

Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan: Review Artikel

Sefrinta Sasma Murdiangatma ^{[1]*}

^{[1]*} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, 35122, Indonesia

Email: sefrintasasma88@gmail.com *

*) Correspondent Author

Received: 22 December 2023; Revised: 11 Maret 2024; Accepted: 26 April 2024

How to cited this article:

Murdiangatma, S.S., (2025). Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan, Review Artikel. Jurnal Teknik Sipil, 21(1), 128–143. <https://doi.org/10.28932/jts.v21i1.8009>

ABSTRAK

Perubahan iklim merupakan perubahan komponen iklim seperti, suhu, curah hujan, kelembaban, evaporasi, arah dan kecepatan angin, dan udara. Perubahan iklim menjadi masalah besar yang mempengaruhi banyak bidang, termasuk pembangunan bendungan. Perubahan iklim mempengaruhi ekosistem yang ada di dalam bendungan, mengubah pola aliran sungai dan penurunan sedimen, mempengaruhi vegetasi riparian, mengubah frekuensi genangan air dan konektivitas rawa, meningkatkan risiko banjir dan keselamatan bendungan. Tujuan penelitian ini adalah melakukan studi literatur untuk mengetahui pengaruh dampak perubahan iklim pada konstruksi bendungan yang dilihat dari berbagai aspek dan masalah yang terjadi. Dengan menggunakan metode penelitian deskriptif komprehensif untuk merangkum keseluruhan materi studi literatur ini. Studi ini menghasilkan pemahaman tentang perubahan iklim dapat mempengaruhi ekosistem air tawar, pola aliran alami sungai, dan menyebabkan perubahan suhu, presipitasi, dan pola angin. Jumlah sedimen yang turun ke sungai menjadi lebih banyak saat musim penghujan, menyebabkan potensi kekurangan air saat kemarau dan banjir saat musim penghujan, dan perubahan penggunaan lahan akibat pembangunan bendungan. Untuk itu perlu adanya pengendalian dan pengelolaan konstruksi bendungan, juga mitigasi risiko agar dampak perubahan iklim yang terjadi pada konstruksi bendungan dapat dihindarkan.

Kata kunci: Perubahan iklim, Perubahan Penggunaan Lahan, Bendungan.

ABSTRACT. Impact of Climate Change on Dam Construction: A Review. Climate change is a change in climate components such as temperature, rainfall, humidity, evaporation, wind direction and speed, and air. Climate change is a big problem that affects many areas, including dam construction. Climate change affects the ecosystem within the dam, changing river flow patterns and sediment reduction, affecting riparian vegetation, changing the frequency of waterlogging and swamp connectivity, and increasing the risk of flooding and dam safety. This research aims to conduct a literature study to determine the influence of the impact of climate change on dam construction from various aspects and problems that may occur. By using a comprehensive descriptive research method to summarize the entire material of this literature study. This study produces an understanding of how climate change can affect freshwater ecosystems, and natural river flow patterns, and cause changes in temperature, precipitation, and wind patterns. The amount of sediment that falls into rivers becomes greater during the rainy season, causing potential water shortages during the dry season and flooding during the rainy season, and changes in land use due to dam construction. For this reason, it is necessary to control and manage dam construction, as well as risk mitigation so that the impact of climate change that occurs on dam construction can be avoided.

Keywords: Climate Change, Land Use Change, Dam.

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan perubahan pada komponen iklim yaitu suhu, curah hujan, kelembapan, evaporasi, arah dan kecepatan angin, dan udara. Perubahan iklim dapat menyebabkan adanya pergeseran musim. Di Indonesia, musim mengalami pergeseran baik pada awal musim maupun sepanjang musim. Pergeseran tersebut terjadi di musim kemarau dan musim hujan, baik secara maju ataupun mundur. Penyebab perubahan iklim adalah pemanasan global dan dipercepat secara signifikan oleh aktivitas manusia (Irvani et al., 2013). Dalam era di mana ketidakpastian iklim semakin meningkat, perubahan iklim menjadi masalah besar yang mempengaruhi banyak bidang, termasuk pembangunan bendungan. Saat ini, kondisi cuaca yang semakin tidak menentu mengancam keberlanjutan proyek infrastruktur tersebut. Sehingga, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari lebih lanjut tentang bagaimana perubahan iklim mempengaruhi konstruksi bendungan, lalu mengevaluasi efeknya, dan menemukan cara terbaik untuk mengadaptasi. Bendungan dan bendung telah terbukti efektif mempertahankan daerah aliran sungai (DAS) terhadap kekeringan yang terjadi secara meteorologi, hidrologi, dan sosio-ekonomi (Guo et al., 2021). Akibat pembangunan bendungan dan waduk, terjadi perubahan permukaan tanah dan perubahan siklus air yang secara langsung menyebabkan terjadinya radiasi dan gas rumah kaca, dan pada akhirnya mengganggu keadaan dan interaksi air (Chi et al., 2021). Sungai-sungai besar juga menghadapi serangkaian tekanan tambahan yang terwujud dalam berbagai intensitas (Bussi et al., 2021). Sementara itu, perubahan iklim akan menyebabkan risiko banjir yang lebih tinggi yang diperkirakan terjadi di akhir abad ke-21, namun tantangan hidrologi yang ekstrim dapat dikurangi dan dikendalikan dengan pengaturan waduk (Yun et al., 2021). Berbagai macam aliran sungai, termasuk aliran rata-rata jangka panjang, aliran musiman, aliran rendah, aliran tinggi dan jenis variabilitas aliran air lainnya, memainkan peranan penting dalam penanganan ekosistem air tawar. Oleh sebab itu, perubahan iklim mempengaruhi ekosistem air tawar tidak hanya melalui peningkatan suhu, tetapi juga perubahan pola aliran sungai (Däll & Zhang, 2010).

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam proses pembangunan dan pengoperasian bendungan dan waduk yang ada di Indonesia, mengetahui pengaruh perubahan iklim terhadap ekosistem air tawar, mengetahui pengaturan pola operasi waduk terkait dengan perubahan iklim, mengetahui dampak yang ditimbulkan dari perubahan iklim terhadap keamanan bangunan bendungan dan waduk, mengetahui perubahan iklim yang terjadi secara lokal di daerah bendungan dan waduk, mengetahui pola aliran sungai dan penurunan sedimen akibat perubahan iklim. Sehingga dapat memberikan arahan kepada

penelitian selanjutnya untuk dapat lebih mengembangkan dan memperluas solusi pengaruh perubahan iklim pada bendungan.

2. METODOLOGI

Pada artikel ini, pengaruh perubahan iklim pada konstruksi bendungan digunakan sebagai kata pencarian (judul, abstrak, dan kata kunci) untuk mencari sumber informasi. Artikel ini memberikan rangkuman penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti tentang pengaruh perubahan iklim pada konstruksi bendungan dilihat dari berbagai aspek dan penanganannya. Ada 19 jurnal yang diulas dan dianalisis untuk memberikan pemahaman tentang perubahan iklim pada konstruksi bangunan bendungan (terpublikasi dari rentang waktu 2003 – 2023). Menurut subjek penelitian, makalah diklasifikasikan menjadi 9 poin penelitian : 1. Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Ekosistem Air Tawar, 2. Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Pola Aliran Sungai, 3. Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Penurunan Aliran Sedimen, 4. Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Genangan Banjir dan Konektivitas Lahan Basah, 5. Pengaruh Perubahan Iklim pada Keamanan Konstruksi Bendungan, 6. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan sebagai Pengendali Banjir, 7. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan terhadap Penggunaan Lahan, 8. Pengaruh Perubahan Iklim Lokal pada Konstruksi Bendungan, dan 9. Pengaruh Perubahan Iklim pada Vegetasi Riparian di Bendungan. Isi makalah ini akan dievaluasi lebih lanjut melalui metode perbandingan deskriptif dan saran untuk penelitian selanjutnya diberikan pada akhir artikel ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan mengenai pengaruh perubahan iklim pada konstruksi bendungan akan menjadi fokus utama dalam penelitian ini, mengeksplorasi dampaknya terhadap keberlanjutan ekosistem bendungan, serta menganalisis strategi adaptasi yang dapat muncul akibat dinamika cuaca yang semakin tidak menentu. Di bawah ini adalah beberapa pengaruh perubahan iklim pada konstruksi bendungan dilihat dari berbagai studi kasus.

3.1. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan terhadap Ekosistem Air Tawar

Meskipun dampak dari bendungan terhadap sumber daya air tawar sering kali ditekankan dan disebutkan dalam tiap perencanaan konstruksi, namun seharusnya perlu diperiksa juga untuk dampaknya yang signifikan terhadap keanekaragaman hayati di daratan. Pembangunan dan pengoperasian bendungan telah menyebabkan perubahan pada hidrologi hulu, kualitas air, dan habitat di hilir, yang mempengaruhi keragaman organisme di sungai, daerah pesisir, dan dataran banjir. Keberadaan bendungan dan waduk telah menyebabkan hilangnya habitat, kerusakan

morfologi di hilir akibat perubahan beban sedimen, dan penurunan keragaman biologis. Selain itu, proyek-proyek bendungan telah menyebabkan perubahan penggunaan lahan, dengan luas hutan dan habitat alami yang signifikan tergenang oleh waduk. Bendungan juga telah mempengaruhi pola aliran alami sungai, mempengaruhi rute migrasi makhluk air dan organisme air tawar. Selain itu, waduk bendungan telah mengubah iklim dan hidrologi di wilayah tersebut, menyebabkan perubahan suhu, presipitasi, dan pola angin. Dampak ekologis juga meluas ke potensi pelepasan gas Metana dari waduk bendungan, yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Setelah pembangunan bendungan, kondisi aliran di bagian hilir menjadi berbeda pada saat operasi dan nilai puncak menjadi hilang. Perubahan jumlah aliran di lingkungan menjadi patokan makhluk hidup yang ada dalam ekosistem tersebut (Aras, 2018). Dengan demikian, perubahan iklim mempengaruhi ekosistem air tawar tidak hanya karena peningkatan suhu tetapi juga oleh perubahan pola aliran sungai yang secara ekologis lebih kuat dibandingkan bendungan dan pemanfaatan air hingga saat ini. Perubahan iklim juga dapat menyebabkan penurunan jumlah spesies ikan di beberapa daerah aliran sungai (Däll & Zhang, 2010).

Penelitian ini menekankan dampak signifikan perubahan iklim terhadap ekosistem air tawar, khususnya dalam mengubah pola aliran sungai, dan menunjukkan bahwa dampak ini mungkin melebihi dampak perubahan yang disebabkan oleh manusia di masa lalu. Temuan ini menggarisbawahi perlunya penelitian lebih lanjut dan langkah-langkah proaktif untuk memitigasi potensi dampak ekologis perubahan iklim terhadap ekosistem air tawar.

3.2. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan terhadap Pola Aliran Sungai

Aliran alami sungai bervariasi dalam skala waktu jam, hari, musim, tahun, dan lebih lama. Membutuhkan pengamatan bertahun-tahun dari alat ukur aliran sungai untuk menggambarkan pola karakteristik aliran sungai, termasuk kuantitas, waktu, dan variabilitasnya - yaitu, pola aliran alami (Poff et al., 1997). Perubahan iklim secara signifikan dapat mempengaruhi pola aliran alami. Misalnya, kenaikan suhu dapat mempercepat sirkulasi hidrologi, dan meningkatkan intensitas dan frekuensi cuaca ekstrem peristiwa, sehingga mengubah aliran rata-rata dan meningkatkan frekuensi dan besarnya kejadian hidrologi ekstrem. Oleh karena itu, dampak dari perubahan iklim harus dipertimbangkan ketika mengukur dampaknya pembangunan bendungan. Tujuan dari penelitian dalam artikel ini adalah untuk memperkirakan perubahan pola aliran sungai dan membedakan antara pengetahuan perubahan sirkulasi aliran karena pembangunan bendungan dan perubahan iklim (Chi et al., 2021; Cui et al., 2020). Studi ini menemukan bahwa perubahan iklim secara signifikan mengurangi aliran bulanan, kondisi air ekstrem, dan indikator intra-tahunan, mengurangi aliran bulanan pada musim banjir dan aliran maksimum tahunan, tetapi

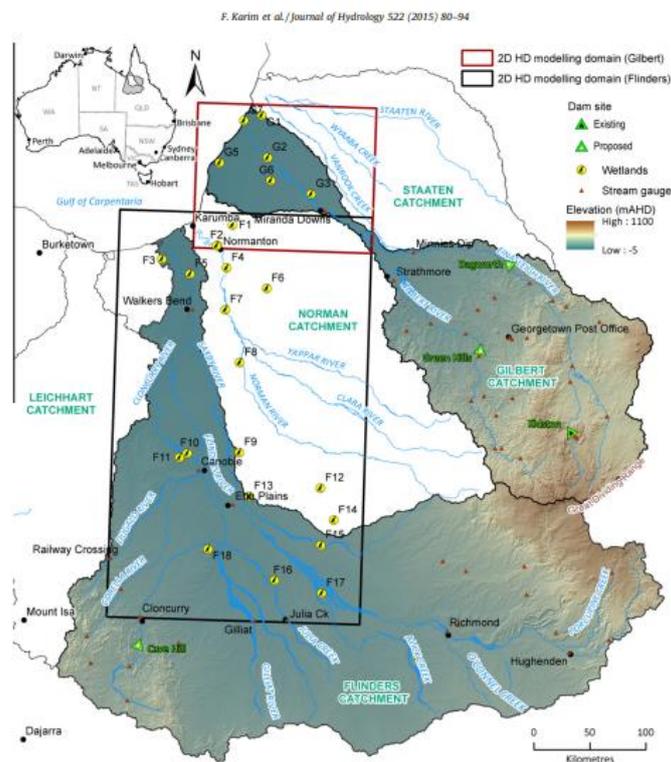
meningkatkan aliran bulanan pada musim kemarau dan aliran minimum tahunan. Studi ini memiliki beberapa keterbatasan dan ketidakpastian. Pertama, studi ini tidak mengatasi pengaruh aktivitas manusia lainnya seperti perubahan penggunaan lahan, irigasi, pengambilan air, dan urbanisasi terhadap pola aliran di DAS. Keterbatasan dan ketidakpastian dalam studi ini menyoroti perlunya penelitian lebih lanjut untuk mengatasi pengaruh aktivitas manusia lainnya dan mengurangi ketidakpastian dalam penilaian perubahan pola aliran sungai akibat perubahan iklim yang terjadi pada bendungan.

3.3. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan terhadap Penurunan Aliran Sedimen

Banyak penelitian (Bussi et al., 2021; Dunn et al., 2019; Walling & Fang, 2003) menunjukkan bahwa penurunan sedimen di wilayah pesisir telah terjadi dalam beberapa dekade terakhir dan proyeksi global menyoroti bahwa tren ini kemungkinan akan terus berlanjut di masa depan. Sedangkan variabilitas iklim alami bisa berdampak pada penurunan sedimen, terdapat konsensus luas bahwa pengurangan beban sedimen yang diamati dan diproyeksikan merupakan konsekuensi dari gerakan global dalam pembangunan bendungan terutama untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga air (Zarfl et al., 2015). Faktor utama yang berkontribusi terhadap aliran sedimen ke delta adalah pembangunan bendungan dan perubahan iklim yang disebabkan oleh manusia. Perubahan iklim menyebabkan penurunan aliran sedimen ke sungai, diperparah dengan adanya pembangunan bendungan, sehingga jumlah sedimen yang turun menjadi lebih banyak. Penurunan sedimen dapat menyebabkan erosi di sungai, yang dapat berdampak buruk bagi komunitas riparian dan infrastruktur, karena air yang kekurangan sedimen yang dilepaskan dari bendungan dapat menggerakkan kembali sedimen yang tersimpan di dataran banjir. Selain itu, penurunan endapan sedimen mengancam keberlanjutan sistem pertanian, kesuburan tanah dan penghidupan lokal di delta. Pasokan berkelanjutan sedimen sungai dari hulu juga sangat penting untuk memastikan kesuburan tanah delta dan endapan sedimen juga dapat membantu menyeimbangkan kenaikan permukaan air laut. Oleh karena itu, dampak gabungan pembendungan dan perubahan iklim yang diakibatkan oleh manusia memiliki efek yang bertentangan terhadap beban sedimen tersuspensi di delta Mekong. Kelemahan penelitian ini terletak pada pengaruh sedimentasi dari aliran sungai ke delta, tanpa mempertimbangkan proses deltaik seperti remobilisasi oleh pasang surut atau erosi oleh badai laut. Penelitian ini tidak mempertimbangkan perubahan iklim jangka panjang dan dampaknya pada sedimentasi di delta. Oleh karena itu, penelitian masa depan dapat memperluas cakupan untuk memperhitungkan proses-proses ini dan memperdalam pemahaman tentang dinamika sedimentasi di delta (Bussi et al., 2021).

3.4. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan terhadap Genangan Banjir dan Konektivitas Rawa

Pengembangan sumber daya air dan pertanian selalu disertai dengan hilangnya habitat dataran banjir. Hal ini disebabkan adanya perubahan penggunaan lahan dan pengembangan sumber daya air serta perluasan pertanian, perkotaan dan industri, serta perubahan iklim. Temuan utama dari penelitian tentang dampak perubahan iklim dan pembangunan terhadap genangan dataran banjir dan konektivitas rawa adalah bahwa perubahan curah hujan akibat perubahan iklim yang lebih basah dan lebih kering dapat memiliki dampak signifikan pada luas, durasi, dan frekuensi genangan dan konektivitas di daerah aliran sungai Flinders dan Gilbert di bagian utara Australia. Pembangunan bendungan di daerah aliran sungai Flinders dan Gilbert dapat mengurangi rata-rata durasi konektivitas sebesar 1% dan 2%, sementara dampak perubahan iklim yang tidak proporsional di antara rawa, dengan letak yang jauh dari sungai lebih terpengaruh daripada yang terletak dekat dengan sungai. Penelitian ini mengidentifikasi bahwa rawa yang terletak di bagian bawah dataran banjir kemungkinan besar memiliki durasi koneksi yang lebih lama terutama disebabkan oleh topografi tanah yang datar, dan variabilitas spasial curah hujan yang mempengaruhi tingkat konektivitas rawa individual. (Karim et al., 2015).



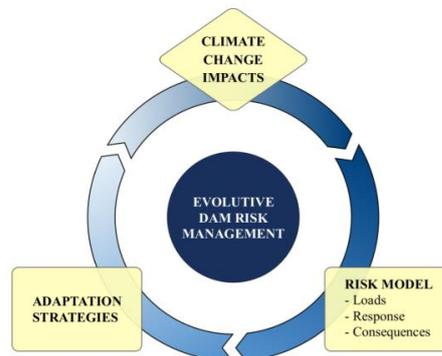
Gambar 1. Peta Daerah Tangkapan Air Flinders dan Gilbert yang Menunjukkan Lokasi Stasiun Pengukur Aliran Sungai yang Digunakan untuk Kalibrasi dan Validasi Model, Batas-Batas Domain Pemodelan Hidrodinamik, Lokasi Lahan Basah dan Tiga Lokasi Bendungan Potensial untuk Pengembangan Sumber Daya Air

Studi ini menggunakan pendekatan pemodelan terpadu untuk membuat simulasi dinamika genangan banjir di dataran banjir dan memperkirakan hubungan hidrologi antara rawa dan sungai di daerah tangkapan air Flinders dan Gilbert di utara Australia. Studi ini menemukan bahwa rawa yang terletak di bagian bawah dataran banjir cenderung memiliki durasi keterhubungan yang lebih lama, dan bahwa variabilitas spasial curah hujan dapat mempengaruhi tingkat keterhubungan rawa individual. Dampak perubahan iklim terhadap keterhubungan tersebut besar, sementara dampak pengembangan sumber daya air potensial terhadap genangan dataran banjir kecil. Studi ini juga mengidentifikasi perlunya studi khusus daerah tangkapan air dan kehati-hatian dalam mengekstrapolasi temuan ke daerah tangkapan air lainnya. Studi ini memiliki beberapa keterbatasan, termasuk ketidakpastian yang terkait dengan hasil simulasi karena ketidakpastian yang terkait dengan data temporal yang diamati dan lapisan data spasial, serta aliran simulasi oleh model hujan–limpasan dan aliran batas oleh model sistem sungai. Selain itu, studi ini mengakui perlunya memperhitungkan ketidakpastian yang terkait dengan hasil model dengan bantuan data tambahan sebagai arah penelitian masa depan. Beberapa saran untuk penelitian ke depannya adalah dengan mengukur ketidakpastian dengan simulasi model, studi spesifik daerah aliran sungai, kewaspadaan dalam eksplorasi, implikasi ekologis dari perubahan yang diamati dalam genangan dataran banjir dan keterhubungan rawa, validasi model untuk simulasi, terutama dalam menangkap pola keseluruhan luas genangan, pemantauan jangka panjang dari genangan dataran banjir dan keterhubungan rawa.

3.5. Pengaruh Perubahan Iklim pada Keamanan Konstruksi Bendungan

Perubahan iklim mempengaruhi berbagai komponen keselamatan bendungan dalam berbagai cara. Pertama, dapat menyebabkan variasi dalam banjir lokal akibat perubahan pola hujan deras, tutupan salju, dan kelembaban tanah, yang mempengaruhi risiko banjir. Kedua, fluktuasi dalam penyimpanan air di waduk dapat terjadi akibat variabilitas presipitasi, evapotranspirasi potensial, dan perubahan penggunaan lahan serta permintaan air, yang mempengaruhi tingkat air waduk. Perubahan iklim juga dapat mempengaruhi kinerja pintu air melalui proses seperti abrasi akibat peningkatan kandungan sedimen, penyumbatan pintu air akibat material tersuspensi, dan perubahan suhu yang menyebabkan tekanan dan deformasi. Dampak-dampak ini dapat dinilai melalui kombinasi proyeksi iklim, teknik penurunan skala, dan simulasi sistem manajemen sumber daya air. Penting untuk mempertimbangkan pengaruh iklim dan non-iklim, seperti peningkatan populasi, perkembangan ekonomi, dan adaptasi manajemen air, saat menilai dampak perubahan iklim terhadap keselamatan bendungan. Metode-metode yang digunakan untuk menilai dampak perubahan iklim terhadap komponen keselamatan bendungan termasuk kombinasi proyeksi iklim adalah penurunan skala dan pemodelan hidrometeorologi.

Metode-metode ini digunakan untuk mengevaluasi variasi banjir lokal, fluktuasi penyimpanan air di waduk, dan kinerja pintu air. Penilaian ini juga melibatkan pertimbangan ketidakpastian yang tercantum dalam proyeksi iklim dan hidrologi serta perubahan dalam model daerah aliran sungai. Penting juga untuk mengintegrasikan penggerak non-iklim, seperti perubahan penggunaan lahan dan permintaan air, ke dalam penilaian. Metode-metode komprehensif ini bertujuan untuk memberikan informasi yang berguna bagi pemilik bendungan dan praktisi keselamatan dalam proses pengambilan keputusan mereka. Kerentanan bendungan terhadap kegagalan dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk perubahan yang diinduksi oleh perubahan iklim seperti kondisi tanah yang lebih kering, fluktuasi dalam penyimpanan air, dan perubahan suhu. Faktor-faktor ini dapat mempengaruhi kerentanan bendungan terhadap proses seperti erosi internal, menurunkan kekuatan geser kritis, dan meningkatkan koefisien erosi pipa, sehingga mempengaruhi resistensi tanah terhadap erosi. Selain itu, hilangnya tanaman akibat perubahan kelembaban tanah dapat membuat tanah lebih rentan terhadap proses erosi internal dan menunjukkan resistensi yang lebih rendah terhadap aliran permukaan saat meluap. Faktor-faktor lain seperti perubahan penggunaan lahan, pertumbuhan populasi, dan perubahan teknologi juga dapat mempengaruhi kegagalan keselamatan dan keamanan pada bangunan bendungan.



Gambar 2. Manajemen risiko bendungan yang bersifat evolusioner yang didorong oleh dampak perubahan iklim pada komponen risiko, termasuk strategi adaptasi.

Karya ini menyajikan tinjauan lintas disiplin tentang penelitian terkini mengenai dampak perubahan iklim yang diproyeksikan terhadap keselamatan bendungan yang memperhatikan kedua pengaruh, iklim dan non-iklim. Struktur yang diikuti untuk tinjauan tersebut didasarkan pada pendekatan analisis risiko di mana semua variabel yang berkaitan dengan keselamatan bendungan - dari beban hidrologi hingga konsekuensi kegagalan - dan ketergantungan dimasukkan secara komprehensif. Para penulis memperkenalkan pendekatan yang lebih komprehensif dan terstruktur untuk mempertimbangkannya, yang dapat digunakan untuk menerapkan analisis risiko yang sama ke infrastruktur kritis lainnya. Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk menjadi alat pendukung manajemen keselamatan bendungan dalam menilai

kerentanan bendungan terhadap perubahan iklim, yaitu risiko tambahan yang ditimbulkan oleh efek perubahan iklim, dan untuk menentukan strategi adaptasi untuk skenario iklim baru dalam kerangka manajemen risiko bendungan yang berkembang (Fluixá-sanmartín et al., 2018).

3.6. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan sebagai Pengendali Banjir

Pergeseran karakteristik aliran selama musim banjir dari bulan Juli dan Agustus menjadi Agustus dan September, yang disebabkan oleh perubahan iklim, diidentifikasi sebagai faktor krusial. Pergeseran ini dapat menyebabkan kesulitan dalam operasi bendungan selama musim banjir, karena tingkat air di awal musim banjir dapat menentukan keberhasilan atau kegagalan operasi bendungan. Studi ini menekankan pentingnya mempertimbangkan tidak hanya perubahan kuantitatif dalam nilai hidrologi tetapi juga perubahan dalam karakteristik temporal untuk perencanaan adaptasi terhadap perubahan iklim. Hasilnya menunjukkan bahwa risiko bendungan akan meningkat akibat perubahan iklim, yang menyebabkan potensi kekurangan air dan meningkatnya tantangan pengendalian banjir. Oleh karena itu, langkah-langkah komprehensif diperlukan untuk mengatasi peningkatan risiko kekeringan dan banjir di masa depan. Studi ini mengevaluasi efek dari perubahan iklim pada Bendungan Chung-Ju di Korea, dengan fokus pada sumber daya air dan pengendalian banjir. Analisis menunjukkan bahwa risiko kekeringan dan banjir akan meningkat karena perubahan karakteristik temporal aliran selama musim banjir. Studi ini menyoroti bahwa metode operasi waduk saat ini mungkin tidak efektif dalam merespons perubahan karakteristik aliran, yang mengakibatkan peningkatan risiko pengendalian banjir. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan bukan hanya perubahan kuantitatif dalam nilai hidrologi tetapi juga perubahan dalam pola temporal saat mengevaluasi efek perubahan iklim terhadap penggunaan air dan risiko pengendalian banjir. Kelemahan penelitian ini dapat mencakup beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan. Pertama, penelitian ini terutama fokus pada evaluasi dampak perubahan iklim terhadap risiko kekeringan dan banjir pada sebuah bendungan serbaguna di Korea, namun tidak memberikan perbandingan dengan lokasi geografis lain atau bendungan serupa di tempat lain. Hal ini dapat membatasi generalisasi temuan penelitian terhadap kondisi di tempat lain. Selain itu, penelitian ini juga terutama mempertimbangkan perubahan kuantitatif dalam nilai hidrologi, namun kurang memberikan penekanan pada perubahan dalam karakteristik temporal aliran air, yang juga penting dalam adaptasi terhadap perubahan iklim. Selain itu, penelitian ini mungkin juga memiliki keterbatasan dalam mempertimbangkan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan dalam konteks adaptasi terhadap perubahan iklim pada infrastruktur air, seperti bendungan serbaguna. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat memperluas cakupan geografis, memperhatikan perubahan temporal aliran air, dan mempertimbangkan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan untuk mendapatkan pemahaman

yang lebih komprehensif tentang dampak perubahan iklim pada risiko kekeringan dan banjir pada bendungan serbaguna (Kim et al., 2014).

3.7. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan terhadap Penggunaan Lahan

Dampak perubahan iklim terhadap penggunaan lahan akibat pembangunan bendungan telah diketahui sebagai permasalahan yang muncul di Daerah Aliran Sungai Mekong. Penelitian telah menunjukkan bahwa potensi dampak akibat pengembangan sumber daya air di masa depan dapat mengurangi aliran musim hujan meningkatkan wilayah banjir, dan menyebabkan wilayah intrusi salinitas di Delta. Perubahan penggunaan lahan ini juga mengubah sistem hidrologi dan mengubah aliran serta evapotranspirasi. Pembangunan infrastruktur dan kebutuhan ekonomi yang meningkat di negara-negara yang berbatasan dengan sungai Mekong telah menyebabkan perluasan pertanian dan pembangunan jaringan jalan yang luas di seluruh wilayah. Oleh karena itu, sangat penting untuk meningkatkan pemahaman mengenai dampak perubahan iklim dan perubahan penggunaan lahan akibat pembangunan bendungan dan kegiatan pengelolaan air terkait lainnya di seluruh wilayah sungai. Studi-studi tersebut harus menggunakan model-model terbaru yang menyatukan aspek-aspek hidrologi, pertanian, sosial, dan ekologi ke dalam satu kerangka kerja yang konsisten. Pembangunan bendungan pembangkit listrik tenaga air skala besar menimbulkan dampak luas dengan mengubah besaran dan musim aliran sungai, menghalangi transportasi sedimen, mempengaruhi perikanan, dan mengubah aliran banjir. Perubahan iklim diperkirakan akan semakin menekan ekosistem di kawasan sungai, dengan perubahan ritme dan intensitas angin muson di Asia yang menyebabkan lebih seringnya banjir dan kekeringan, sehingga mempengaruhi produktivitas pertanian dan ekosistem perairan. Selain itu, kenaikan suhu di hulu Sungai mengubah aliran sungai secara musiman, yang berdampak pada produktivitas pertanian dan ekosistem perairan. Perubahan-perubahan ini mempunyai implikasi yang signifikan terhadap ekosistem dan sumber daya air di wilayah tersebut, sehingga memerlukan analisis yang komprehensif mengenai dampak gabungannya terhadap sistem alam dan manusia di wilayah sungai tersebut. Deforestasi dapat menyebabkan erosi tanah, hilangnya keanekaragaman hayati, dan berkurangnya kapasitas retensi air, sehingga berdampak pada produktivitas pertanian dan ketersediaan air. Urbanisasi dapat menyebabkan peningkatan permintaan sumber daya air, perubahan sifat permukaan tanah, dan perubahan keseimbangan air dan energi, yang berdampak pada pertanian dan sumber daya air. Perluasan wilayah pertanian dan irigasi juga dapat mempengaruhi keseimbangan air, mempengaruhi aliran air dan evapotranspirasi, serta berpotensi memperburuk kondisi stres air, terutama pada musim kemarau. Selain itu, perubahan penggunaan lahan dapat mempengaruhi dataran banjir dan lahan basah yang tergenang secara musiman, sehingga berdampak pada ketersediaan dan penggunaan sumber daya air permukaan dan air tanah.

Perubahan ini juga dapat mempengaruhi wilayah perairan terbuka dan habitat tadah hujan. Ringkasnya, perubahan penggunaan lahan, seperti penggundulan hutan dan urbanisasi, dapat menimbulkan dampak luas terhadap pertanian dan sumber daya air di DAS, berdampak pada erosi tanah, kapasitas retensi air, kebutuhan air, keseimbangan air, dan ketersediaan air permukaan dan sumber daya air tanah. Kelemahan penelitian ini termasuk kurangnya kuantifikasi dampak dari perubahan penggunaan lahan dan pembangunan bendungan terhadap sistem hidrologi, pertanian, dan ekologi di wilayah Mekong. Selain itu, penelitian ini juga belum sepenuhnya mengintegrasikan efek dari perubahan iklim dan perubahan penggunaan lahan yang diakibatkan oleh pembangunan bendungan. Diperlukan penelitian lebih lanjut yang dapat menyediakan proyeksi masa depan yang lebih realistis dengan memperhitungkan berbagai skenario pertumbuhan sosial-ekonomi dan pengembangan infrastruktur air. Selain itu, penelitian ini juga belum sepenuhnya mengatasi interaksi dinamis dan umpan balik antara sistem alami dan manusia yang saling terkait di seluruh cekungan sungai Mekong. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan model terintegrasi yang dapat menyelidiki dampak-dampak ini secara holistik untuk memahami perubahan sistem alami-manusia yang saling terkait di wilayah Mekong (Pokhrel et al., 2018).

3.8. Pengaruh Perubahan Iklim Lokal pada Konstruksi Bendungan

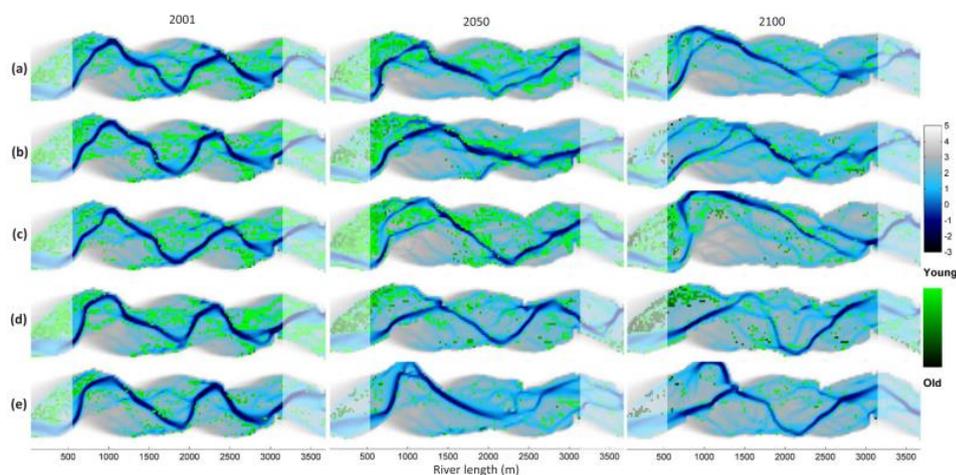
Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi dampak *Reservoir Characteristic Factors* (RCFs) terhadap perubahan iklim lokal di sekitar waduk melalui pemeriksaan korelasi antara RCFs dari bendungan terpilih dan waduk terkait dengan variabel meteorologi di seluruh dunia. Temuan utama studi ini adalah bahwa korelasi RCFs dengan penguapan berlawanan dengan korelasi dengan presipitasi, dan bahwa bendungan dan waduk terkait dapat memiliki efek yang berlawanan (melemahkan atau meningkatkan) pada variabel meteorologi yang berbeda. Selain itu, RCFs lebih unggul dalam mempengaruhi presipitasi daripada faktor-faktor geografis, sementara variasi penguapan lebih sensitif terhadap faktor-faktor geografis. Waduk mempunyai pengaruh yang lebih besar terhadap perubahan curah hujan, termasuk variasi dan Nilai Rata-Rata Tahunan Jangka Panjang atau *Long-term Annual Average Value* (LAAV). Artinya, keberadaan waduk dapat menyebabkan peningkatan curah hujan di wilayah sekitarnya. Pentingnya dampak ini terletak pada potensi waduk mempengaruhi pola iklim dan hidrologi lokal, yang dapat berimplikasi pada pengelolaan sumber daya air, pertanian, dan ekosistem di wilayah sekitarnya. Memahami dampak waduk terhadap pola curah hujan penting bagi pemangku kepentingan untuk membuat keputusan yang tepat mengenai pembangunan dan pengelolaan waduk guna memitigasi potensi dampak terhadap iklim lokal dan sumber daya air. Kehadiran reservoir dapat mengubah albedo permukaan, kekasaran, dan kapasitas panas. Hal ini berdampak pada keseimbangan energi

lokal dan sirkulasi atmosfer. Adanya waduk dapat menyebabkan peningkatan luas permukaan air, yang mengakibatkan peningkatan penguapan dan fluks kelembapan. Perubahan karakteristik permukaan tanah dan keseimbangan energi ini dapat berkontribusi pada perubahan variabel iklim lokal seperti penguapan, curah hujan, dan suhu. Kehadiran reservoir dapat mempengaruhi keseimbangan energi lokal dan sirkulasi atmosfer dengan mengubah kondisi permukaan, kekasaran, dan kapasitas panas. Waduk juga dapat meningkatkan luas permukaan air, meningkatkan penguapan, dan fluks kelembapan, yang dapat berdampak pada pola curah hujan di daerah sekitarnya. Perubahan karakteristik permukaan tanah dan keseimbangan energi ini dapat berkontribusi pada perubahan variabel iklim lokal seperti penguapan, curah hujan, dan suhu. Studi ini menganalisis dampak bendungan dan waduk terhadap perubahan iklim lokal menggunakan data meteorologi dan faktor karakteristik waduk. Studi ini berfokus pada 200 waduk yang selesai dibangun antara 1995-2005 dan menggunakan analisis korelasi dan regresi linear berganda untuk menilai hubungan antara faktor karakteristik waduk dan variabel meteorologi. Studi ini juga memperkenalkan konsep zona *buffer* di sekitar waduk untuk memperhitungkan heterogenitas spasial dalam analisis. Data meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data berbasis *grid* set (data rata-rata bulanan ERA5-Land) disediakan oleh Pusat Prakiraan Cuaca Jangka Menengah Eropa (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), dengan resolusi horizontal $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ dan resolusi temporal 1 bulan (Muñoz 2019), tersedia dari tahun 1981 hingga 2020 (total 40 tahun). Hasilnya bertujuan untuk memberikan wawasan tentang pengaruh waduk terhadap iklim lokal dan siklus air. Studi ini menganalisis korelasi antara karakteristik waduk dan variabel meteorologi. Studi ini menemukan bahwa penguapan dan presipitasi memiliki pola korelasi yang berlawanan dengan karakteristik waduk, dan variabel suhu menunjukkan korelasi yang berbeda berdasarkan dimensi spasial-temporal. Studi ini juga menggunakan regresi linear berganda untuk menunjukkan bahwa dampak karakteristik waduk terhadap penguapan kurang signifikan dibandingkan dengan faktor geografis, sementara dampak terhadap presipitasi lebih signifikan (Zhao et al., 2021). Secara keseluruhan, studi ini memberikan wawasan tentang mekanisme fisik di balik korelasi tersebut. Penelitian ini mungkin terlalu menyederhanakan hubungan kompleks antara karakteristik reservoir dan variabel meteorologi; analisis korelasi dan regresi saja mungkin tidak mencakup sepenuhnya mekanisme fisik rumit yang berperan dalam penelitian ini. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami hubungan kompleks antara waduk dan perubahan iklim.

3.9. Pengaruh Perubahan Iklim pada Konstruksi Bendungan terhadap Vegetasi Riparian

Kolonisasi dan kelangsungan hidup vegetasi di dataran banjir sangat dipengaruhi oleh pembangunan bendungan dan perubahan iklim. Pembangunan bendungan memang dapat

mengurangi banjir, dan juga dapat meningkatkan pertumbuhan vegetasi di dalam atau di sekitar saluran sungai. Namun, hal ini juga dapat menyebabkan vegetasi riparian menua, keberhasilan tumbuh pohon riparian menurun, dan penurunan luas hutan konifera. Selain itu, spesies riparian asing lebih invasif, yang dapat beradaptasi dengan lingkungan baru lebih cepat daripada spesies asli, sehingga dapat mengancam ekosistem riparian spesies asli. Dampak gabungan pembangunan bendungan dan perubahan iklim terjadi pada kolonisasi riparian yang kompleks dan non-linear. Studi ini berfokus pada bagaimana perubahan aliran sungai mempengaruhi proses bio-geomorfologi dan kesesuaian habitat untuk berbagai spesies tumbuhan dan hewan di kawasan riparian. Studi ini menggunakan model numerik untuk mensimulasikan skenario dengan perubahan aliran yang berbeda dan menilai dampaknya terhadap morfologi, kolonisasi riparian dan keberlangsungan habitat untuk banyak spesies. Hasilnya adalah beberapa solusi yang diusulkan seperti memperluas daerah banjir yang heterogen untuk meregenerasi vegetasi riparian di sungai dataran rendah, tetapi efek ini terbatas untuk sungai yang dibatasi oleh lembah, menyediakan kondisi yang sesuai bagi beberapa spesies di zona riparian. Memperluas daerah banjir juga dapat melindungi dari banjir, karena daerah tersebut dapat menyimpan dan membuang lebih banyak air. Melakukan regenerasi vegetasi riparian di hilir bendungan, tetapi tindakan ini akan lebih efektif dalam sistem yang masih memiliki musim alami. Untuk mengevaluasi efek jangka panjang dari perubahan aliran oleh tekanan tunggal atau ganda, interaksi geomorfodinamik perlu dipasangkan dengan model kesesuaian habitat.



Gambar 3. Morfologi sungai dan pola vegetasi spasial serta komposisi usia skenario tekanan tunggal, 10 tahun setelah dimulainya tekanan pada tahun 2001 dan pada tahun 2050 dan 2100. Skala biru menunjukkan tingkat dasar yang telah di *detrend* dan dinormalisasi. Area yang diindikasikan dipotong untuk mengurangi pengaruh efek batas untuk perhitungan statistik spasial dan temporal. a) skenario referensi, b) skenario perubahan iklim kering, c) skenario perubahan iklim ekstrem, d) skenario bendungan stabil dan e) skenario bendungan terbalik.

Penelitian ini menggunakan model numerik untuk menyimulasikan berbagai perubahan aliran, namun model tersebut mungkin memiliki asumsi yang terlalu sederhana atau tidak memperhitungkan semua variabel yang relevan. Selain itu, penelitian ini juga tidak mempertimbangkan interaksi antara spesies yang berbeda dalam analisis keberlanjutan habitat, yang dapat mempengaruhi hasil penelitian. Penelitian ini juga tidak mempertimbangkan keterkaitan antara unit-unit lanskap yang berbeda, yang dapat mempengaruhi kemampuan spesies ikan untuk menyelesaikan siklus hidupnya dengan bermigrasi antara dataran banjir dan saluran utama. Penelitian ini menunjukkan bahwa penelitian lebih lanjut mungkin diperlukan untuk memperbaiki model dan mempertimbangkan interaksi yang lebih kompleks antara berbagai faktor yang mempengaruhi ekosistem sungai, mempertimbangkan keterkaitan antara bio-geomorfologi dan keberlanjutan habitat dalam konteks perubahan aliran sungai, yang dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang adaptasi morfodinamika temporal dan dampaknya terhadap ekosistem sungai serta memprediksi dampak jangka panjang dari perubahan iklim dan operasi bendungan terhadap ekosistem sungai dengan lebih akurat (van Oorschot et al., 2018).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Perubahan iklim memang membawa pengaruh yang sangat besar terhadap pembangunan dan pengoperasian waduk dan bendungan dan hal-hal lain yang berada dalam kompleksitas konstruksi bendungan. Dari beberapa penelitian yang sudah diulas di atas, dapat disimpulkan bahwa, perubahan iklim mempengaruhi ekosistem air tawar tidak hanya karena peningkatan suhu tetapi juga oleh perubahan pola aliran sungai yang secara ekologis lebih kuat dibandingkan bendungan dan pemanfaatan air lainnya hingga saat ini, perubahan iklim juga mengakibatkan penurunan endapan sedimen sehingga mengancam keberlanjutan sistem pertanian, kesuburan tanah dan penghidupan lokal di delta. Perubahan iklim juga mempengaruhi berbagai komponen keselamatan bendungan dalam berbagai cara seperti risiko banjir akibat hujan deras, fluktuasi dalam penyimpanan air di waduk yang dapat terjadi akibat variabilitas presipitasi, potensi evapotranspirasi, dan perubahan penggunaan lahan serta permintaan air, yang mempengaruhi tingkat air waduk, juga memperluas daerah banjir yang heterogen untuk meregenerasi vegetasi riparian di sungai dataran rendah.

4.2 Saran

Penelitian lebih lanjut sangat diperlukan dan langkah-langkah untuk memitigasi potensi dampak ekologis perubahan iklim terhadap ekosistem air tawar, perubahan pola aliran air, memperdalam pemahaman tentang dinamika sedimentasi, mengukur ketidakpastian dengan

simulasi numerik, terutama dalam menangkap pola keseluruhan luas genangan banjir, memperhatikan perubahan temporal aliran air, mengembangkan model terpadu yang memperhitungkan kaitan perubahan penggunaan lahan dengan perubahan iklim, melakukan mitigasi risiko sebagai upaya pencegahan bahaya dan meningkatkan keselamatan konstruksi bendungan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Aras, E. (2018). Effects of multiple dam projects on river ecology and climate change: Çoruh River Basin, Turkey. *Advances in Environmental Research*, 7(2), pages 121-138. <https://doi.org/10.12989/aer.2018.7.2.121>
- Bussi, G., Darby, S. E., Whitehead, P. G., Jin, L., Dadson, S. J., Voepel, H. E., Vasilopoulos, G., Hackney, C. R., Hutton, C., Berchoux, T., Parsons, D. R., & Nicholas, A. (2021). Impact of dams and climate change on suspended sediment flux to the Mekong delta. *Science of the Total Environment*, 755, 142468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142468>
- Chi, Q., Zhou, S., Wang, L., Zhu, M., Liu, D., Tang, W., Cui, Y., & Lee, J. (2021). Exploring on the eco-climatic effects of land use changes in the influence area of the yellow river basin from 2000 to 2015. *Land*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/land10060601>
- Cui, T., Tian, F., Yang, T., Wen, J., & Khan, M. Y. A. (2020). Development of a comprehensive framework for assessing the impacts of climate change and dam construction on flow regimes. *Journal of Hydrology*, 590(August), 125358. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125358>
- Däll, P., & Zhang, J. (2010). Impact of climate change on freshwater ecosystems: A global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(5), 783–799. <https://doi.org/10.5194/hess-14-783-2010>
- Dunn, F. E., Darby, S. E., Nicholls, R. J., Cohen, S., Zarfl, C., & Fekete, B. M. (2019). Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress. *Environmental Research Letters*, 14(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab304e>
- Fluixá-sanmartín, J., Altarejos-garcía, L., Morales-torres, A., & Escuder-bueno, I. (2018). Relación del successo que tuvieron las naos que de Nueva España salieron para Filipinas este año de 1620. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 2471–2488. <http://catalogos.mecd.es/CCPB/cgi-ccpb/abnetopac/O12342/ID670f2e7d/NT4>
- Guo, Y., Huang, Q., Huang, S., Leng, G., Zheng, X., Fang, W., Deng, M., & Song, S. (2021). Elucidating the effects of mega reservoir on watershed drought tolerance based on a drought propagation analytical method. *Journal of Hydrology*, 598, 125738. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125738>
- Irvani, H., Bisri, M., & Soetopo, W. (2013). Studi optimasi pola operasi waduk sutami akibat perubahan iklim. *Jurnal Teknik Pengairan*, 4(2). <http://jurnalpengairan.ub.ac.id/index.php/jtp/article/view/187>
- Karim, F., Dutta, D., Marvanek, S., Petheram, C., Ticehurst, C., Lerat, J., Kim, S., & Yang, A. (2015). Assessing the impacts of climate change and dams on floodplain inundation and wetland connectivity in the wet-dry tropics of northern Australia. *Journal of Hydrology*, 522, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.005>
- Kim, S., Kwak, J., Noh, H. S., & Kim, H. S. (2014). Evaluation of drought and flood risks in a multipurpose dam under climate change: A case study of Chungju Dam in Korea. *Natural Hazards*, 73(3), 1663–1678. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1164-x>
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>

- Pokhrel, Y., Burbano, M., Roush, J., Kang, H., Sridhar, V., & Hyndman, D. W. (2018). A review of the integrated effects of changing climate, land use, and dams on Mekong river hydrology. *Water (Switzerland)*, *10*(3), 1–25. <https://doi.org/10.3390/w10030266>
- van Oorschot, M., Kleinhans, M., Buijse, T., Geerling, G., & Middelkoop, H. (2018). Combined effects of climate change and dam construction on riverine ecosystems. *Ecological Engineering*, *120*(March 2017), 329–344. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.037>
- Walling, D. E., & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, *39*(1–2), 111–126. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00020-1)
- Yun, X., Tang, Q., Li, J., Lu, H., Zhang, L., & Chen, D. (2021). Can reservoir regulation mitigate future climate change induced hydrological extremes in the Lancang-Mekong River Basin? *Science of the Total Environment*, *785*, 147322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147322>
- Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, *77*(1), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0>
- Zhao, Y., Liu, S., & Shi, H. (2021). Impacts of dams and reservoirs on local climate change: A global perspective. *Environmental Research Letters*, *16*(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac263c>