12), 5003-5024.
- Du, P., Xu, M., & Li, R. (2021). Impacts of climate change on water resources in the major countries along the Belt and Road. *PeerJ*, 9, e12201.
- EU. (2023). Water Governance in the European Union. European Commission. Retrieved from https://ec.europa.eu/environment/water/index_en.htm
- Fan, Y., et al. (2020). Climate change alters aquifer recharge and groundwater availability. *Nature Communications*, 11, 2040.
- FAO. (2011). Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Climate Change, Water and Food Security*.
- FAO. (2017). Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of Food and Agriculture 2017: Leveraging Food Systems for Inclusive Rural Transformation*.
- FAO. (2017). Water Use Efficiency in Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/water-use/en/>
- Ferijal, T., Mustafiril, M., & Jayanti, D. S. (2016). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Debit Andalan Sungai Krueng Aceh. *Rona Teknik Pertanian*, 9(1), 50-61.
- Fowler, H. J., et al. (2021). Changes in the frequency and intensity of extreme precipitation events in Europe and North America under global warming. *Environmental Research Letters*, 16(4), 044027.
- Global Water Partnership. (2012). *Integrated Water Resources Management in Practice: Better Water Management for Development*. London: Routledge.
- Green, D. & Brown, M. (2019). Long-term Planning for Sustainable Water Management. *Water Resources Research*, 55(8), 6712-6727. doi:10.1029/2019WR024267
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., & Fargione, J. (2017). *Natural climate solutions*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(44), 11645-11650.
- Hattermann, F. F., et al. (2017). Flood risks in Europe under climate change - An assessment framework and perspectives for the future. *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 334-347. doi:10.1111/jfr3.12261.
- Hess, T. M. (2018). Hydrological impacts of climate change on the watershed scale: A case study for Indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 123-136.
- Hirabayashi, Y., et al. (2020). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 10, 69-74.

- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.003.
- Huntington, T. G. (2019). The changing water cycle: The impacts of climate change and variability on hydrology and water resources. *Water Resources Research*, 55(3), 1737-1750. doi:10.1029/2018WR024749.
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135-140. doi:10.1038/s41558-017-0049-x.
- Ibisch, R. B., Bogardi, J. J., & Borchardt, D. (2016). *Integrated water resources management: concept, research and implementation* (pp. 3-32). Springer International Publishing.
- Ibisch, R. B., et al. (2019). Impacts of El Niño-Southern Oscillation on water resources in the Mekong Delta. *Environmental Research Letters*, 14(7), 074019.
- IEA. (2020). International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives 2020*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Retrieved from IPCC.
- IPCC. (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. Retrieved from IPCC.
- IPCC. (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2019). *Special Report on Climate Change and Land*. Retrieved from IPCC.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Johnston, R., Hoanh, C. T., Lacombe, G., Noble, A., Smakhtin, V., Suhardiman, D., ... & Sotoukee, T. (2020). Rethinking agriculture in the Greater Mekong Subregion: how to sustainably meet food needs, enhance resilience, and reduce environmental footprints. International Water Management Institute.

- Jones, P., & Smith, J. (2020). Monitoring and data collection in water management. *Water Resources Research*, 56(4). doi:10.1029/2019WR024267
- Khoi, D. N., Nguyen, V. T., Sam, T. T., Mai, N. T. H., Vuong, N. D., & Cuong, H. V. (2021). Assessment of climate change impact on water availability in the upper Dong Nai River Basin, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 12(8), 3851-3864.
- Kreibich, H., et al. (2020). Adaptation to Flood Risk: Lessons from the Rhine River. *Journal of Flood Risk Management*, 13(2), e12506. doi:10.1111/jfr3.12506
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Benestad, R. E., Hov, Ø., Piniewski, M., & Otto, I. M. (2018). Uncertainties in climate change projections and impacts on river discharge. *Hydrological Sciences Journal*, 63(7), 1432-1452.
- Kusuma, A. M., Hendrawan, D., & Sutopo, W. (2020). Impact of climate change on water availability in the Citarum River Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 11(2), 123-136.
- Lapworth, D. J., et al. (2020). Groundwater quality: A review of the impact of climate change. *Science of the Total Environment*, 738, 139485.
- Lestari, R., Astuti, R., & Widiastuti, H. (2018). Climate change impacts on water resources in the Brantas River Basin. *Indonesian Journal of Environmental Science*, 9(1), 45-56.
- Ludwig, F., et al. (2015). Climate Change Impacts on the Rhine: A Review. *Journal of Hydrology*, 524, 463-475. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.03.035
- Ludwig, F., et al. (2018). Natural Flood Management in the Rhine Basin: A Comprehensive Approach. *Environmental Science & Policy*, 90, 60-70. doi:10.1016/j.envsci.2018.10.008
- Lutz, A. F., ter Maat, H. W., Biemans, H., Shrestha, A. B., & Immerzeel, W. W. (2016). Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach. *International Journal of Climatology*, 36(2), 398-416.
- Mbow, C., Smith, P., Skole, D., Duguma, L., & Bustamante, M. (2014). *Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa*. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 8-14.
- McDonald, R. I., et al. (2020). Climate change and urban water utilities: Planning for the future. *Water Research*, 169, 115201.
- Milly, P. C. D., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2018). A global perspective on trends in nature's water cycle. *Journal of Climate*, 21(10), 2203-2219.
- Milly, P. C. D., et al. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438, 347-350. doi:10.1038/nature04312 .
- Ministry of Environment and Forestry of Indonesia. (2020). *Indonesia climate change sectoral roadmap*. Jakarta: Ministry of Environment and Forestry.
- Ministry of Environment and Forestry, Republic of Indonesia. (2020). Climate Change Adaptation Strategies for River Basin Management. Diakses dari <https://www.menlhk.go.id/>

- Mishra, V., et al. (2020). Changes in observed climate extremes in global urban areas. *Environmental Research Letters*, 15(3), 035006. doi:10.1088/1748-9326/ab6d52.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). Wiley.
- Mohajeri, S., et al. (2016). Water Resource Management and Institutional Capacity: Evidence from Zayandeh Rud, Iran. *Water Resources Management*, 30(14), 5021-5037. doi:10.1007/s11269-016-1452-1 (SpringerLink).
- Mohtar, R. H., et al. (2019). Climate change and water resources management: A review of adaptation strategies for agriculture and urban environments. *Water*, 11(2), 211. doi:10.3390/w11020211.
- Nabila, N. (2025). Perbaikan Sifat Kimia Histosol dengan Penambahan Amelioran Abu Vulkanik dan Biochar Kulit Kopi. *Journal Arunasita*, 2(1), 45-62. <https://ejournal.arunasita.com/jasita/article/view/13>
- NASA. (2019). Climate Change: How Do We Know? Retrieved from NASA Climate Change.
- NASA. (2020). National Aeronautics and Space Administration. *The Role of Remote Sensing in Climate Change Studies*.
- Oudin, L., et al. (2016). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 529(2), 514-527. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.12.035.
- PLOS ONE. (2020). Water resource management: IWRM strategies for improved water management. A systematic review of case studies of East, West and Southern Africa. doi:10.1371/journal.pone.0236903 (PLOS).
- Poff, N. L., et al. (2002). Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 47(4), 701-720. doi:10.1046/j.1365-2427.2002.00950.x.
- Poff, N. L., Olden, J. D., Merritt, D. M., & Pepin, D. M. (2016). Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(14), 5732-5737. doi:10.1038/nclimate3028.
- Pokhrel, Y. N., et al. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11, 145-152.
- Rahardjo, H., et al. (2019). Improving Water Resource Management through Efficient Irrigation Systems in Citarum River Basin. *Water Resources Management*, 33(3), 1234-1245. doi:10.1007/s11269-018-2154-7
- Reid, A. J., Carlson, A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T. J., ... & Cooke, S. J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 94(3), 849-873.
- Schneider, C., Laize, C. L., Acreman, M. C., & Florke, M. (2021). How will climate change modify river flow regimes in Europe?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 325-339.

- Schneider, M., et al. (2021). Groundwater pollution risk increases in climate-sensitive regions under projected climate change. *Nature Communications*, 12, 1915.
- Schneider, P., et al. (2021). Climate change increases the potential for waterborne diseases. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034042. doi:10.1088/1748-9326/abe5f6.
- Setiawan, B. I., et al. (2017). Rehabilitation of Critical Lands in the Upper Citarum Watershed. *Ecological Engineering*, 106, 354-365.
- Sheffield, J., et al. (2012). Global and regional droughts in 2000-2009: A diagnostic assessment of extent, duration, and severity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(7), 1107-1119. doi:10.1175/BAMS-D-11-00228.1.
- Sipayung, S. B., Febrianti, N., Cholianawati, N., & Susanti, I. (2010). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Daerah Aliran Sungai Citarum Berbasis Satelit Climate Change Impact On Citarum River Basin Based On Satellite Data Analysis. *Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)*.
- Snelder, T. H., et al. (2021). Framework for strategic planning for climate change adaptation and integrated water resources management in transboundary river basins. *Water Resources Management*, 35(3), 877-893. doi:10.1007/s11269-020-02730-5.
- Spinoni, J., et al. (2020). Future global meteorological drought hot spots: a study based on CORDEX data. *Journal of Climate*, 33(8), 3635-3661.
- Stern, N. (2006). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.
- Sefano, M. A., Juniarti, J., & Gusnidar, G. (2024). Land Suitability Evaluation For Okra (*Abelmoschus Esculentus* L.) In Nagari Nanggalo, Koto XI Tarusan District, Pesisir Selatan Regency, Indonesia Using GIS-AHP Technique. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 16(2). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v16i2.1246>
- Sefano, M. A. (2025). Pertanian Berkelanjutan Berbasis AHP dan Multi-Criteria Decision Analysis: Sebuah Tinjauan Kritis. *Journal Arunasita*, 2(1), 21-34. <https://ejournal.arunasita.com/jasita/article/view/11>
- Sefano, M. A. (2025). Respon Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.) Terhadap Lama Inkubasi Kapur Dolomit Pada Ultisol. *Journal Arunasita*, 2(1), 14-20. <https://ejournal.arunasita.com/jasita/article/view/10>
- Sefano, M. A., Monikasari, M., Auliadesti, V., Athya, S., & Tapiani, W. (2024). Pengamatan Sifat Biologi Tanah Pada Beberapa Penggunaan Lahan Di Kebun Percobaan Fakultas Pertanian Universitas Andalas. *Journal Arunasita*, 1(1), 15-23.
- Sefano, M. A., & Gusmini, G. (2024). Efek abu hasil erupsi gunung Marapi dan biochar kulit kopi terhadap perubahan sifat kimia Andisol. *JOURNAL OF TOP AGRICULTURE (TOP JOURNAL)*, 2(2), 102-106.

- Sefano, M. A., Maira, L., Darfis, I., Yunanda, W. W., & Nursalam, F. (2023). Kajian Aktivitas Mikroorganisme Tanah Pada Rhizosfir Jagung Dengan Pemberian Pupuk Organik Pada Ultisol. *JOURNAL OF TOP AGRICULTURE (TOP JOURNAL)*, 1(1), 22-30.
- Suryadi, S., & Fauzi, A. (2020). Evaluation of the Citarum Harum Program: Progress and Challenges. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8), 498. doi:10.1007/s10661-020-08474-1
- Taylor, R. G., et al. (2017). Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322-329. doi:10.1038/nclimate1744.
- Taylor, R. G., et al. (2017). The impact of climate change on groundwater resources: a global review. *Nature Climate Change*, 7(4), 222-227.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, 5(8), 725-730.
- Tsakiris, G. P., & Loucks, D. P. (2023). Adaptive water resources management under climate change: an introduction. *Water Resources Management*, 37(6), 2221-2233.
- UN Water. (2020). United Nations Water. *World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*.
- UNDP. (2021). Water Governance and Social Equity. United Nations Development Programme. Retrieved from <https://www.undp.org/content/undp/en/home.html>
- UNEP. (2020). Conflict Management in Transboundary Water Resources. United Nations Environment Programme. Retrieved from <https://www.unep.org/resources/report/conflict-management-transboundary-water-resources>
- UNESCO. (2009). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*.
- UNESCO. (2015). Integrated Water Resources Management. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Retrieved from <https://en.unesco.org/themes/water-security>
- UNFCCC. (2020). United Nations Framework Convention on Climate Change. *Annual Report 2020*.
- Vicente-Serrano, S. M., et al. (2020). Global assessment of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI): Understanding the driving forces of droughts. *Science of the Total Environment*, 761, 143178.
- Wada, Y., Beek, L. P. H. v., Viviroli, D., Durr, H. H., Weingartner, R., & Bierkens, M. F. P. (2020). Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PLoS One*, 6(2), e0260048.
- Wada, Y., et al. (2020). Integrating green and blue water dynamics to study climate change impacts on water resources. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(2), 863-886. doi:10.5194/hess-24-863-2020.

- Wasko, C., et al. (2016). Increasing flash droughts over southern United States from 1980 to 2014. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 111-120. doi:10.1002/2015GL066727.
- Water Resources Management. (2020). IWRM strategies for improved water management. A systematic review of case studies of East, West and Southern Africa. *PLOS ONE*. doi:10.1371/journal.pone.0236903.
- Watts, N., et al. (2018). The 2018 report of The Lancet Countdown on health and climate change: Shaping the health of nations for centuries to come. *The Lancet*, 392(10163), 2479-2514. doi:10.1016/S0140-6736(18)32594-7.
- Wenger, S. J., et al. (2018). Integrating freshwater science into environmental flow decision-making frameworks. *Freshwater Biology*, 63(1), 105-118. doi:10.1111/fwb.13020.
- Wenger, S.J., et al. (2018). "Multisectoral perspectives on managing water resources." *Environmental Management*.
- Westra, S., Alexander, L. V., & Zwiers, F. W. (2014). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 26(11), 3904-3918.
- Westra, S., et al. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 2013RG000514. doi:10.1002/2013RG000514.
- WMO. (2017). World Meteorological Organization. *The Global Observing System for Climate: Implementation Needs*.
- WMO. (2018). Efficient Water Use in a Changing Climate. World Meteorological Organization. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/resources/library/efficient-water-use-changing-climate>
- WMO. (2018). *Efficient water use in a changing climate*. World Meteorological Organization.
- Woodward, G., Perkins, D. M., & Brown, L. E. (2016). Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2093-2106.
- World Bank. (2018). *World Development Report 2018: Learning to Realize Education's Promise*. Washington, DC: World Bank.
- World Bank. (2021). Climate Resilience and Water Management in Indonesia. Diakses dari <https://www.worldbank.org/en/country/indonesia/overview>
- Yin X, Leng G. A Review of the Effects of Climate Extremes on Agriculture Production. In: Tang Q, Leng G, eds. *Climate Risk and Sustainable Water Management*. Cambridge University Press; 2022:198-219.
- Yin, J., & Leng, G. (2021). The influence of climate change on flooding across China. *Journal of Hydrology*, 603, 126907.
- Zekri, S., et al. (2021). Impact of urbanization on groundwater recharge and quality in the Middle East and North Africa region. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054031.

- Zhang, X., et al. (2020). Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature Climate Change*, 10, 264-270.
- Zhang, X., et al. (2020). Increased atmospheric moisture and higher intensity of rainstorms in a warmer world. *Journal of Climate*, 33(1), 273-285. doi:10.1175/JCLI-D-19-0284.1.
- Zhang, Y., You, Q., & Chen, C. (2016). Climate change and its effects on river discharge in tropical regions. *Journal of Hydrology*, 533, 74-85.
- Zhao, T., et al. (2020). Projected increases in the frequency and intensity of drought in southwestern North America. *Nature Climate Change*, 10, 145-150