

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1. Latar Belakang

Ketahanan pangan merupakan fondasi esensial kesejahteraan dan pembangunan manusia, terutama di negara-negara berkembang yang masih sangat bergantung pada produksi pangan domestik (Rahman *et al.*, 2025). Komitmen global terhadap isu ini telah menguat sejak *World Food Summit* 1996 dan ditegaskan kembali melalui *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 2 tentang *Zero Hunger* (United Nations, 2023). Meskipun demikian, kerawanan pangan tetap menjadi persoalan yang persisten dan bersifat struktural. Pada tahun 2021 sekitar 11,70% populasi dunia berada dalam kondisi kerawanan pangan parah, sedangkan pada periode 2019–2021 lebih dari 1,70 juta penduduk Indonesia mengalami kekurangan kecukupan pangan (FAO, 2022). Sejumlah kajian memperkirakan bahwa persoalan kerawanan pangan masih akan menjadi tantangan global dalam beberapa dekade ke depan (Weldemariam *et al.*, 2023). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penguatan ketahanan pangan tidak dapat hanya ditempuh melalui peningkatan produksi, tetapi juga menuntut pengelolaan sumber daya penopang produksi yang berkelanjutan, efisien, dan adaptif.

Tekanan terhadap sistem pangan terus meningkat seiring pertumbuhan populasi, urbanisasi, serta kompetisi pemanfaatan lahan dan air (Viana *et al.*, 2022). Intensifikasi pemanfaatan sumber daya sering diikuti oleh degradasi lahan dan penurunan produktivitas tanah (Yang *et al.*, 2024). Pada saat yang sama, perubahan iklim meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian ekstrem, seperti kekeringan dan banjir, serta memperbesar ketidakpastian curah hujan yang secara langsung mengganggu stabilitas produksi pertanian (Bedasa & Bedemo, 2022; Spence *et al.*, 2020). Dampak kumulatif kondisi tersebut sering termanifestasi sebagai variabilitas pasokan air dan ketidakpastian kondisi tumbuh dari waktu ke waktu, sehingga gangguan produksi tidak selalu dipicu oleh kekurangan sumber daya secara tahunan, melainkan oleh kejadian spesifik pada periode-periode kritis (Rezaei *et al.*, 2023). Dalam wilayah monsun tropis, gambaran berbasis rerata tahunan, misalnya curah hujan total tahunan atau debit rata-rata tahunan, sering kali tidak cukup untuk menangkap variasi antar-bulan yang justru menentukan risiko produksi pada jendela waktu tertentu (Spence *et al.*, 2020; Viana *et al.*, 2022).

Di Indonesia, stabilitas ketahanan pangan sangat terkait dengan keberlanjutan produksi padi sawah, dikarenakan beras merupakan pangan pokok bagi sebagian besar penduduk (Fitrawaty *et al.*, 2023; Sukmayanto *et al.*, 2022). Pemerintah telah menempatkan ketahanan pangan sebagai agenda strategis melalui Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2012 serta berbagai kebijakan peningkatan produksi dan pengurangan ketergantungan impor (SPI, 2014; Wajdah *et al.*, 2024). Namun, sistem produksi padi nasional masih menghadapi tekanan yang nyata. Selama 2018 hingga 2022, produksi padi tercatat menurun sebesar 4.451.556,72 ton (BPS, 2023a). Pada sisi lain, impor beras masih terjadi, dengan total impor 429.207,3 ton pada 2022 (BPS, 2023b), serta terdapat rencana impor 433.317 ton pada 2023 (Mustajab, 2023). Kondisi tersebut menegaskan bahwa stabilitas pasokan beras nasional belum sepenuhnya aman. Oleh

karena itu, penguatan kebijakan berbasis bukti perlu diarahkan tidak hanya pada peningkatan produksi, tetapi juga pada pengelolaan faktor-faktor penentu keberlanjutan produksi padi sawah, terutama sumber daya air (Munir & Fadhilah, 2023).

Lahan sawah merupakan sistem produksi yang sangat bergantung pada air. Secara umum, budidaya padi sawah memerlukan masukan air yang besar dan dalam banyak kondisi dapat membutuhkan dua hingga tiga kali lebih banyak air dibandingkan tanaman sereal lainnya (Johnson *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2022). Dalam praktik lapangan, pengairan berlebih masih sering digunakan sebagai strategi untuk menjaga kestabilan hasil (Bo *et al.*, 2024; Fu *et al.*, 2019). Berbagai upaya peningkatan produktivitas padi pada akhirnya tetap menempatkan pengelolaan air sebagai faktor kunci, berdampingan dengan penggunaan varietas unggul dan pemupukan yang tepat (Achmad *et al.*, 2021; Surendran *et al.*, 2021). Tantangan ini diproyeksikan semakin besar ketika perubahan iklim meningkatkan suhu dan evaporasi, sementara pola hujan menjadi lebih tidak pasti, sehingga kebutuhan air irigasi berpotensi meningkat dan risiko defisit pada fase pertumbuhan sensitif menjadi lebih tinggi (Boonwichai *et al.*, 2018; Tian *et al.*, 2023). Selain itu, perubahan penggunaan/tutupan lahan (*land use/land cover*, LULC) juga dapat mengubah respons hidrologi daerah aliran sungai (DAS) dan pada akhirnya memengaruhi ketersediaan air serta hasil panen, sehingga efisiensi dan optimasi penggunaan air menjadi semakin penting (Bhandari *et al.*, 2022).

Selain kuantitas, kualitas air juga semakin menentukan keberlanjutan layanan irigasi. Aktivitas pertanian, terutama penggunaan pupuk dan pestisida, dapat meningkatkan beban nutrisi dan kontaminan pada badan air melalui limpasan, sehingga menurunkan kualitas air permukaan di sekitar areal sawah (Krupa *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018; Sazawa *et al.*, 2023). Efisiensi pemupukan yang tidak optimal berpotensi memicu eutrofikasi dan mengganggu siklus hara, yang sering berkaitan dengan penurunan oksigen terlarut serta peningkatan pertumbuhan alga (Dorgham, 2014; Qian *et al.*, 2018). Penurunan kualitas air tidak hanya mengancam ekosistem akuatik, tetapi juga dapat menurunkan efektivitas pemanfaatan air untuk irigasi dan pada akhirnya berimplikasi pada kinerja budidaya padi (Qian *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2024; Sao *et al.*, 2025). Dalam kaitannya dengan irigasi, kualitas air sepatutnya dipahami bukan sekadar sebagai indikator kondisi ekologis, melainkan sebagai prasyarat agar air yang tersedia benar-benar layak dan efektif digunakan untuk mendukung produksi.

DAS Bila memiliki posisi strategis sebagai pemasok air yang bermuara ke Danau Tempe, dengan kontribusi sekitar 77% (Faridah & Prawitosari, 2008). DAS ini mencakup area sekitar 172.819 ha dan terdiri atas Sub-DAS Bila, Sub-DAS Bungin, dan Sub-DAS Cenrana yang melintasi Kabupaten Enrekang, Sidenreng Rappang, dan Wajo (Staddal *et al.*, 2016). Kabupaten Wajo dan Sidenreng Rappang sendiri merupakan wilayah penting produksi padi di Sulawesi Selatan (BPS, 2023a). Pada skala hulu, Sub-DAS Bila berfungsi sebagai kawasan penyangga dan berkontribusi sekitar 31,20% terhadap keseluruhan DAS Bila (Faridah & Prawitosari, 2008; Asra *et al.*, 2020). Keberadaan Bendung Bila semakin mempertegas signifikansi kawasan ini bagi layanan irigasi, dengan cakupan pengairan sekitar 9.747 ha sawah (Faridah & Prawitosari, 2008; Mansyur *et al.*, 2022). Namun demikian, Sub-DAS Bila juga menghadapi berbagai tekanan, seperti perubahan penggunaan/tutupan lahan di kawasan hulu yang dapat menurunkan fungsi hidrologis dan meningkatkan sedimentasi (Munir & Faridah, 2010;

Staddal *et al.*, 2016), aktivitas penambangan di sekitar sungai, serta penggunaan unsur hara berlebih yang berkaitan dengan peningkatan kekeruhan dan pencemaran (Bahri, 2016; Wijaya, 2022). Pada bagian hilir, kejadian banjir juga dilaporkan memengaruhi pola tanam, produktivitas padi, dan pendapatan masyarakat (Abdullah *et al.*, 2022). Jika tekanan-tekanan tersebut tidak diantisipasi, maka risiko gangguan layanan irigasi dan penurunan produktivitas akan semakin besar dan pada akhirnya mengancam keberlanjutan fungsi kawasan sebagai penyangga produksi pangan.

Permasalahan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila secara inheren bersifat kompleks dan sistemik karena dibentuk oleh interaksi antara faktor biofisik, dinamika penggunaan/tutupan lahan, variabilitas iklim, dan tata kelola air. Pendekatan parsial cenderung menghasilkan diagnosis yang terfragmentasi dan kurang mampu menjelaskan hubungan antara pasokan air, kebutuhan irigasi, kualitas air, serta respons pengelolaan secara konsisten (Prakash *et al.*, 2025; Shi *et al.*, 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan terpadu yang menghubungkan dinamika hidrologi, kebutuhan air tanaman, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, dan perubahan iklim dalam satu kerangka analitis yang dapat ditelusuri untuk mendukung evaluasi opsi kebijakan secara operasional keputusan (Aein *et al.*, 2026; Wang *et al.*, 2025). Sejumlah studi juga menunjukkan bahwa pemodelan terpadu berbasis penginderaan jauh, sistem informasi geografis (SIG), model hidrologi, dan sistem dinamik (SD) efektif untuk menganalisis interaksi dan umpan balik antar-subsistem sumber daya air serta merancang strategi pengelolaan yang adaptif dan berkelanjutan dalam mendukung ketahanan pangan jangka panjang (El Fartassi *et al.*, 2025; Noor *et al.*, 2025). Berdasarkan pertimbangan tersebut, pengembangan model pengelolaan sumber daya air pada Sub-DAS Bila menjadi penting untuk mendukung keberlanjutan ketahanan pangan nasional.

1.2. Rumusan Masalah

Sistem pertanian padi sawah sangat bergantung pada ketersediaan dan kualitas sumber daya air yang keduanya dipengaruhi oleh dinamika hidrologi DAS (Yu *et al.*, 2024). Perubahan penggunaan/tutupan lahan, ekspansi dan intensifikasi budidaya, serta variabilitas dan perubahan iklim terbukti secara empiris mengubah karakteristik aliran sungai dan limpasan permukaan, sekaligus memodifikasi beban sedimen dan nutrisi yang menentukan kualitas air (Bai *et al.*, 2023; Eva *et al.*, 2024). Dalam kerangka *water security*, tekanan tersebut dapat muncul dalam tiga bentuk yang saling berhubungan, yaitu *too much* (banjir dan limpasan berlebih), *too little* (kekurangan air pada periode tertentu), dan *too dirty* (penurunan kualitas air akibat beban pencemar). Ketiga bentuk risiko tersebut dapat terjadi pada ruang jaringan sungai maupun pada ruang di luar jaringan sungai, sehingga penilaiannya menuntut keterpaduan antara proses hidrologi, penggunaan/tutupan lahan, aktivitas budidaya, dan tata kelola pada skala DAS (Chen *et al.*, 2023; Kodoatie & Sjarief, 2010; Xiang *et al.*, 2022). Kondisi ini menunjukkan bahwa persoalan sumber daya air lahan sawah tidak dapat lagi dibatasi dan dipahami secara parsial, melainkan harus ditempatkan dalam satu sistem DAS yang utuh.

Sektor pertanian menyerap sekitar 70% pengambilan air tawar global, dengan irigasi sebagai komponen dominan (Qin *et al.*, 2024). Di antara komoditas pangan, padi termasuk pengguna air terbesar, terutama karena praktik budidaya tergenang (*continuous flooding*) yang meningkatkan kebutuhan air sepanjang siklus pertumbuhan

sekaligus menambah kehilangan melalui perkolasi dan limpasan, porsinya dapat mencapai 34–43% dari total air irigasi global (Nalley *et al.*, 2022; Varol & Tokatli, 2021). Ketergantungan yang tinggi terhadap pasokan air menjadikan sistem produksi padi sangat rentan terhadap variabilitas pasokan, sebab perubahan iklim dan kejadian cuaca ekstrem dapat menggeser pola pasokan dan kebutuhan antarfase pertumbuhan maupun antarmusim (Ahmad *et al.*, 2023). Selain itu, kehilangan air selama penyaluran dari jaringan utama hingga petak sawah turut memengaruhi kinerja layanan irigasi, sehingga evaluasi keandalan tidak cukup hanya didasarkan pada kecukupan sumber daya secara agregat, tetapi juga harus mempertimbangkan distribusi layanan dan praktik pengelolaan di tingkat sistem (Achmad *et al.*, 2021). Kerentanan ini diperkuat oleh tekanan antropogenik, khususnya perubahan penggunaan/tutupan lahan dan degradasi DAS, yang berinteraksi dengan perubahan iklim dan memodifikasi kondisi sumber daya air pada skala DAS (Chapagain *et al.*, 2025). Studi-studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa praktik irigasi dan pemupukan yang berlebihan, yang sering dilakukan untuk mengejar peningkatan hasil, dapat memperbesar tekanan terhadap sumber daya air dan meningkatkan inefisiensi sistem produksi padi (Cheng *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024; Yu *et al.*, 2024).

Di wilayah Sub-DAS Bila, ketergantungan lahan sawah terhadap pasokan air sungai menjadikan sistem irigasi rentan terhadap fluktuasi debit. Pada kondisi tertentu, ketersediaan air yang tampak memadai secara total tahunan tetap dapat disertai variasi antar-bulan yang tinggi. Karakteristik hidrologi DAS Bila yang dipengaruhi kuat oleh limpasan permukaan dan curah hujan ekstrem (Staddal *et al.*, 2016) berpotensi menimbulkan ketidaksesuaian temporal antara ketersediaan air dan kebutuhan air tanaman. Ketidaksesuaian ini meningkatkan kemungkinan terjadinya defisit irigasi pada fase pertumbuhan padi yang peka terhadap cekaman air, sehingga berdampak pada produktivitas dan stabilitas produksi.

Selain keterbatasan kuantitas, degradasi kualitas air di Sub-DAS Bila juga dapat mempersempit ketersediaan air yang layak dimanfaatkan untuk irigasi. Aktivitas pertanian intensif dan degradasi kawasan hulu DAS berkontribusi terhadap peningkatan beban pencemar organik dan nutrisi di perairan sungai, yang dapat menurunkan kualitas air, antara lain melalui penurunan konsentrasi oksigen terlarut (Wang *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2024). Penurunan kualitas air tidak hanya mengganggu fungsi ekosistem perairan melalui peningkatan risiko eutrofikasi dan hipoksia, tetapi juga dapat menurunkan efektivitas pemanfaatan air untuk irigasi karena meningkatkan beban operasi dan pemeliharaan jaringan (Cabrera-Garcia *et al.*, 2024; Dai *et al.*, 2023). Dengan demikian, ketika kualitas air menurun bersamaan dengan kondisi aliran rendah, kerentanan sistem produksi padi akan meningkat karena ruang toleransi kualitas dan reliabilitas pasokan sama-sama menyempit (Anyango *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024).

Kerentanan sistem air lahan sawah diperkirakan semakin meningkat di masa depan seiring perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim yang dapat mengubah rezim aliran serta meningkatkan beban nutrisi, sehingga memperbesar ketidakpastian ketersediaan air sekaligus menekan kualitas air (Eva *et al.*, 2024; Miralles-Wilhelm *et al.*, 2023; You *et al.*, 2025). Oleh karena itu, analisis yang hanya bertumpu pada kondisi saat ini tidak lagi memadai untuk mendukung perencanaan pengelolaan sumber daya air lahan sawah jangka panjang. Diperlukan pendekatan pemodelan

terpadu yang mampu mendiagnosis kondisi saat ini (*eksisting*), memproyeksikan dinamika masa depan, serta mensintesis berbagai komponen sistem ke dalam suatu model pengelolaan yang adaptif (Pinto *et al.*, 2023). Pendekatan lintas komponen yang menggabungkan dinamika hidrologi, perubahan penggunaan/tutupan lahan, perubahan iklim, kualitas air, dan respons pengelolaan direkomendasikan sebagai basis analitis yang lebih memadai dibanding pendekatan parsial untuk mendukung pengambilan keputusan pengelolaan sumber daya air berbasis DAS (Li *et al.*, 2023; Noor *et al.*, 2025; Wagner *et al.*, 2023). Pendekatan ini penting digunakan untuk merancang strategi pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS yang berkelanjutan dalam mendukung ketahanan pangan nasional.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan dalam studi ini dirumuskan ke dalam empat pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana keandalan neraca air lahan sawah di Sub-DAS Bila dalam memenuhi kebutuhan air irigasi pada skala intra-musiman?
2. Bagaimana kondisi dan karakteristik kualitas air Sungai Bila yang dimanfaatkan untuk irigasi lahan sawah serta implikasinya terhadap kelayakan pemanfaatan air?
3. Bagaimana perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim memengaruhi proyeksi kuantitas dan kualitas air lahan sawah di Sub-DAS Bila di masa depan?
4. Bagaimana model sistem dinamik pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS dapat mensintesis dinamika kuantitas air, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, perubahan iklim, dan respons pengelolaan untuk mendukung keberlanjutan ketahanan pangan nasional?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS di Sub-DAS Bila yang mengintegrasikan dinamika kuantitas air, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, dan perubahan iklim sebagai dasar evaluasi opsi pengelolaan untuk mendukung keberlanjutan ketahanan pangan nasional. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi keandalan neraca air lahan sawah di Sub-DAS Bila dalam memenuhi kebutuhan air irigasi pada skala intra-musiman.
2. Menganalisis kondisi dan karakteristik kualitas air Sungai Bila yang dimanfaatkan untuk irigasi lahan sawah serta implikasinya terhadap kelayakan pemanfaatan air.
3. Memproyeksikan perubahan kuantitas dan kualitas air lahan sawah di Sub-DAS Bila hingga horizon 2036 berdasarkan skenario perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim.
4. Mengembangkan model sistem dinamik pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS di Sub-DAS Bila untuk mensintesis hasil analisis dan mendukung pengambilan keputusan pengelolaan yang berkelanjutan.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat ilmiah, praktis, dan kebijakan bagi para pemangku kepentingan dalam pengelolaan sumber daya air lahan sawah, khususnya pemerintah, pengelola irigasi, petani, dan kalangan akademisi. Secara umum, manfaat tersebut diarahkan untuk mendukung pengelolaan air irigasi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan di tengah perubahan lingkungan. Manfaat penelitian ini meliputi hal-hal berikut:

1. Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah melalui pendekatan terpadu yang menghubungkan analisis kuantitas air, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, dan perubahan iklim dalam satu *linked modeling chain* (rantai pemodelan terhubung) yang konsisten. Kontribusi utamanya terletak pada *traceability* (ketertelusuran) skenario, yaitu kemampuan menelusuri pengaruh perubahan LULC dan iklim dari respons hidrologi dan kebutuhan irigasi hingga kualitas air dan implikasinya terhadap pengelolaan. Selain itu, penelitian ini memperkuat pemanfaatan sistem dinamik sebagai kerangka sintesis untuk mengevaluasi opsi pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini menyediakan informasi mengenai kondisi eksisting dan proyeksi kuantitas serta kualitas air lahan sawah yang dapat dimanfaatkan oleh pengelola irigasi dan petani untuk mengidentifikasi bulan-bulan rentan, menyusun langkah antisipasi defisit, dan meningkatkan efisiensi penggunaan air di bawah tekanan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim.

3. Manfaat Kebijakan

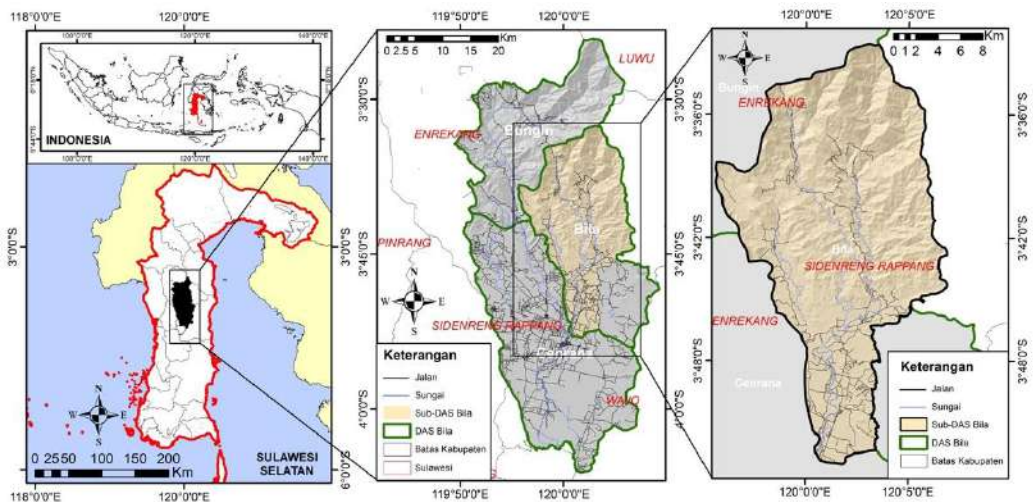
Penelitian ini menyediakan model pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS yang dapat digunakan sebagai alat pendukung pengambilan keputusan (*decision-support tool*) untuk menguji alternatif intervensi, membandingkan timbal balik (*trade-off*) antar-opsi pengelolaan, dan menetapkan prioritas kebijakan yang mendukung keberlanjutan layanan irigasi dan ketahanan pangan nasional.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Sub-DAS Bila yang secara geografis terletak pada koordinat 119°55'00"–120°10'00" BT dan 3°33'20"–3°53'20" LS, dengan luas sekitar ±41.914,86 ha. Sub-DAS Bila merupakan bagian hulu DAS Bila dan berperan sebagai salah satu pemasok utama sumber daya air bagi sistem pertanian padi sawah di Kabupaten Sidenreng Rappang dan wilayah sekitarnya. Batas spasial wilayah penelitian serta posisi Sub-DAS Bila dalam sistem DAS Bila ditunjukkan pada Gambar 1.

Ruang lingkup penelitian ini difokuskan pada pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS dengan penekanan pada dua aspek utama, yaitu kuantitas dan kualitas air. Aspek kuantitas dikaji melalui analisis neraca air dan keandalan ketersediaan air untuk memenuhi kebutuhan irigasi lahan sawah, sedangkan aspek kualitas dikaji melalui karakteristik kualitas air sungai yang dimanfaatkan untuk irigasi. Dalam pengelolaan sumber daya air terpadu (*Integrated Water Resources*

Management/IWRM), kerangka sumber daya air dibaca melalui lensa konseptual *too much*, *too little*, dan *too dirty* untuk memahami risiko air pada skala DAS (Grafton *et al.*, 2024; Noor *et al.*, 2025; Otamendi *et al.*, 2024; Pereira, 2017). Namun, fokus operasional pemodelan diarahkan terutama pada dimensi *too little* dan *too dirty* yang paling langsung berkaitan dengan layanan irigasi lahan sawah, sedangkan aspek *too much* ditempatkan sebagai konteks sistem DAS dan bukan sebagai fokus pemodelan hidrolika banjir rinci.

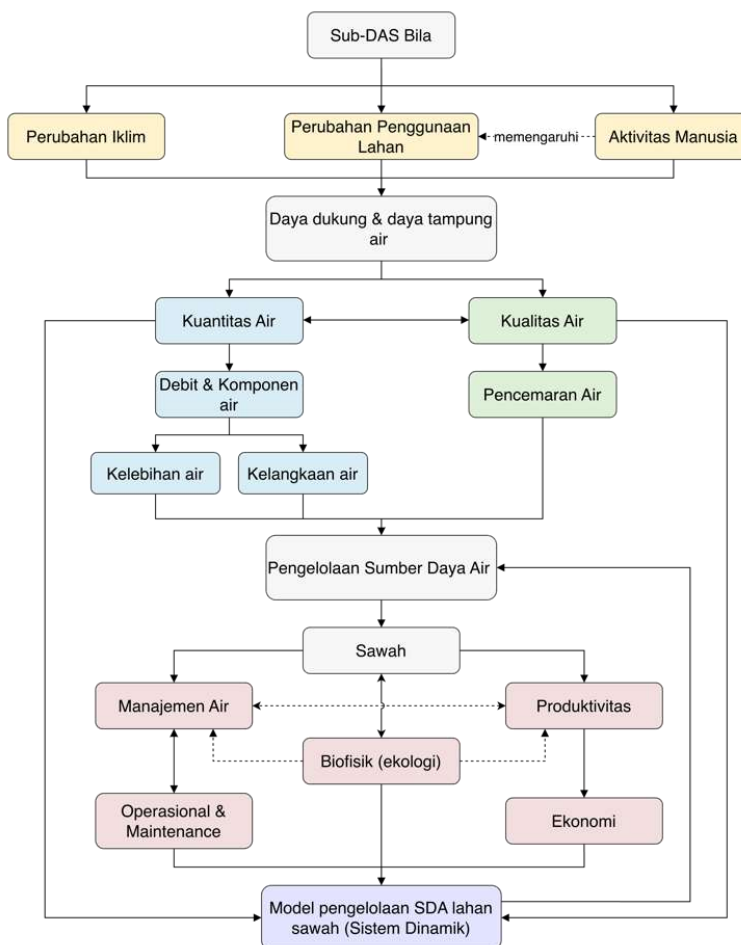


Gambar 1. Lokasi wilayah penelitian Sub-DAS Bila dalam sistem DAS Bila.

Kajian ini dibatasi pada komponen sumber daya air. Analisis kualitas tanah, pembahasan agronomi rinci di tingkat budidaya, dan analisis ekonomi mikro usahatani tidak menjadi fokus utama penelitian. Pada tahap sintesis kebijakan, dimensi ekonomi dan tata kelola hanya direpresentasikan secara terpilih melalui indikator keluaran model yang relevan dengan pengelolaan sumber daya air, sehingga penelitian ini tetap berpusat pada persoalan air sebagai penentu keberlanjutan layanan irigasi.

Secara konseptual, ruang lingkup penelitian disusun berdasarkan kerangka pemikiran yang menghubungkan faktor penggerak, proses sistem, dan respons pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Dalam kerangka tersebut, perubahan iklim, perubahan penggunaan/tutupan lahan, dan aktivitas manusia dipandang sebagai faktor penggerak yang memodifikasi proses hidrologi serta beban pencemar, sehingga memengaruhi daya dukung (ketersediaan/kuantitas) dan daya tampung (kapasitas asimilasi/kualitas) sumber daya air (Ross & Randhir, 2022; Yuan *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). Dalam kerangka tersebut, kuantitas dan kualitas air dipahami sebagai komponen yang saling berhubungan dan secara bersama-sama menentukan kinerja pengelolaan air lahan sawah (Das & Mishra, 2025; Wichaidist *et al.*, 2023). Kondisi pengelolaan sumber daya air yang belum optimal berimplikasi pada sistem produksi padi sawah dan berinteraksi dengan aspek manajemen air, kelembagaan (pemangku kepentingan), biofisik (ekologi), dan ekonomi (Khadim *et al.*, 2023). Interaksi antarkomponen inilah yang menjadi dasar pengembangan model pengelolaan sumber daya air lahan sawah sebagai alat sintesis

untuk mengevaluasi strategi pengelolaan yang lebih berkelanjutan (Miralles-Wilhelm *et al.*, 2023; Otamendi *et al.*, 2024; Zomorodian *et al.*, 2018).



Gambar 2. Kerangka pemikiran model pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila.

Secara temporal, penelitian ini mencakup analisis kondisi eksisting (baseline) dan proyeksi masa depan. Analisis kuantitas air menggunakan deret waktu 2011–2023, analisis kualitas air merepresentasikan kondisi *synoptic* tahun 2024, sedangkan proyeksi perubahan penggunaan/tutupan lahan, kuantitas air, dan kualitas air diarahkan pada horizon 2036. Secara metodologis, penelitian ini dibatasi pada pendekatan pemodelan terpadu yang meliputi pemodelan hidrologi menggunakan SWAT, kebutuhan air tanaman menggunakan CROPWAT, kualitas air sungai menggunakan QUAL2Kw, proyeksi perubahan penggunaan/tutupan lahan menggunakan CA-ANN, serta sintesis kebijakan menggunakan sistem dinamik. Dengan batasan tersebut, penelitian diarahkan untuk menghasilkan pemahaman sistemik dan model pengelolaan sumber daya air lahan sawah pada Sub-DAS Bila tanpa memperluas kajian ke DAS lain atau ke sektor nonpertanian.

1.6. Kebaharuan Penelitian (*Novelty*)

Berdasarkan telaah pustaka, penelitian-penelitian terdahulu di wilayah DAS Bila dan Sub-DAS Bila umumnya masih bersifat parsial, yakni berfokus pada hidrologi, limpasan dan banjir, perubahan penggunaan/tutupan lahan, kualitas air tertentu, atau aspek sosial yang dikaji secara terpisah. Kajian yang menghubungkan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim dengan kuantitas air, kualitas air, keandalan layanan irigasi lahan sawah, dan sintesis kebijakan berbasis sistem dalam satu kerangka yang terhubung berbasis DAS masih sangat terbatas, khususnya pada konteks Sub-DAS di Indonesia. Kondisi ini menyebabkan rekomendasi pengelolaan yang dihasilkan dari studi-studi parsial sulit ditelusuri secara menyeluruh dari faktor penggerak hingga implikasi operasionalnya terhadap layanan irigasi dan ketahanan pangan. Ringkasan studi terdahulu dan posisi gap penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan penelitian terdahulu terkait sumber daya air di DAS Bila/Sub-DAS Bila dan posisi gap integrasi

Peneliti	Judul (ringkas)	Metode/alat utama	Skala/unit analisis	Komponen yang dikaji	Keterbatasan terhadap kerangka penelitian ini
Faridah & Prawitosari (2008)	Simulasi LULC untuk kelestarian Bendung Bila	USLE; skenario konservasi dan penggunaan lahan	Sub-DAS Bila	Erosi–sedimen; konservasi lahan	Belum menautkan ke neraca air sawah, keandalan layanan irigasi, kualitas air, serta skenario iklim
Taufik <i>et al.</i> (2014)	Pengelolaan air pada usahatani padi sawah irigasi	RAK; AWD, intermiten, tergenang	Tingkat petak / usahatani	Praktik irigasi; respons budidaya; unsur sosio-ekonomi terbatas	Tidak berbasis DAS; tidak mengintegrasikan pasokan hidrologi, skenario LULC/iklim, maupun sintesis kebijakan sistemik
Staddal <i>et al.</i> (2016)	Analisis debit aliran sungai DAS Bila	Statistik debit maksimum–minimum; koefisien aliran permukaan	DAS Bila (2002–2011)	Debit; variasi hidrologi	Fokus pada kuantitas aliran; belum mencakup kebutuhan air tanaman, keandalan pemenuhan kebutuhan irigasi, kualitas air, dan pengelolaan terpadu
Staddal (2016)	Analisis limpasan permukaan dengan SWAT	SWAT	DAS Bila	Limpasan permukaan (<i>runoff</i>)	Tidak mengkaji kebutuhan air tanaman/neraca air sawah dan keandalan; tidak memasukkan kualitas air dan sintesis kebijakan
Asra <i>et al.</i> (2020)	Prediksi perubahan penggunaan/	CA-Markov	Sub-DAS Bila	LULC dan proyeksi spasial	Fokus pada dinamika LULC; belum menghubungkan ke

	penutupan lahan				respons hidrologi, neraca air sawah, kualitas air, dan skenario iklim
Anami <i>et al.</i> (2020)	Kinerja Sub-DAS melalui pendekatan lahan dan tata air	<i>Purposive</i> sampling; TSS (gravimetri); pengukuran debit	Sub-DAS Bila	Debit; TSS (indikasi kualitas); tata air	Kualitas air masih terbatas pada indikator tertentu; belum ada pemodelan kualitas air dinamis, integrasi skenario LULC/iklim, dan evaluasi keandalan neraca air sawah
Muhammad & Aulia (2020)	Strategi mitigasi banjir Sungai Bila	HEC-RAS 5.0.7; profil muka air; rekomendasi struktural	Sungai Bila	Banjir/hidrolika	Fokus pada banjir; belum menautkan ke kebutuhan air irigasi sawah, kualitas air, serta <i>trade-off</i> pengelolaan pada skala DAS
Fa'iq (2022)	Pemodelan banjir pada DAS Bila	HEC-RAS; HSS Nakayasu; kala ulang 2–25 tahun	DAS Bila	Banjir; area terdampak	Fokus pada banjir; belum mengintegrasikan kuantitas–kualitas, kebutuhan air tanaman, dan skenario perubahan iklim–LULC untuk pengelolaan sawah
Wijaya (2022)	Partisipasi masyarakat pada pertambangan pasir Sungai Bila	Metode kualitatif (wawancara, observasi, dokumentasi)	Lokal (Sidenreng Rappang)	Sosial–partisipasi; dampak pertambangan	Fokus pada aspek sosial; belum dikaitkan secara kuantitatif dengan dinamika hidrologi/kualitas air dan implikasi layanan irigasi sawah
Abdullah <i>et al.</i> (2022)	Proyeksi kerawanan banjir berbasis model iklim	HadCM3; proyeksi curah hujan; indeks kerawanan	DAS Bila	Iklim; banjir	Fokus pada iklim–banjir; belum menganalisis neraca air sawah dan keandalan layanan irigasi; tidak mengkaji kualitas air
Salimin (2023)	Pengaruh LULC terhadap runoff dengan SWAT	SIG untuk LULC + SWAT; analisis deskriptif	DAS Bila	LULC; runoff/hidrologi	Tidak mengkaji kebutuhan air tanaman/keandalan neraca air sawah; tidak mengkaji kualitas air; belum ada integrasi skenario iklim dan sintesis sistem dinamik

Kebaruan utama penelitian ini terletak pada pembangunan pendekatan pengelolaan sumber daya air lahan sawah yang integratif dan berbasis sistem, dengan menggabungkan berbagai pendekatan pemodelan yang pada umumnya digunakan secara terpisah melalui *linked modeling chain* yang mengintegrasikan SWAT, CROPWAT, QUAL2Kw, CA-ANN, skenario iklim CMIP6, dan sistem dinamik dalam satu kerangka pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS. Integrasi ini memungkinkan hubungan sebab-akibat antara perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim dengan respons hidrologi, kebutuhan irigasi, kualitas air, dan *outcome* pengelolaan ditelusuri secara konsisten.

Pada tingkat metodologis, penelitian ini tidak hanya menilai kecukupan air, tetapi mengevaluasi keandalan layanan irigasi pada skala intra-musiman melalui integrasi SWAT-CROPWAT dan indikator kuantitatif, seperti *Irrigation Reliability Index* (IRI) serta *Irrigation Deficit Severity Index* (IDSI). Model SWAT digunakan untuk mensimulasikan respons hidrologi DAS terhadap perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim (Arnold *et al.*, 2012), kemudian dikombinasikan dengan CROPWAT untuk menghitung kebutuhan air tanaman padi dan membentuk neraca air irigasi sebagai dasar penilaian keandalan (Allen *et al.*, 1998). Walaupun kombinasi SWAT dan CROPWAT telah digunakan dalam sejumlah studi (Buri *et al.*, 2024; Mishra *et al.*, 2021; Yalcin, 2023), penerapannya secara eksplisit untuk menilai keandalan neraca air lahan sawah dalam kerangka skenario perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim melalui indikator IRI serta IDSI masih relatif terbatas, terutama pada konteks Sub-DAS di Indonesia. Kebaruan lain terletak pada penempatan kualitas air sungai melalui QUAL2Kw sebagai prasyarat layanan irigasi, bukan sekadar indikator kondisi ekologis. QUAL2Kw telah banyak digunakan untuk menganalisis dinamika kualitas air sungai dan transport polutan (Babamiri *et al.*, 2020; Ghorbani *et al.*, 2022; Goodarzi *et al.*, 2023), namun penerapannya untuk menautkan secara langsung dinamika kualitas air sungai dengan kebutuhan layanan irigasi lahan sawah, terutama dalam kerangka pengelolaan sumber daya air berbasis DAS, masih relatif terbatas.

Selain itu, penelitian ini menggabungkan proyeksi perubahan penggunaan/tutupan lahan berbasis CA-ANN dan proyeksi iklim global (*General Circulation Models*, GCM) yang relevan untuk kawasan Asia Tenggara untuk menilai tekanan gabungan masa depan, kemudian mensintesis seluruh keluaran ke dalam model sistem dinamik sebagai dasar evaluasi opsi pengelolaan. Banyak studi memanfaatkan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan proyeksi iklim untuk menilai ketersediaan air pertanian secara umum (Akoko *et al.*, 2020; Alejo & Ella, 2019; Colín-García *et al.*, 2024; Yalcin, 2023), tetapi penelitian ini menempatkan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim sebagai faktor penggerak bersama yang diuji secara konsisten dalam satu kerangka penilaian. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada keterlacakan skenario dari perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim hingga implikasinya terhadap kuantitas air, kualitas air, keandalan layanan irigasi, dan *outcome* pengelolaan yang relevan bagi ketahanan pangan nasional.

1.7. Daftar Pustaka

- Abdullah, Hardianty H, R., Boceng, A., & Asra, R. (2022). Flood Vulnerability Projection in Rice Land Based on The HadCM3 Climate Model in The Bila Watershed Province Of South Sulawesi. *Jurnal Galung Tropika*, 11(2), 143–152. <https://doi.org/10.31850/jgt.v11i2.898>
- Achmad, M., Samsuar, S., & Maulidya, R. (2021). The analysis of water loses in the secondary channels of Bissua irrigation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 807(3), 032003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/3/032003>
- Aein, R., Seifi, A., Zahedi Rad, V., & Mousavi, S. J. (2026). A system dynamics model for agricultural water management in Shapour River basin using sustainable irrigation policy design under water scarcity and salinity. *Environmental Development*, 58, 101396. <https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2025.101396>
- Ahmad, Q. ul A., Moors, E., Biemans, H., Shaheen, N., Masih, I., & ur Rahman Hashmi, M. Z. (2023). Climate-induced shifts in irrigation water demand and supply during sensitive crop growth phases in South Asia. *Climatic Change* 2023 176:11, 176(11), 150-. <https://doi.org/10.1007/S10584-023-03629-7>
- Anami, M. F. K., Lias, S. A., & Ahmad, A. (2020). Analisis Kinerja Sub Das Bila Dengan Pendekatan Lahan dan Tata Air. *Jurnal Ecosolum*, 9(1), 1–18.
- Anyango, G. W., Bhowmick, G. D., & Sahoo Bhattacharya, N. (2024). A critical review of irrigation water quality index and water quality management practices in micro-irrigation for efficient policy making. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100304. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100304>
- Asra, R., Mappiasse, M. F., & Nurnawati, A. A. (2020). The Application of CA-Markov Model for Prediction of Land Use Change in Sub-Watershed Bila Year 2036. *AGROVITAL : Jurnal Ilmu Pertanian*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.35329/agrovital.v5i1.630>
- Badan Pusat Statistik. (2023a). *Produksi Beras Menurut Kabupaten/Kota Provinsi Sulawesi Selatan (Ton)*, 2019-2021. <https://www.bps.go.id/id>
- Badan Pusat Statistik. (2023b). *Impor Beras Menurut Negara Asal Utama, 2000-2022* (Update data, 2 Agustus 2023). <https://www.bps.go.id/Statictable/2014/09/08/1043/Impor-Beras-Menurut-Negara-Asal-Utama-2000-2021.Html>
- Bahri, S. (2016). Identifikasi sumber pencemar Nitrogen (n) dan Fosfor (p) pada pertumbuhan melimpah tumbuhan air di Danau Tempe, Sulawesi Selatan. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(2), 159–174. <https://doi.org/10.32679/jsda.v12i2.63>
- Bai, X., Zhao, W., Liu, H., Zhang, Y., Yang, Q., Liu, J., & Chang, X. (2023). Effects of precipitation changes and land-use alteration on streamflow: A comparative analysis from two adjacent catchments in the Qilian Mountains, arid northwestern China. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1097049. <https://doi.org/10.3389/FENV.2023.1097049>
- Bedasa, Y., & Bedemo, A. (2022). The effect of climate change on food insecurity in the Horn of Africa. *GeoJournal* 2022 88:2, 88(2), 1829–1839. <https://doi.org/10.1007/S10708-022-10733-1>
- Bhandari, R., Thakali, R., & ... (2018). Effects of Soil Data Resolution on the Simulated Stream Flow and Water Quality: Application of Watershed-Based SWAT Model. ... 2018: *Watershed* <https://doi.org/10.1061/9780784481400.035>
- Bo, Y., Wang, X., van Groenigen, K. J., Linqvist, B. A., Müller, C., Li, T., Yang, J., Jägermeyr, J., Qin, Y., & Zhou, F. (2024). Improved alternate wetting and

- drying irrigation increases global water productivity. *Nature Food* 2024 5:12, 5(12), 1005–1013. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01081-z>
- Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M. S., Weesakul, S., & Datta, A. (2018). Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1157–1164. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.146>
- Cabrera-Garcia, J. C., Toro-Herrera, M. A., & Raudales, R. E. (2024). Assessing micro-irrigation clogging risk through water quality classification systems. *Water Practice and Technology*, 19(8), 3237–3250. <https://doi.org/10.2166/WPT.2024.199>
- Chapagain, K., Babel, M. S., Mohanasundaram, S., Shrestha, S., Luong, H. T., & Karthe, D. (2025). Impact assessment of climate and land use change on the water-energy-food nexus: An application to the Ping River Basin, Thailand. *Science of The Total Environment*, 971, 179067. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2025.179067>
- Chen, S., Chen, Z., Zhang, Y., & Huang, J. (2023). A coupled modeling framework to screen reclaimed water supplement schemes in an urban watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101602. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2023.101602>
- Cheng, H., Shu, K., Zhu, T., Wang, L., Liu, X., Cai, W., Qi, Z., & Feng, S. (2022). Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water and nitrogen use, and greenhouse gas emissions in rice paddy fields. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131487. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131487>
- Dai, M., Zhao, Y., Chai, F., Chen, M., Chen, N., Chen, Y., Cheng, D., Gan, J., Guan, D., Hong, Y., Huang, J., Lee, Y., Leung, K. M. Y., Lim, P. E., Lin, S., Lin, X., Liu, X., Liu, Z., Luo, Y. W., ... Zhang, Z. (2023). Persistent eutrophication and hypoxia in the coastal ocean. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e19. <https://doi.org/10.1017/CFT.2023.7>
- Das, A., & Mishra, S. (2025). Smart and sustainable water management: policy, technology, and innovation pathways for resource resilience. *Green Technology, Resilience, and Sustainability* 2025 5:1, 5(1), 5-. <https://doi.org/10.1007/S44173-025-00022-8>
- Dorham, M. M. (2014). *Effects of Eutrophication. In Eutrophication: Causes, Consequences and Control* (pp. 29–44). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7814-6_3
- El Fartassi, I., Metcalfe, H., El Alami, R., Diarra, A., Alonso-Chavez, V., Waine, T. W., Zawadzka, J., Milne, A. E., & Corstanje, R. (2025). Adaptations in agricultural water management in arid regions: Modelling farmer behaviour and cooperation on irrigation sustainability in Morocco. *Agricultural Water Management*, 319, 109789. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2025.109789>
- Eva, E. A., Marzen, L. J., Lamba, J., Ahsanullah, S. M., & Mitra, C. (2024). Projection of land use and land cover changes based on land change modeler and integrating both land use land cover and climate change on the hydrological response of Big Creek Lake Watershed, South Alabama. *Journal of Environmental Management*, 370, 122923. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.122923>
- Fa'iq, M. (2022). *Pemodelan Banjir Pada Daerah Aliran Sungai Bila* [Skripsi]. Universitas Hasanuddin.
- Faridah, S. N., & Prawitosari, T. (2008). Simulasi Penggunaan Lahan Untuk Kelestarian Bendung Bila pada Sub Das Bila Propinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal*

<https://doi.org/https://doi.org/10.19028/jtep.022.1.%25p>

- Fitrawaty, Hermawan, W., Yusuf, M., & Maipita, I. (2023). A simulation of increasing rice price toward the disparity of income distribution: An evidence from Indonesia. *Heliyon*, 9(3), e13785. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13785>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. In *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2211en>
- Fu, J., Wu, Y., Wang, Q., Hu, K., Wang, S., Zhou, M., Hayashi, K., Wang, H., Zhan, X., Jian, Y., Cai, C., Song, M., Liu, K., Wang, Y., Zhou, F., & Zhu, J. (2019). Importance of subsurface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff. *Agricultural Water Management*, 213, 627–635. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.11.005>
- Johnson, J. M., Becker, M., Dossou-Yovo, E. R., & Saito, K. (2024). Enhancing rice yields, water productivity, and profitability through alternate wetting and drying technology in farmers' fields in the dry climatic zones of West Africa. *Agricultural Water Management*, 304, 109096. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109096>
- Kodoatie, R. J., & Sjarief, R. (2010). *Tata Ruang Air* (S. Nurasih & A. Sadewa, Eds.; 1st ed.). C.V Andi Offset.
- Krupa, M., Tate, K. W., van Kessel, C., Sarwar, N., & Linquist, B. A. (2011). Water quality in rice-growing watersheds in a Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 290–301. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2011.09.004>
- Li, Y., Cai, Y., Chen, X., Xu, Z., & Fu, Q. (2023). An integrated modeling approach for coupled risk management of regional Blue- and Greenwater under changing land-use patterns. *Journal of Hydrology*, 625, 129958. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129958>
- Liu, J., Liu, H., Liu, R., Mostofa Amin, M., Zhai, L., Lu, H., Wang, H., Zhang, X., Zhang, Y., & Zhao and Xiaodong Ding, Y. (2018). Water Quality in Irrigated Paddy Systems. In *Irrigation in Agroecosystems*. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77339>
- Mansyur, S., Ihsan Djindar, N., Nur, M., Asmunandar, & Hamado, H. (2022). Colonial Irrigation in The National Rice Grand: Important Value Analysis and Recommendations for Education Utilization. *Tumotowa*, 5(1), 13–26. <https://doi.org/10.24832/tmt.v5i1.132>
- Miralles-Wilhelm, F., Matthews, J. H., Karres, N., Abell, R., Dalton, J., Kang, S. T., Liu, J., Maendly, R., Matthews, N., McDonald, R., Muñoz-Castillo, R., Ochoa-Tocachi, B. F., Pradhan, N., Rodriguez, D., Vigerstøl, K., & van Wesenbeeck, B. (2023). Emerging themes and future directions in watershed resilience research. *Water Security*, 18, 100132. <https://doi.org/10.1016/J.WASEC.2022.100132>
- Mohamad Noor, S. S., Saad, N. A., Mohd Akhir, M. F., & Abd Rahim, M. S. (2025). QUAL2K water quality model: A comprehensive review of its applications, and limitations. *Environmental Modelling & Software*, 184, 106284. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2024.106284>
- Muhammad, R. M., & Aulia, M. D. (2020). *Strategi Mitigasi Dalam Mengurangi Dampak Banjir Pada Sungai Bila Di Kabupaten Sidrap* [Doctoral dissertation]. Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Munir, A., & Fadhilah. (2023). Climate Change and Food Insecurities: The Importance of Food Loss and Waste Reduction in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth*

- and *Environmental Science*, 1134(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1134/1/012040>
- Mustajab, R. (2023). *Cek Data Neraca Pangan Indonesia 2023, Mana yang Bakal Impor?* <https://DataIndonesia.Id/Sektor-Riil/Detail/Cek-Data-Neraca-Pangan-Indonesia-2023-Mana-Yang-Bakal-Impor>.
- Nalley, L. L., Massey, J., Durand-Morat, A., Shew, A., Parajuli, R., & Tsiboe, F. (2022). Comparative economic and environmental assessments of furrow- and flood-irrigated rice production systems. *Agricultural Water Management*, 274, 107964. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107964>
- Pinto, V. M., de Borja Reis, A. F., de Melo, M. L. A., Reichardt, K., Santos, D., & de Jong van Lier, Q. (2023). Sustainable irrigation management in tropical lowland rice in Brazil. *Agricultural Water Management*, 284, 108345. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108345>
- Prakash, A., George, R., & Barua, A. (2025). Socio-hydrological frameworks for adaptive governance: addressing climate uncertainty in South Asia. *Frontiers in Water*, 7, 1556820. <https://doi.org/10.3389/FRWA.2025.1556820>
- Qian, W., Gan, J., Liu, J., He, B., Lu, Z., Guo, X., Wang, D., Guo, L., Huang, T., & Dai, M. (2018). Current status of emerging hypoxia in a eutrophic estuary: The lower reach of the Pearl River Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 205, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.03.004>
- Qin, J., Duan, W., Zou, S., Chen, Y., Huang, W., & Rosa, L. (2024). Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture. *Nature Communications* 2024 15:1, 15(1), 3084-. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47383-5>
- Rahman, T. U., Faraz, A., Nawaz, T., Saud, S., Fahad, S., & Harrison, M. T. (2025). Towards Sustainable Solutions: Climate Change and Food Security in a Globalized World. *Food and Energy Security*, 14(5), e70126. <https://doi.org/10.1002/FES3.70126>
- Rezaei, E. E., Webber, H., Asseng, S., Boote, K., Durand, J. L., Ewert, F., Martre, P., & MacCarthy, D. S. (2023). Climate change impacts on crop yields. *Nature Reviews Earth & Environment* 2023 4:12, 4(12), 831–846. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0>
- Salimin, F. (2023). *Analisis Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan terhadap Limpasan Permukaan Menggunakan Model Soil and Water Assessment Tool di DAS Bila [Skripsi]*. Universitas Hasanuddin.
- Sao, S., Rozanah, U. N., Ozawa, R., Phung, L. D., & Watanabe, T. (2025). Impacts of continuous irrigation using treated municipal wastewater on rice-soil systems: A three-year study. *Science of The Total Environment*, 971, 179089. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2025.179089>
- Sazawa, K., Komiyama, T., Tsuchida, T., Taguchi, R., Nakashima, F., Ohta, T., Nishio, M., Yamazaki, Y., & Kuramitz, H. (2023). Effects of paddy irrigation-drainage system on water quality and productivity of small rivers in the Himi region of Toyama, Central Japan. *Journal of Environmental Management*, 342, 118305. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118305>
- Serikat Petani Indonesia (SPI). (2014). *Visi Kedaulatan Pangan Indonesia Tahun 2014-2024*. <https://spi.or.id/visi-kedaulatan-pangan-indonesia-2014-2024/>
- Shi, Y., Wang, Z., Zhao, J., Chen, J., & Chen, J. (2024). A socio-hydrology model for water-urban-land-population-production nexus. *Journal of Cleaner Production*, 482, 144202. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144202>
- Spence, N., Hill, L., & Morris, J. (2020). How the global threat of pests and diseases impacts plants, people, and the planet. *Plants, People, Planet*, 2(1), 5–13. <https://doi.org/10.1002/PPP3.10088>

- Staddal, I. (2016). The Analysis of Surface Runoff Using SWAT Model in Bila Watershed, South Sulawesi. *Jurnal Technopreneur (JTech)*, 4(1), 57–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.30869/jtech.v4i1.53>
- Staddal, I., Haridjaja, O., & Hidayat, Y. (2016). The Analysis of Streamflow on Bila Watershed, South Sulawesi. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(2), 117–130. <https://doi.org/10.32679/jsda.v12i2.56>
- Sukmayanto, M., Listiana, I., & Hasanuddin, T. (2022). Analisis Produksi dan Pendapatan Usahatani Padi di Kabupaten Lampung Tengah. *Jurnal Ekonomi Pertanian Dan Agribisnis*, 6(2), 625. <https://doi.org/10.21776/ub.jepa.2022.006.02.26>
- Surendran, U., Raja, P., Jayakumar, M., & Subramoniam, S. R. (2021). Use of efficient water saving techniques for production of rice in India under climate change scenario: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127272. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127272>
- Sušnik, J., & Mellios, N. (2025). The historical role of system dynamics modelling in understanding and supporting integrated natural resource management. *Cambridge Prisms: Water*, 3, e6. <https://doi.org/10.1017/WAT.2025.10002>
- Taufik, M., Arafah, Nappu, B., & Djufry, F. (2014). Analisis Pengelolaan Air dalam Usahatani Padi pada Lahan Sawah Irigasi di Sulawesi Selatan. *Jurnal Pengkajian Dan Pengembangan Teknologi Pertanian*, 17(1), 61–68.
- Tian, X., Dong, J., Jin, S., He, H., Yin, H., & Chen, X. (2023). Climate change impacts on regional agricultural irrigation water use in semi-arid environments. *Agricultural Water Management*, 281, 108239. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108239>
- United Nations. (2023). *The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023* (Jennifer Ross, Ed.). United Nations Publications. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf>
- Varol, M., & Tokatli, C. (2021). Impact of paddy fields on water quality of Gala Lake (Turkey): An important migratory bird stopover habitat. *Environmental Pollution*, 287, 117640. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.117640>
- Viana, C. M., Freire, D., Abrantes, P., Rocha, J., & Pereira, P. (2022). Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 806, 150718. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150718>
- Wagner, P. D., Kumar, S., & Fohrer, N. (2023). Integrated modeling of global change impacts on land and water resources. *Science of The Total Environment*, 892, 164673. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.164673>
- Wajdah, R. R., Nurmali, R., & Yusalina. (2024). Ketersediaan beras menuju kemandirian pangan: pendekatan sistem dinamik. *Analisis Kebijakan Pertanian*, 22(1), 63–80. <https://doi.org/10.21082/AKP.V22I1.63-80>
- Wang, M., Bodirsky, B. L., Rijneveld, R., Beier, F., Bak, M. P., Batool, M., Droppers, B., Popp, A., van Vliet, M. T. H., & Strokal, M. (2024). A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nature Communications* 2024 15:1, 15(1), 880-. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>
- Wang, R., Yuan, Y., Luo, Y., Pitchford, A., Bingner, R. L., Denton, D., Yen, H., & Zhang, M. (2018). *Tiered Approaches in Analyzing Rice Field Pesticide Fate and Transport for Ecological Risk Assessment* (pp. 347–377). <https://doi.org/10.1021/bk-2018-1283.ch016>
- Wang, X., Zhu, H., Hou, S., Cui, H., & Yan, B. (2024). Environmental impacts of fertilization during rice production in saline-alkali paddy fields based on life

- cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 467, 142947. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.142947>
- Wang, Y., Wang, H., Sun, J., Qi, P., Zhang, W., & Zhang, G. (2025). Spatially optimized allocation of water and land resources based on multi-dimensional coupling of water quantity, quality, efficiency, carbon, food, and ecology. *Agricultural Water Management*, 309, 109340. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2025.109340>
- Weldemariam, L. F., Sakdapolrak, P., & Ayanlade, A. (2023). Household food-security strategies and migration in Tigray, Northern Ethiopia. *Scientific African*, 21, e01801. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01801>
- Wichaidist, B., Intrman, A., Puttrawutichai, S., Rewtragulpaibul, C., Chuanpongpanich, S., & Suksaroj, C. (2023). The Effect of Irrigation Techniques on Sustainable Water Management for Rice Cultivation System - A Review. *Applied Environmental Research*, 45(4). <https://doi.org/10.35762/AER.2023024>
- Wijaya, M. S. (2022). *Partisipasi Masyarakat dalam Penanggulangan Kerusakan Lingkungan Hidup di Pertambangan Pasir Sungai Bila Kabupaten Sidenreng Rappang*. Institut Pemerintahan Dalam Negeri. <http://eprints.ipdn.ac.id/10399/>
- Xiang, J., Tan, S., Tan, X., Long, J., Xiao, T., & Wang, W. (2022). Spatiotemporal assessment of water security in the Dongting Lake region: Insights from projection pursuit method and sparrow search algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134447. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134447>
- Yang, L., Wang, L., Chu, J., Zhao, H., Zhao, J., Zang, H., Yang, Y., & Zeng, Z. (2024). Improving soil quality and wheat yield through diversified crop rotations in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 244, 106231. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2024.106231>
- You, Y., Jiang, P., Wang, Y., Wang, W., Chen, D., & Hu, X. (2025). Growth in agricultural water demand aggravates water supply-demand risk in arid Northwest China: more a result of anthropogenic activities than climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(22), 6373–6392. <https://doi.org/10.5194/HESS-29-6373-2025>
- Yu, Q., Dai, Y., Wei, J., Wang, J., Liao, B., & Cui, Y. (2024). Rice yield and water productivity in response to water-saving irrigation practices in China: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 302, 109006. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109006>
- Zhou, Z., Jin, J., & Wang, L. (2022). Modeling the effects of elevation and precipitation on Rice (*Oryza sativa* L.) production considering multiple planting methods and cultivars in Central China. *Science of The Total Environment*, 813, 152679. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152679>
- Zhu, J., Peng, S., Shen, X., Lin, Z., Gong, L., Zhang, R., & Huang, B. (2024). Multiple scale impacts of land use intensity on water quality in the Chishui river source area. *Ecological Indicators*, 166, 112396. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2024.112396>

BAB II

ANALISIS NERACA AIR LAHAN SAWAH PADA SUB-DAS BILA

2.1. Abstrak

Ketersediaan air irigasi pada daerah aliran sungai (DAS) beriklim monsun bukan sekadar bertumpu pada besarnya sumber daya air tahunan, melainkan lebih ditentukan oleh kesesuaian temporal antara pasokan air sungai dan kebutuhan air tanaman. Penelitian ini bertujuan menganalisis keterkaitan antara ketersediaan air sungai dan kebutuhan air irigasi padi, serta mengevaluasi neraca air dan keandalan sistem irigasi di Sub-DAS Bila, Sulawesi Selatan. Penelitian ini menggunakan pendekatan hidro-agronomik terintegrasi dengan menggabungkan model hidrologi *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) untuk mensimulasikan karakteristik hidrologi dan ketersediaan air sungai sebagai sisi pasokan, serta model CROPWAT untuk mengestimasi kebutuhan air irigasi padi sebagai sisi permintaan. Kinerja model SWAT menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat baik pada periode kalibrasi dan validasi, dengan nilai *Nash–Sutcliffe Efficiency* (NSE) masing-masing sebesar 0,77 dan 0,76, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,80 dan 0,77, serta *percent bias* (P_{bias}) sebesar -2,12% dan -0,89%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rezim hidrologi Sub-DAS Bila didominasi oleh aliran bawah permukaan, di mana aliran lateral (Q_{lat}) dan aliran air tanah dangkal (Q_{gw}) menyumbang lebih dari 80% terhadap total hasil air (WYLD) tahunan sekitar 1.882,03 mm. Meskipun pada skala tahunan ketersediaan air sungai menunjukkan kondisi surplus, analisis integratif pasokan–permintaan menemukan adanya defisit air irigasi pada bulan-bulan kritis, khususnya April, Oktober, dan November. Nilai *Irrigation Reliability Index* (IRI) sebesar 0,75 menunjukkan bahwa kebutuhan irigasi tidak terpenuhi pada 25% bulan dalam satu tahun, sedangkan *Irrigation Deficit Severity Index* (IDSI) mencapai 106,12 mm atau sekitar 13,90% dari total kebutuhan irigasi tahunan. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa tantangan utama pengelolaan irigasi di Sub-DAS Bila bukan terletak pada keterbatasan sumber daya air tahunan, melainkan pada ketidaksinkronan temporal antara pasokan air sungai dan puncak kebutuhan air irigasi padi. Dengan demikian, evaluasi neraca air berbasis integrasi SWAT–CROPWAT memberikan dasar operasional yang lebih kuat untuk menilai reliabilitas layanan irigasi pada skala intra-musiman di wilayah monsun tropis.

Kata kunci: Kebutuhan air irigasi, ketersediaan air sungai, lahan sawah, neraca air, Sub-DAS Bila

2.2. Pendahuluan

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan salah satu komoditas pangan pokok dunia yang menyuplai lebih dari 60% kebutuhan kalori bagi lebih dari setengah populasi global (Jin *et al.*, 2024). Produktivitas tanaman padi sangat bergantung pada ketersediaan air, terutama pada fase penanaman dan reproduksi, sehingga kebutuhan air tawarnya mencapai dua hingga tiga kali lebih besar dibandingkan tanaman sereal lainnya (Johnson *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2022). Secara global, sekitar 24–30% sumber daya air tawar dimanfaatkan untuk produksi beras, menjadikan sektor ini sebagai salah satu pengguna air terbesar di dunia (Mullick & Das, 2021). Seiring dengan meningkatnya permintaan pangan, tekanan terhadap sumber daya air juga semakin tinggi, dan kelangkaan air telah diidentifikasi sebagai salah satu tantangan utama bagi

keberlanjutan pertanian, khususnya di wilayah beriklim monsun tropis (Kumar *et al.*, 2023; Saikanth *et al.*, 2023).

Indonesia, sebagai wilayah tropis beriklim monsun, beras tetap menjadi pangan pokok utama dan dikonsumsi oleh hampir 90% penduduk, sehingga keberlanjutan produksi padi mempunyai arti strategis bagi ketahanan pangan nasional (Tirtalistyani *et al.*, 2022). Provinsi Sulawesi Selatan merupakan salah satu sentra produksi padi terbesar di luar pulau Jawa (BPS, 2023), dan hampir 50% sistem produksinya bergantung pada irigasi (Lias *et al.*, 2020). Namun, aktivitas pertanian pada DAS Bila, yang merupakan salah satu wilayah penghasil padi utama di provinsi tersebut, semakin rentan terhadap fluktuasi hidrologi musiman dan ketidakmerataan distribusi air (Abdullah *et al.*, 2022; Staddal *et al.*, 2016). Kondisi ini menimbulkan risiko penurunan hasil panen secara signifikan serta penurunan produksi padi provinsi sebesar 861.979,22 ton pada periode 2018–2021 (BPS, 2023), sehingga pengelolaan air yang adaptif menjadi semakin penting dalam menghadapi dinamika hidrologi monsun (Bwire *et al.*, 2024). Dengan mempertimbangkan peran strategisnya dalam sistem produksi padi beririgasi dan indikasi kerentanannya terhadap fluktuasi hidrologi musiman, Sub-DAS Bila dipilih sebagai studi kasus untuk menilai hubungan antara pasokan air dan kebutuhan air irigasi serta implikasinya terhadap keandalan layanan irigasi.

Kajian neraca air menjadi penting dilakukan untuk mendiagnosis ketersediaan air, mengidentifikasi periode surplus dan defisit, serta merumuskan strategi adaptif dalam pengelolaan sumber daya air (Ansari *et al.*, 2023; Wendt *et al.*, 2021). Pada skala DAS, analisis neraca air juga menjadi sangat relevan karena dinamika hidrologi dibentuk oleh interaksi antara variabilitas iklim, karakteristik biofisik DAS, dan aktivitas antropogenik yang bekerja lintas ruang dari hulu hingga hilir (Huang & Yang, 2026; Li & Quiring, 2021). Pemodelan hidrologi, khususnya menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) menyediakan kerangka yang kuat untuk mensimulasikan proses hujan–limpasan, hasil air (*water yield/WYLD*), dan komponen hidrologi utama lainnya pada skala DAS (Arnold *et al.*, 2012; Putera *et al.*, 2020; Veettil *et al.*, 2022). Model ini telah digunakan secara luas untuk penilaian hidrologi di berbagai negara, kinerjanya telah banyak dikalibrasi dan divalidasi, didukung oleh komunitas pengguna yang besar, kemudahan implementasi, serta terbukti memadai untuk mendukung analisis sumber daya air pada DAS pertanian (Demir & Muratoglu, 2025; Keller *et al.*, 2023; Subbarayan *et al.*, 2025). Pada sisi lain, model CROPWAT yang dikembangkan oleh *Food and Agriculture Organization* (FAO) banyak digunakan untuk memperkirakan kebutuhan air tanaman dan kebutuhan irigasi berdasarkan hubungan antara iklim, curah hujan efektif, dan karakteristik tanaman (Deb *et al.*, 2022; Mal & Sen, 2025). Oleh karena itu, integrasi SWAT dan CROPWAT memberikan peluang metodologis yang kuat untuk menghubungkan dinamika hidrologi DAS dengan kebutuhan irigasi spesifik tanaman secara lebih operasional (Akoko *et al.*, 2020; Yalcin, 2023).

Meskipun perkembangan pemodelan hidrologi dan irigasi telah cukup pesat, sebagian besar studi terdahulu di Asia Tenggara masih berfokus pada neraca air tahunan atau indikator agregat, sehingga kurang mampu menangkap ketidaksesuaian pasokan–kebutuhan yang krusial pada skala intra-musiman (Zulkafli *et al.*, 2021). Padahal, dalam sistem pertanian padi beririgasi di wilayah monsun, kegagalan layanan irigasi sering kali tidak disebabkan oleh kekurangan air tahunan, melainkan oleh

ketidaksinkronan temporal antara pasokan air sungai dan lonjakan kebutuhan air pada fase pertumbuhan tertentu (Ahmad *et al.*, 2023). Walaupun SWAT telah banyak digunakan untuk mengkuantifikasi komponen hasil air dan CROPWAT untuk memperkirakan kebutuhan air tanaman (Akoko *et al.*, 2020; Aloui *et al.*, 2023), penggabungan eksplisit kedua model tersebut untuk mengevaluasi keandalan irigasi melalui indikator kuantitatif, seperti *Irrigation Reliability Index* (IRI) dan *Irrigation Deficit Severity Index* (IDSI), masih sangat terbatas, terutama pada konteks Indonesia.

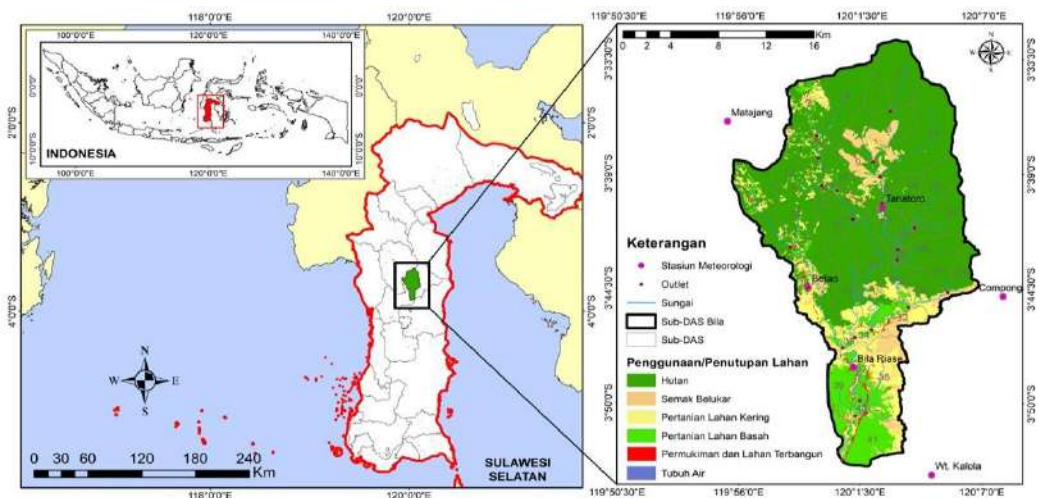
Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan simulasi hidrologi berbasis SWAT dengan analisis kebutuhan irigasi berbasis CROPWAT untuk mengevaluasi neraca air lahan sawah di Sub-DAS Bila. Integrasi ini dilakukan untuk mengkuantifikasi kesesuaian dan ketidaksesuaian intra-musiman antara ketersediaan air sungai dan kebutuhan air irigasi padi. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (i) mensimulasikan karakteristik hidrologi dan ketersediaan air sungai sebagai sisi pasokan, (ii) menghitung kebutuhan air irigasi padi sebagai sisi permintaan, (iii) mengidentifikasi periode surplus dan defisit air pada skala bulanan, dan (iv) mengevaluasi keandalan sistem irigasi menggunakan indikator IRI dan IDSI. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan diagnosis neraca air lahan sawah, tetapi juga membangun kerangka operasional untuk menilai reliabilitas layanan irigasi pada wilayah monsun tropis secara lebih tepat, membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air, dan pada akhirnya memperkuat ketahanan pangan regional.

2.3. Metode Penelitian

2.3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Sub-DAS Bila, yang merupakan bagian dari DAS Bila, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Secara geografis, wilayah penelitian terletak pada koordinat 3°33'20"–3°53'20" LS dan 119°55'00"–120°10'00" BT. Sub-DAS Bila mencakup wilayah dengan dominasi penggunaan/tutupan lahan berupa hutan, semak belukar, pertanian lahan kering, pertanian lahan basah (sawah), serta sebagian kecil kawasan permukiman dan badan air (Gambar 3). Secara klimatologis, wilayah ini dipengaruhi oleh pola iklim monsun, dengan musim hujan umumnya berlangsung pada periode Oktober–Maret dan musim kemarau pada periode April–September (Ariska *et al.*, 2024). Pemilihan Sub-DAS Bila sebagai lokasi penelitian didasarkan pada dua pertimbangan. Pertama, wilayah ini berperan penting sebagai kawasan penyangga hidrologi bagi sistem pertanian padi sawah pada DAS Bila. Kedua, wilayah ini menunjukkan kerentanan terhadap fluktuasi hidrologi musiman yang berimplikasi langsung pada ketersediaan air irigasi (Abdullah *et al.*, 2022; Staddal *et al.*, 2016; Staddal, 2016). Dengan karakteristik tersebut, Sub-DAS Bila dinilai representatif untuk menganalisis hubungan antara dinamika pasokan air sungai dan kebutuhan air irigasi padi dalam konteks wilayah monsun tropis.

Kegiatan penelitian dilaksanakan secara bertahap. Pengumpulan, verifikasi, dan kompilasi data sekunder dilakukan pada periode Februari hingga Maret 2024. Selanjutnya, pengolahan data, pemodelan, kalibrasi, validasi, dan analisis dilakukan pada periode Maret hingga April 2024. Seluruh proses pengolahan data dan pemodelan dilaksanakan di Laboratorium Agroeinformatika, Universitas Hasanuddin, Makassar.



Gambar 3. Lokasi Penelitian Sub-DAS Bila

2.3.2. Bahan dan Alat Penelitian

Penelitian ini menggunakan data spasial, klimatologis, hidrologis, dan agronomis untuk mendukung simulasi ketersediaan air menggunakan model SWAT serta estimasi kebutuhan air tanaman padi menggunakan model CROPWAT. Seluruh data dipilih berdasarkan ketersediaan, resolusi spasial dan temporal, serta kesesuaiannya untuk pemodelan hidrologi berbasis DAS dan analisis kebutuhan air tanaman. Bahan penelitian yang digunakan sebagai berikut:

1. **Data topografi**, berupa *Digital Elevation Model* (DEM) resolusi 30 m yang bersumber dari *Forest and Buildings Removed Copernicus DEM* (FABDEM versi 1.2) (Hawker et al., 2022). Data ini digunakan untuk proses delineasi DAS, penentuan jaringan sungai, serta klasifikasi kemiringan lereng dalam model SWAT.
2. **Data penggunaan/tutupan lahan** (*Land Use/Land Cover*, LULC) yang diturunkan dari citra Sentinel-2A resolusi spasial 10 m tahun 2024 (ESA, 2024). Peta LULC diperoleh melalui proses klasifikasi terawasi (*supervised classification*) menggunakan metode *Maximum Likelihood* (Congedo, 2021) dan digunakan sebagai input utama dalam pembentukan *Hydrological Response Unit* (HRU).
3. **Data tanah** skala 1:50.000 yang bersumber dari Balai Besar Pengujian Standar Instrumen Sumberdaya Lahan Pertanian (BSIP SDLP), Kementerian Pertanian. Data ini digunakan untuk mendeskripsikan parameter sifat fisik tanah yang diperlukan dalam pemodelan hidrologi dan perhitungan kebutuhan air tanaman.
4. **Data curah hujan harian** yang bersumber dari *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) untuk periode 2011–2023 (Funk et al., 2015). Data CHIRPS digunakan karena memiliki resolusi spasial tinggi dan kinerja yang baik dalam merepresentasikan pola curah hujan di wilayah tropis (Cavalcante et al., 2020). Data ini digunakan sebagai input curah hujan dalam simulasi hidrologi SWAT dan perhitungan neraca air lahan sawah.
5. **Data iklim harian**, yang meliputi suhu udara maksimum dan minimum, kelembapan relatif, kecepatan angin, dan radiasi matahari, yang diperoleh dari basis data NASA

Prediction of Worldwide Energy Resources (NASA-POWER) untuk periode 2011–2023 (NASA LaRC, 2024). Data ini digunakan sebagai input variabel klimatologis dalam model SWAT dan sebagai dasar perhitungan evapotranspirasi referensi pada model CROPWAT.

6. **Data debit aliran sungai harian** yang diperoleh dari Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPDAS) Jeneberang–Walanae dan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pompengan–Jeneberang. Data ini digunakan sebagai data observasi untuk keperluan kalibrasi dan validasi model SWAT.
7. **Data agronomis tanaman padi**, yang meliputi kalender tanam, fase pertumbuhan, dan koefisien tanaman (*crop coefficient*, Kc) untuk varietas Inpari 32. Parameter ini ditetapkan berdasarkan pedoman FAO-56, hasil studi agronomi lokal, serta data dari instansi pengelola sumber daya air, dan digunakan dalam analisis kebutuhan air tanaman menggunakan model CROPWAT.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa seperangkat komputer dengan spesifikasi yang memadai untuk pengolahan data spasial, pemodelan hidrologi, dan analisis numerik. Pengolahan dan analisis data spasial dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS v10.3 yang terintegrasi dengan ArcSWAT v2012 untuk simulasi hidrologi berbasis DAS. Proses kalibrasi dan validasi model hidrologi dilakukan menggunakan perangkat lunak SWAT-CUP v5.3, sedangkan analisis kebutuhan air tanaman dilakukan menggunakan perangkat lunak CROPWAT v8.0. Pengolahan data numerik, rekapitulasi hasil, serta penyusunan tabel dan grafik pendukung dilakukan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Office*.

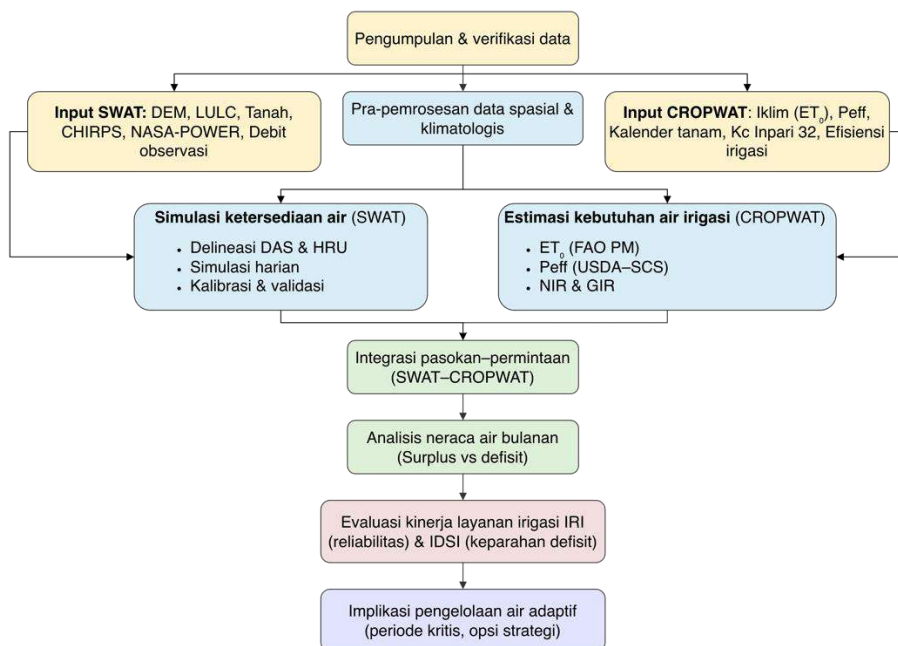
2.3.3. Desain Penelitian dan Kerangka Analisis

Penelitian ini dirancang sebagai studi pemodelan kuantitatif berbasis DAS untuk menganalisis neraca air lahan sawah pada skala Sub-DAS sebagai sistem pendukung irigasi padi. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan simulasi ketersediaan air berbasis hidrologi dengan estimasi kebutuhan air tanaman padi, sehingga memungkinkan evaluasi kesesuaian antara pasokan dan kebutuhan air irigasi secara temporal, khususnya pada skala intra-musiman yang relevan dengan pengelolaan irigasi padi (Yalcin, 2023).

Kerangka analisis penelitian disusun untuk merepresentasikan hubungan konseptual antara variabilitas iklim, respons hidrologi DAS, dan sistem irigasi lahan sawah (Gambar 4). Variabilitas iklim diposisikan sebagai faktor eksternal yang memengaruhi dinamika hidrologi Sub-DAS, yang selanjutnya menentukan ketersediaan air permukaan dan air bawah permukaan. Ketersediaan air tersebut kemudian dibandingkan dengan kebutuhan air tanaman padi berdasarkan pola tanam dan fase pertumbuhan melalui pendekatan neraca air lahan sawah.

Pada sisi pasokan, model SWAT digunakan untuk mensimulasikan komponen hidrologi utama dan menghasilkan hasil air (*WYLD*) bulanan pada *outlet* Sub-DAS sebagai proksi ketersediaan air sungai yang relevan bagi sistem irigasi pada tingkat analisis. Pada sisi permintaan, model CROPWAT digunakan untuk menghitung kebutuhan air tanaman berupa *Net Irrigation Requirement (NIR)* dan kebutuhan irigasi kotor berupa *Gross Irrigation Requirement (GIR)* berdasarkan data iklim, karakteristik tanaman, curah hujan efektif, dan efisiensi sistem irigasi. Kedua keluaran model tersebut

kemudian diintegrasikan dalam analisis neraca air untuk menilai kondisi surplus dan defisit air secara bulanan (Li & Quiring, 2021).



Gambar 4. Tahapan penelitian analisis neraca air lahan sawah berbasis integrasi SWAT-CROPWAT.

Hasil analisis neraca air selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi kinerja pemenuhan air irigasi, yang direpresentasikan oleh dua indikator utama, yaitu *Irrigation Reliability Index (IRI)* dan *Irrigation Deficit Severity Index (IDSI)*. *IRI* digunakan untuk menunjukkan proporsi bulan ketika kebutuhan irigasi dapat dipenuhi, sedangkan *IDSI* digunakan untuk mengukur besarnya akumulasi defisit ketika kegagalan pemenuhan air terjadi (Bhere & Reddy, 2022; Mo *et al.*, 2025; Zeng *et al.*, 2024). Dengan demikian, kerangka analisis ini tidak hanya mengevaluasi kecukupan air secara agregat, tetapi juga menangkap reliabilitas layanan irigasi pada periode-periode kritis. Kerangka tersebut menjadi dasar konseptual bagi analisis lanjutan pada bab berikutnya, termasuk proyeksi kuantitas air dan perumusan model pengelolaan sumber daya air lahan sawah yang mendukung keberlanjutan ketahanan pangan nasional.

2.3.4. Analisis Data

2.3.4.1. Analisis Ketersediaan Air dengan Model SWAT

Ketersediaan air pada Sub-DAS Bila dianalisis menggunakan *SWAT Rev.2012*, yaitu model hidrologi berbasis proses dan skala DAS yang banyak digunakan untuk menilai sumber daya air serta respons hidrologi terhadap variabilitas iklim dan penggunaan/tutupan lahan (Akoko *et al.*, 2020; Arnold *et al.*, 2012). Model SWAT dipilih karena kemampuannya merepresentasikan proses hidrologi secara spasial-terdistribusi

dan mengintegrasikan topografi, tanah, penggunaan/tutupan lahan, serta iklim ke dalam satu kerangka pemodelan yang konsisten (Bennour *et al.*, 2022; Veetil *et al.*, 2022). Secara konseptual, SWAT mensimulasikan dinamika hidrologi berdasarkan prinsip neraca air harian pada skala *Hydrological Response Unit* (HRU), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET - W_{seep} - Q_{gw})$$

di mana SW_t adalah simpanan air tanah pada waktu t (mm), SW_0 adalah simpanan awal air tanah (mm), R_{day} adalah curah hujan harian (mm), Q_{surf} adalah limpasan permukaan (mm), ET adalah evapotranspirasi aktual (mm), W_{seep} adalah perkolasi ke zona tidak jenuh (mm), dan Q_{gw} adalah aliran dasar (*baseflow*) dari akuifer dangkal (mm) (Wang *et al.*, 2025).

Pemodelan hidrologi dengan SWAT dilakukan melalui lima tahapan utama, yaitu delineasi DAS, pembentukan HRU, penyiapan data input, simulasi model, serta kalibrasi dan validasi (Arnold *et al.*, 2012). Delineasi DAS dilakukan menggunakan data DEM untuk mendefinisikan batas Sub-DAS Bila, jaringan sungai, dan titik *outlet* utama. Tahapan ini menghasilkan pembagian wilayah studi ke dalam sejumlah sub-DAS yang merepresentasikan karakteristik topografi dan jaringan aliran secara alami.

Pembentukan HRU dilakukan melalui proses *overlay* peta penggunaan/tutupan lahan, jenis tanah, dan kelas kemiringan lereng. Untuk mempertahankan heterogenitas spasial lanskap pertanian skala kecil yang mendominasi Sub-DAS Bila, digunakan ambang batas nol (0%) untuk penggunaan/tutupan lahan, tanah, dan lereng. Pendekatan ini dipilih agar seluruh kombinasi biofisik yang relevan tetap terwakili dalam pemodelan dan untuk meminimalkan penyederhanaan berlebihan terhadap unit analisis (Chen *et al.*, 2025). Hasil proses ini berupa sejumlah HRU yang merepresentasikan kombinasi kondisi biofisik wilayah. Selanjutnya, data iklim harian digunakan sebagai input utama simulasi SWAT dan diintegrasikan melalui *weather generator* (*.wgn*) untuk mendukung perhitungan neraca air pada setiap HRU.

Simulasi SWAT dijalankan pada skala waktu harian untuk periode 2011–2023, dengan tahun awal simulasi diperlakukan sebagai fase inisialisasi (*warm-up*) untuk menstabilkan kondisi awal model. *Output* model dihasilkan pada beberapa tingkat agregasi, yaitu HRU, sub-DAS, dan jaringan sungai utama. Analisis ketersediaan air difokuskan pada komponen hasil air (*WYLD*), yaitu kombinasi limpasan permukaan (Q_{surf}), aliran lateral (Q_{lat}), dan aliran air tanah dangkal (Q_{gw}) setelah dikurangi kehilangan transmisi di saluran (T_{loss}). Komponen ini merepresentasikan kontribusi efektif air terhadap aliran sungai dan dirumuskan sebagai berikut:

$$W_{yld} = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} - T_{loss}$$

di mana Q_{surf} adalah limpasan permukaan (mm), Q_{lat} adalah aliran lateral (mm), Q_{gw} adalah aliran air tanah dangkal (mm), dan T_{loss} adalah kehilangan transmisi di saluran sungai (mm) (Tumsa *et al.*, 2022). Nilai hasil air (*WYLD*) yang telah di-*routing* ke *outlet*

Sub-DAS kemudian digunakan sebagai proksi ketersediaan air sungai pada skala analisis bulanan. Dalam penelitian ini, WYLD diposisikan sebagai representasi sisi pasokan hidrologi pada tingkat DAS, bukan sebagai keseluruhan volume air yang langsung tersedia secara operasional di lapangan, karena ketersediaan aktual tetap dipengaruhi oleh pengaturan sistem, kebutuhan lain, dan kendala distribusi (Yalcin, 2023).

Untuk memastikan keandalan dan konsistensi hasil simulasi, model SWAT dikalibrasi dan divalidasi menggunakan perangkat SWAT-CUP dengan algoritma SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting-2*). Algoritma ini dipilih karena mampu mengakomodasi ketidakpastian parameter dan memberikan estimasi rentang hasil simulasi yang stabil serta transparan dalam pemodelan hidrologi berbasis DAS (Carlos Mendoza *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2023). Kalibrasi dilakukan untuk periode 2012–2018, sedangkan validasi dilakukan untuk periode 2019–2023. Evaluasi kinerja model dilakukan terhadap debit aliran sungai bulanan hasil agregasi dari simulasi harian. Penggunaan skala bulanan dipilih untuk menyesuaikan tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi kecukupan pasokan air terhadap kebutuhan irigasi musiman, sekaligus untuk mengurangi pengaruh fluktuasi ekstrem curah hujan harian yang lazim terjadi pada DAS beriklim monsun (Demir & Muratoglu, 2025; Moura *et al.*, 2025). Parameter yang dikalibrasi mencakup parameter hidrologi kunci yang mengendalikan limpasan permukaan, aliran dasar (*baseflow*), dinamika air tanah, dan evapotranspirasi. Pemilihan parameter serta rentang nilainya mengacu pada literatur hidrologi tropis dan pedoman teknis SWAT, dengan mempertimbangkan karakteristik biofisik Sub-DAS Bila. Daftar parameter utama yang digunakan dalam proses kalibrasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter model SWAT yang digunakan dalam proses kalibrasi

Parameter (kode)	Deskripsi	Transformasi	Satuan	Nilai terkalibrasi	Rentang (min–maks)
CN2.mgt	Angka kurva SCS untuk kondisi kelembapan tanah II	r__ (<i>relative</i>)	–	–0,24	–0,30 – 0,30
ALPHA_BF.gw	Konstanta resesi aliran dasar	v__ (<i>replace</i>)	hari ^{–1}	0,53	0,00 – 1,00
GW_DELAY.gw	Waktu tunda aliran air tanah	v__ (<i>replace</i>)	hari	38,33	0 – 500
GWQMN.gw	Ambang kedalaman air pada akuifer dangkal untuk terjadinya aliran balik	v__ (<i>replace</i>)	mm	0,50	0 – 500
SOL_AWC().sol	Kapasitas simpan air tersedia pada lapisan tanah	r__ (<i>relative</i>)	mm mm ^{–1}	0,70	–1 – 2
CH_N2.rte	Koefisien kekasaran Manning pada saluran utama	v__ (<i>replace</i>)	–	0,77	0,01 – 1,00
CH_K2.rte	Konduktivitas hidraulik efektif pada saluran utama	v__ (<i>replace</i>)	mm jam ^{–1}	450,00	0 – 1.000
ESCO.hru	Faktor kompensasi evaporasi tanah	v__ (<i>replace</i>)	–	0,51	0,01 – 1,00

EPCO.hru	Faktor kompensasi serapan air oleh tanaman	v__ (replace)	–	0,70	0,01 – 1,00
RCHRG_DP.gw	Fraksi perkolasi menuju akuifer dalam	v__ (replace)	–	0,10	0,00 – 1,00
OV_N.hru	Koefisien kekasaran Manning untuk aliran permukaan	v__ (replace)	–	1,01	0,01 – 30,00
SURLAG.bsn	Koefisien waktu tunda limpasan permukaan	v__ (replace)	hari	15,22	0,05 – 24,00
REVAPMN.gw	Ambang kedalaman air pada akuifer dangkal untuk proses revap	r__ (relative)	mm	575,00	0 – 750

Sumber: dimodifikasi oleh penulis berdasarkan Abbas *et al.* (2024); Kishore *et al.* (2025); Moriasi *et al.* (2015); Moura *et al.* (2025); Wang *et al.* (2025).

Kinerja model dievaluasi menggunakan tiga indikator statistik, yaitu *Nash–Sutcliffe efficiency (NSE)*, koefisien determinasi (R^2), dan *percent bias (P_{bias})*, yang secara luas direkomendasikan untuk evaluasi simulasi debit aliran sungai (Moriasi *et al.*, 2015). Secara matematis, ketiga indikator tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}$$

$$P_{bias} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \right) \times 100\%$$

di mana $Q_{obs,i}$ adalah debit observasi, $Q_{sim,i}$ adalah debit hasil simulasi, $\bar{Q}_{obs}$ dan $\bar{Q}_{sim}$ masing-masing adalah debit rata-rata observasi dan simulasi, serta n adalah jumlah data pengamatan. Interpretasi kinerja model didasarkan pada kriteria evaluasi yang direkomendasikan oleh Demir & Muratoglu (2025) serta Moriasi *et al.* (2015), yang mengklasifikasikan performa model ke dalam beberapa kategori berdasarkan nilai NSE , R^2 , dan P_{bias} . Ringkasan kriteria evaluasi tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria evaluasi kinerja model SWAT untuk debit aliran sungai

Kategori Kinerja	NSE	R^2	P_{bias} (%)
Sangat Baik	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$0,75 < R^2 \leq 1,00$	$P_{bias} < \pm 10$
Baik	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,65 < R^2 \leq 0,75$	$\pm 10 < P_{bias} \leq \pm 15$
Memuaskan	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$0,50 < R^2 \leq 0,65$	$\pm 15 < P_{bias} \leq \pm 25$
Tidak Memuaskan	$NSE \leq 0,50$	$R^2 \leq 0,50$	$P_{bias} > \pm 25$

Sumber: diadaptasi dari Demir & Muratoglu (2025); Moriasi *et al.* (2015).

2.3.4.2. Analisis Kebutuhan Air Tanaman dengan Model CROPWAT

Kebutuhan air irigasi tanaman padi pada wilayah Sub-DAS Bila dianalisis menggunakan model CROPWAT v8.0 yang dikembangkan oleh FAO. Model ini menghitung kebutuhan air tanaman berdasarkan hubungan antara kondisi iklim, karakteristik tanaman, curah hujan efektif, dan efisiensi sistem irigasi, sehingga banyak digunakan dalam perencanaan dan evaluasi irigasi berbasis ilmiah (Gabr & Fattouh, 2021; Zhu *et al.*, 2025). Dalam penelitian ini, CROPWAT digunakan untuk menghasilkan estimasi kebutuhan air tanaman dan kebutuhan irigasi pada tingkat layanan, bukan untuk mensimulasikan seluruh kompleksitas proses hidrologi di tingkat petak sawah secara rinci.

Evapotranspirasi referensi (ET_o) dihitung menggunakan metode FAO *Penman–Monteith* sebagai berikut:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

di mana ET_o adalah evapotranspirasi referensi (mm hari^{-1}); R_n adalah radiasi bersih pada permukaan tanaman ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$); G adalah fluks panas tanah ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$); T adalah suhu udara harian rata-rata pada ketinggian 2 m ($^{\circ}\text{C}$); u_2 adalah kecepatan angin pada ketinggian 2 m (m s^{-1}); e_s adalah tekanan uap jenuh (kPa); e_a adalah tekanan uap aktual (kPa); Δ adalah kemiringan kurva tekanan uap ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); dan γ adalah konstanta psikrometrik ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Evapotranspirasi tanaman (ET_c) dihitung dengan mengalikan ET_o dengan koefisien tanaman (K_c) yang spesifik untuk setiap fase pertumbuhan padi, mengacu pada pedoman FAO-56 dan penyesuaian kondisi lokal:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Curah hujan efektif (P_{eff}) dihitung menggunakan metode *USDA Soil Conservation Service* (USDA–SCS), dengan persamaan:

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{tot}} \times \frac{125 - 0.2P_{\text{tot}}}{125}, \quad \text{untuk } P_{\text{tot}} < 250\text{mm},$$
$$P_{\text{eff}} = 125 + 0.1 \times P_{\text{tot}}, \quad \text{untuk } P_{\text{tot}} > 250\text{mm}$$

Kebutuhan irigasi bersih (*Net Irrigation Requirement, NIR*) ditentukan sebagai selisih antara evapotranspirasi tanaman dan curah hujan efektif (Agrawal *et al.*, 2023; Palanisami & Nagothu, 2024):

$$NIR = \max(0, ET_c - P_{\text{eff}})$$

Kebutuhan irigasi kotor (*Gross Irrigation Requirement, GIR*) dihitung dengan mempertimbangkan efisiensi total sistem irigasi (η_{total}) (Agrawal *et al.*, 2023; Palanisami & Nagothu, 2024) sebagai berikut:

$$GIR = \frac{NIR}{\eta_{total}}$$

Dalam penelitian ini, η_{total} ditetapkan sebesar 0,60 sebagai nilai representatif untuk sistem irigasi permukaan atau gravitasi pada skema saluran terbuka. Nilai ini dipilih karena berada dalam kisaran efisiensi skema 50–60% yang umum digunakan untuk merepresentasikan kehilangan penyaluran dan aplikasi air pada sistem irigasi permukaan, serta masih relevan untuk konteks pengelolaan irigasi di Indonesia (FAO, 1989; Mahmud *et al.*, 2025; Palanisami & Nagothu, 2024). Nilai GIR bulanan selanjutnya digunakan sebagai representasi kebutuhan air irigasi lahan sawah dan menjadi komponen permintaan air dalam analisis neraca air serta evaluasi keandalan irigasi pada tahap berikutnya.

2.3.4.3. Analisis Neraca Air dan Keandalan Irigasi

Analisis neraca air dilakukan untuk mengevaluasi keseimbangan antara ketersediaan air yang disimulasikan menggunakan model SWAT dan kebutuhan air irigasi lahan sawah yang dihitung dengan model CROPWAT. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi kondisi surplus dan defisit air secara temporal, khususnya pada skala bulanan yang relevan dengan pengelolaan irigasi tanaman padi.

Ketersediaan air dinyatakan sebagai hasil air bulanan pada outlet Sub-DAS Bila ($WYLD_m$), sedangkan kebutuhan air dinyatakan sebagai kebutuhan irigasi kotor bulanan (GIR_m) hasil perhitungan CROPWAT (Cho *et al.*, 2021; Tran *et al.*, 2025). Neraca air lahan sawah dihitung sebagai selisih antara ketersediaan dan kebutuhan air pada bulan ke- m , yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Balance_m = WYLD_m - GIR_m$$

di mana $Balance_m$ adalah neraca air pada bulan ke- m (mm/bulan), $WYLD_m$ adalah hasil air bulanan hasil simulasi SWAT (mm/bulan), dan GIR_m adalah kebutuhan irigasi kotor bulanan (mm/bulan). Nilai neraca air positif menunjukkan kondisi surplus, sedangkan nilai negatif menunjukkan terjadinya defisit air irigasi.

Untuk mengevaluasi keandalan sistem irigasi, analisis neraca air dilengkapi dengan dua indikator kuantitatif, yaitu *Irrigation Reliability Index (IRI)* dan *Irrigation Deficit Severity Index (IDS)*. Kedua indikator ini digunakan untuk menangkap dimensi frekuensi dan tingkat keparahan kekurangan air irigasi (Wu *et al.*, 2022). *IRI* menggambarkan proporsi waktu (bulan) ketika ketersediaan air mampu memenuhi atau melampaui kebutuhan irigasi, yang dirumuskan sebagai:

$$IRI = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N I(WYLD_m \geq GIR_m)$$

di mana N adalah jumlah bulan analisis dan I adalah fungsi indikator yang bernilai 1 jika kebutuhan irigasi terpenuhi dan 0 jika tidak. Nilai *IRI* yang mendekati 1 menunjukkan sistem irigasi yang semakin andal, sedangkan nilai mendekati 0 menunjukkan kegagalan

pemenuhan kebutuhan air yang tinggi. Sementara itu, *IDS* digunakan untuk mengukur akumulasi besarnya defisit irigasi selama periode analisis (mm), yang dirumuskan sebagai:

$$IDS = \sum_{m=1}^N \max(0, GIR_m - WYLD_m)$$

Nilai *IDS* yang semakin besar menunjukkan tingkat keparahan defisit air yang semakin tinggi. Nilai *IRI* dan *IDS* digunakan secara bersama-sama karena keduanya menangkap dimensi kinerja yang berbeda tetapi saling melengkapi. *IRI* menunjukkan seberapa sering sistem mampu memenuhi kebutuhan air, sedangkan *IDS* menunjukkan seberapa besar akumulasi kekurangan air yang terjadi ketika sistem gagal memenuhi kebutuhan tersebut. Dalam penelitian ini, *IDS* juga dibaca sebagai proporsi terhadap total kebutuhan irigasi tahunan agar tingkat keparahan defisit lebih mudah diinterpretasikan dalam konteks operasional sistem. Ringkasan indikator evaluasi keandalan irigasi yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4

Tabel 4. Indikator evaluasi keandalan irigasi yang digunakan dalam penelitian

Indikator	Satuan	Arah interpretasi	Definisi operasional
IRI	0–1	Semakin mendekati 1, sistem semakin andal	Menunjukkan proporsi bulan ketika pasokan air mampu memenuhi atau melampaui kebutuhan irigasi
IDS	mm	Semakin besar nilainya, semakin besar akumulasi defisit	Menunjukkan total kekurangan air irigasi selama bulan-bulan ketika pasokan tidak mampu memenuhi kebutuhan
IDS relatif	% dari kebutuhan irigasi tahunan	Semakin besar nilainya, semakin tinggi tingkat keparahan defisit dalam konteks sistem	Menunjukkan proporsi defisit kumulatif terhadap total kebutuhan irigasi tahunan

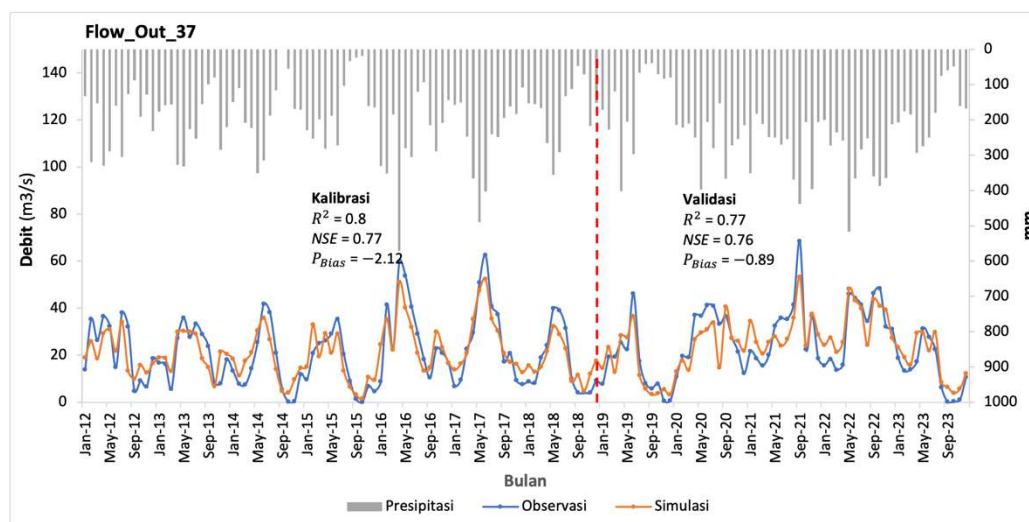
Sumber: dimodifikasi oleh penulis berdasarkan Wu *et al.* (2022), Bhere & Reddy (2022), Zeng *et al.* (2024), dan Cho *et al.* (2021).

Dalam penelitian ini, penyajian *IDS* relatif digunakan sebagai pelengkap interpretasi *IDS* absolut agar hasil evaluasi lebih mudah dipahami dalam konteks operasional sistem irigasi. Secara bersama-sama, indikator neraca air, *IRI*, dan *IDS* memberikan dasar kuantitatif untuk menilai kemampuan sistem sumber daya air Sub-DAS Bila dalam mendukung irigasi lahan sawah. Hasil analisis ini menjadi landasan untuk evaluasi kondisi saat ini, proyeksi perubahan di bawah skenario perubahan iklim dan penggunaan lahan, serta perumusan strategi pengelolaan sumber daya air pada bab-bab selanjutnya.

2.4. Hasil dan Pembahasan

2.4.1. Karakteristik Hidrologi dan Ketersediaan Air Sungai sebagai Sisi Pasokan (Supply-Side) Berdasarkan Simulasi SWAT

Hasil simulasi hidrologi menggunakan model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) membuktikan bahwa dinamika aliran sungai di Sub-DAS Bila mampu direplikasi dengan tingkat akurasi yang sangat baik (Gambar 5). Evaluasi kinerja model pada periode kalibrasi (2012–2018) dan validasi (2019–2023) menghasilkan nilai *NSE* masing-masing sebesar 0,77 dan 0,76. Nilai tersebut melampaui ambang batas kategori “sangat baik” yang umum direkomendasikan dalam evaluasi model hidrologi DAS. Selain itu, nilai R^2 yang tinggi, yaitu 0,80 pada periode kalibrasi dan 0,77 pada periode validasi, menunjukkan bahwa variasi debit hasil simulasi mampu mengikuti pola debit observasi dengan baik (Moriassi *et al.*, 2007; Moriassi *et al.*, 2015). Nilai *percent bias* (P_{bias}) yang rendah, masing-masing sebesar -2,12% dan -0,89%, juga menunjukkan bahwa penyimpangan sistematis model berada dalam batas toleransi yang sangat baik untuk analisis kuantitatif sumber daya air (Abuhay *et al.*, 2023; Demir & Muratoglu, 2025; Moriassi *et al.*, 2015). Hasil ini menegaskan bahwa simulasi SWAT cukup andal untuk digunakan sebagai dasar analisis ketersediaan air pada Sub-DAS Bila.



Gambar 5. Perbandingan hidrograf debit simulasi dan observasi

Perbandingan hidrograf debit hasil simulasi dan observasi (Gambar 5) mengindikasikan bahwa model mampu menangkap pola musiman aliran sungai yang dikendalikan oleh rezim iklim monsun, ditandai dengan respons debit puncak pada musim penghujan dan resesi debit yang signifikan pada musim kemarau. Kinerja ini memvalidasi bahwa model tidak sekadar memadai dalam mengestimasi magnitudo aliran, melainkan juga reliabel dalam merepresentasikan variabilitas hidrologi musiman yang krusial bagi manajemen irigasi (Abuhay *et al.*, 2023; Demir & Muratoglu, 2025; Moriassi *et al.*, 2015). Lebih lanjut, dalam konteks pertanian padi beririgasi di wilayah monsun, akurasi model dalam mensimulasikan aliran dasar (*baseflow*) memegang

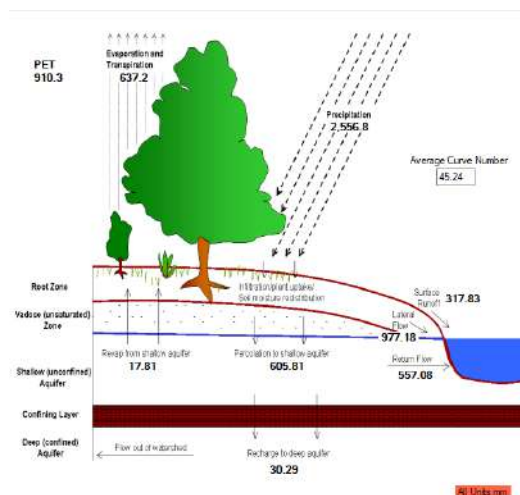
peranan yang sangat krusial. Hal ini disebabkan oleh kontinuitas pasokan air irigasi selama periode kemarau yang sangat bergantung pada retensi dan pelepasan lambat air dari zona lengas tanah serta akuifer dangkal (Deb & Kiem, 2020). Meskipun demikian, adanya deviasi pada puncak-puncak kejadian hujan ekstrem merupakan keterbatasan yang lazim ditemui pada karakteristik DAS tropis. Dinamika yang dikendalikan oleh intensitas curah hujan tinggi dan waktu konsentrasi yang sangat singkat ini merupakan fenomena tipikal, sebagaimana telah dikonfirmasi oleh berbagai studi pemodelan di kawasan monsun Asia Tenggara (Saade *et al.*, 2021). Secara keseluruhan, kesesuaian antara debit simulasi dan observasi menunjukkan bahwa model telah menangkap perilaku hidrologi utama Sub-DAS Bila secara memadai.

Secara kuantitatif, hasil simulasi menunjukkan bahwa curah hujan rata-rata tahunan di Sub-DAS Bila mencapai 2.556,80 mm. Dari jumlah tersebut, sekitar 1.882,03 mm per tahun, atau 73,60%, berkontribusi terhadap hasil air total (*water yield*), sedangkan 637,20 mm per tahun, atau 24,90%, hilang melalui evapotranspirasi aktual. Rasio evapotranspirasi aktual terhadap evapotranspirasi potensial (*ET/PET*) sebesar 0,70 menunjukkan bahwa meskipun curah hujan tahunan relatif tinggi, kebutuhan evaporatif atmosfer tidak seluruhnya terpenuhi. Nilai rasio ini mencerminkan bahwa pada skala tahunan Sub-DAS Bila berada dalam kondisi surplus air, yang umum dijumpai pada DAS tropis dan menunjukkan potensi ketersediaan air sungai yang relatif stabil sepanjang tahun (Akoko *et al.*, 2021). Dengan demikian, dari sudut pandang agregat tahunan, Sub-DAS Bila tidak menunjukkan indikasi keterbatasan sumber daya air yang serius.

Analisis komponen hasil air memperlihatkan bahwa rezim hidrologi Sub-DAS Bila didominasi oleh aliran bawah permukaan. Aliran lateral (Q_{lat}) memberikan kontribusi terbesar, yaitu sebesar 977,18 mm per tahun atau 51,90% dari total hasil air (*WYLD*), diikuti oleh aliran air tanah dangkal (*groundwater flow*, Q_{gw}) sebesar 557,08 mm per tahun atau 29,60%. Sebaliknya, kontribusi aliran air tanah dalam (*deep groundwater flow*, $Q_{gw-deep}$) relatif kecil, yaitu 29,96 mm per tahun atau sekitar 1,60%, sedangkan limpasan permukaan (Q_{surf}) hanya menyumbang sekitar 16,90%. Komposisi ini menunjukkan bahwa lebih dari 80% pembentukan debit sungai di Sub-DAS Bila berasal dari komponen bawah permukaan. Temuan ini menegaskan bahwa proses infiltrasi, perkolasi, dan penyimpanan air dalam akuifer dangkal memainkan peran dominan dalam mengendalikan respons hidrologi DAS. Karakteristik seperti ini lazim dijumpai pada DAS tropis dengan kombinasi tutupan lahan pertanian dan tanah berpermeabilitas sedang hingga tinggi (Nasiri *et al.*, 2020; Paiva *et al.*, 2023; Valencia *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2022).

Konsistensi hasil simulasi juga terlihat dari kedekatan nilai perkolasi tanah dan pengisian air tanah. Perkolasi tanah tercatat sebesar 607,29 mm per tahun, sedangkan pengisian air tanah sebesar 605,81 mm per tahun. Kedekatan kedua nilai ini menunjukkan bahwa transfer air dari zona tanah ke akuifer direpresentasikan secara stabil oleh model. Selain itu, kontribusi akuifer dangkal terhadap aliran sungai jauh lebih besar dibandingkan kontribusi akuifer dalam, yang menegaskan bahwa aliran dasar sungai di Sub-DAS Bila terutama ditopang oleh sistem akuifer dangkal. Temuan ini penting karena menjelaskan mengapa aliran sungai tetap bertahan pada periode kering, sekaligus mengindikasikan bahwa kestabilan pasokan air tahunan sangat bergantung

pada kondisi infiltrasi dan penyimpanan air bawah permukaan. Karakteristik hidrologis ini konsisten dengan studi pada DAS monsun tropis yang menunjukkan bahwa baseflow merupakan komponen utama yang mempertahankan aliran sungai pada periode pra-monsun dan kemarau (Akoko *et al.*, 2021; Bhagat *et al.*, 2021). Akurasi neraca massa air dalam simulasi juga ditunjukkan oleh residu tahunan yang sangat kecil, yaitu sekitar 1,47% dari total curah hujan, yang mengindikasikan integritas struktural dan reliabilitas model.

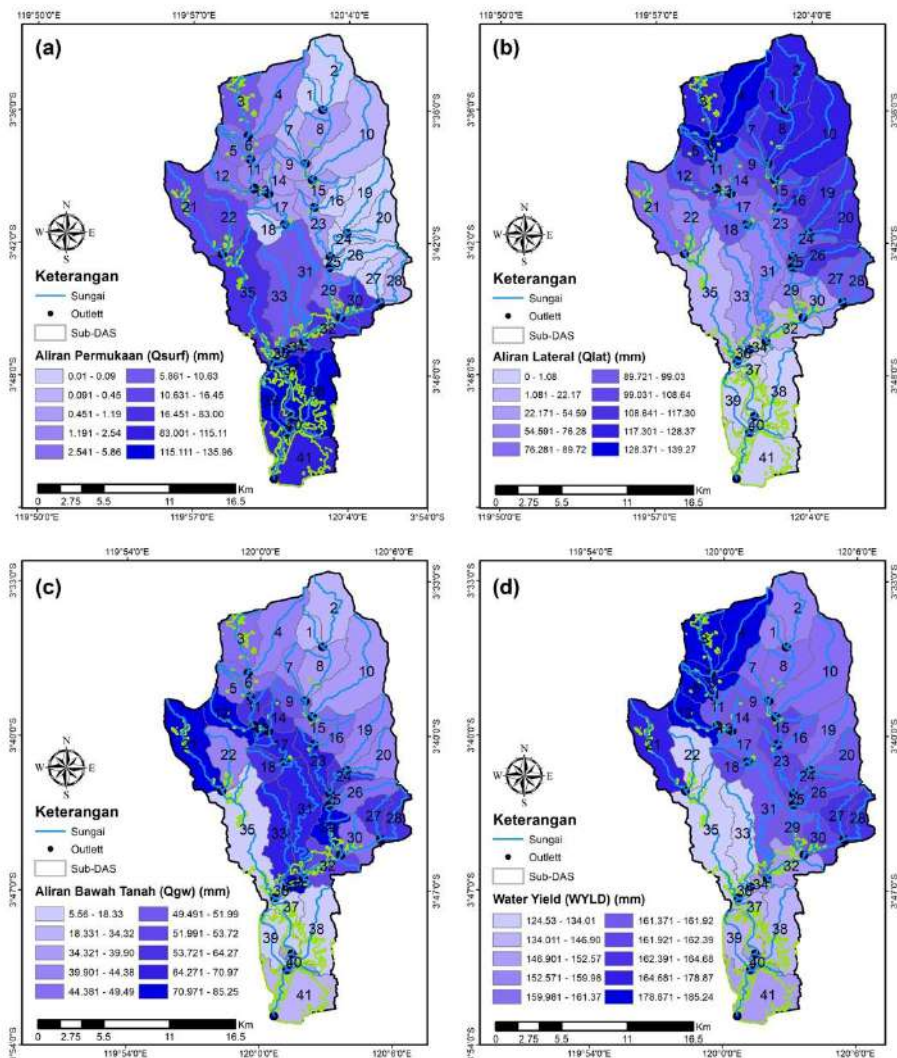


Gambar 6. Ringkasan komponen neraca air tahunan hasil simulasi SWAT di Sub-DAS Bila

Distribusi spasial komponen hidrologi hasil simulasi SWAT menunjukkan adanya diferensiasi fungsi hidrologi yang kontras antara wilayah hulu, tengah, dan hilir Sub-DAS Bila (Gambar 7a–d). Limpasan permukaan tertinggi terkonsentrasi di wilayah hilir dengan kisaran 16–136 mm per tahun, yang mencerminkan dominasi pertanian intensif dan permukiman serta meningkatnya respons aliran cepat terhadap curah hujan. Sebaliknya, aliran lateral mencapai nilai tertinggi di wilayah hulu, yaitu sekitar 99–139 mm per tahun, yang menandakan peran lereng curam, tanah berpermeabilitas relatif tinggi, dan tutupan vegetasi dalam mendukung infiltrasi dan pergerakan air bawah permukaan (McGuire *et al.*, 2024).

Wilayah tengah Sub-DAS berfungsi sebagai zona pengisian akuifer utama, dengan kontribusi aliran air tanah dangkal sebesar 52–85 mm per tahun, yang menopang aliran dasar sungai selama periode kering. Kombinasi proses tersebut tercermin pada distribusi hasil air (*water yield*), yang menunjukkan nilai tertinggi di wilayah hulu dan tengah, yaitu sekitar 162–185 mm per tahun. Pola ini menunjukkan bahwa ketersediaan air sungai di Sub-DAS Bila secara struktural lebih dikendalikan oleh aliran bawah permukaan dan pelepasan air dari akuifer dangkal dibandingkan oleh limpasan permukaan. Kondisi ini penting karena menjelaskan bahwa sistem hidrologi Sub-DAS Bila cenderung memiliki pasokan dasar yang relatif stabil, tetapi pada saat yang sama tidak selalu responsif terhadap lonjakan kebutuhan air dalam waktu singkat. Karakteristik ini umum dijumpai pada DAS tropis beriklim monsun, di mana pasokan air sungai pada

musim peralihan banyak bergantung pada simpanan bawah permukaan (Bhagat *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2026; Saade *et al.*, 2021)..



Gambar 7. Distribusi spasial komponen hidrologi hasil simulasi SWAT: a) limpasan permukaan (*surface runoff*), b) aliran lateral (*lateral flow*), c) aliran air tanah dangkal (*groundwater flow, Q_{gw}*), dan d) hasil air total (*water yield*).

Secara keseluruhan, hasil simulasi SWAT menegaskan bahwa Sub-DAS Bila memiliki potensi ketersediaan air sungai yang relatif tinggi pada skala tahunan. Pasokan air tersebut secara dominan dikendalikan oleh kontribusi aliran bawah permukaan (*subsurface flow*) dan akuifer dangkal. Karakteristik hidrologi ini memberikan indikasi awal bahwa tantangan utama pengelolaan air di wilayah ini bukan terletak pada volume total air tahunan, melainkan pada fluktuasi dan pola distribusi debit antar-bulannya. Implikasinya, penilaian keandalan layanan irigasi tidak dapat didasarkan murni pada

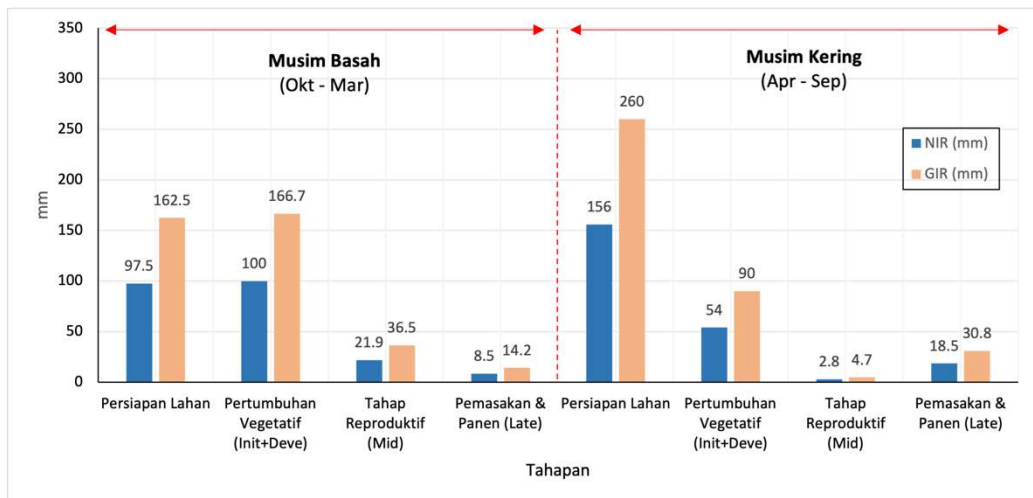
analisis parsial dari sisi pasokan (*supply-side*) hidrologi DAS, melainkan harus dikonvergensi dengan dinamika temporal kebutuhan air tanaman (*demand-side*). Temuan ini menyediakan landasan ketersediaan air yang solid untuk tahapan analisis kebutuhan air tanaman serta evaluasi neraca pasokan-permintaan irigasi pada analisis berikutnya.

2.4.2. Kebutuhan Air Irigasi Padi sebagai Sisi Permintaan Air (*Demand-Side*) Berdasarkan Simulasi CROPWAT

Hasil estimasi kebutuhan air irigasi menunjukkan bahwa permintaan air untuk budidaya padi di Sub-DAS Bila bersifat musiman dan terkonsentrasi pada fase pertumbuhan tertentu, mengikuti pola iklim monsun dan kalender tanam petani lokal setempat. Pola ini menunjukkan bahwa tekanan terhadap sistem irigasi tidak terdistribusi merata sepanjang musim tanam, melainkan memuncak pada periode-periode kritis dalam satu siklus pertumbuhan padi. Temuan menegaskan bahwa evaluasi kebutuhan air tidak cukup dilakukan pada skala musiman atau tahunan secara agregat, tetapi harus memperhatikan distribusi kebutuhan antar fase pertumbuhan, khususnya pada sistem sawah beririgasi di wilayah monsun tropis (Zhu *et al.*, 2025).

Secara kuantitatif, hasil simulasi CROPWAT menunjukkan bahwa kebutuhan air irigasi padi di Sub-DAS Bila tergolong relatif tinggi dan bersifat konsisten lintas musim tanam. Kebutuhan irigasi bruto (*Gross Irrigation Requirement/GIR*) tercatat sebesar 379,90 mm pada musim penghujan (Oktober–Maret) dan 385,50 mm pada musim kemarau (April–September). Margin selisih yang sempit antara kedua musim ini memperlihatkan bahwa peningkatan volume curah hujan musiman tidak mereduksi kebutuhan air irigasi secara proporsional di tingkat sistem. Hal ini mengindikasikan bahwa besaran kebutuhan air irigasi padi di wilayah ini lebih dipengaruhi oleh laju evapotranspirasi dan karakteristik fisiologis tanaman, dibandingkan oleh variasi curah hujan musiman semata. Stabilitas pola permintaan air ini sejalan dengan temuan Luo *et al.* (2022) dan Zhao *et al.* (2023), yang menekankan bahwa pada agroekosistem padi monsun, besaran kebutuhan irigasi lebih ditentukan oleh dinamika evapotranspirasi tanaman (ET_c), keseimbangan air di petak sawah serta efisiensi pemanfaatan hujan efektif yang sangat bergantung pada ketepatan waktu (*timing*) dan distribusi presipitasi intra-musiman, bukan sekadar akumulasi curah hujan tahunan.

Distribusi kebutuhan air irigasi berdasarkan tahap pertumbuhan memperlihatkan pola konsentrasi temporal yang signifikan (Gambar 8). Lebih dari 80% kebutuhan air irigasi musiman terkonsentrasi pada tahap persiapan lahan (*land preparation*) dan pertumbuhan vegetatif (*initial & development*). Pada tahap persiapan lahan, kebutuhan irigasi bruto mencapai 162,50 mm pada musim hujan dan meningkat menjadi 260,00 mm pada musim kemarau. Besarnya kebutuhan pada tahap ini mencerminkan tingginya kebutuhan genangan awal, kehilangan akibat infiltrasi dan perkolasi, serta evaporasi dari permukaan lahan yang baru diolah. Temuan ini konsisten dengan berbagai studi pada sistem sawah di Asia yang menunjukkan bahwa fase persiapan lahan (*field soaking dan puddling*) merupakan salah satu komponen dengan kebutuhan air terbesar dalam satu siklus tanam, terutama karena kebutuhan penggenangan awal dan kehilangan air pada awal pengolahan lahan (Bwire *et al.*, 2024; Sudhir-Yadav *et al.*, 2014).



Gambar 8. Kebutuhan irigasi bersih (*NIR*) dan kebutuhan irigasi kotor (*GIR*) per tahap dan per musim

Pada fase pertumbuhan vegetatif, kebutuhan air irigasi bruto tercatat sebesar 166,70 mm pada musim hujan dan 90,00 mm pada musim kemarau, menempatkan fase ini sebagai kontributor terbesar kedua terhadap total permintaan irigasi musiman. Tingginya proporsi kebutuhan air pada tahap ini berkorelasi dengan laju evapotranspirasi yang meningkat tajam selama periode ekspansi kanopi dan pembentukan anakan aktif (*active tillering*), di mana permintaan fisiologis tanaman berada pada fase kritis pembentukan biomassa dan arsitektur vegetatif (Behura *et al.*, 2025). Sebaliknya, nilai luaran kebutuhan air irigasi neto pada fase reproduktif (*mid-season*) dan pemasakan (*late-season*) secara akumulatif memberikan kontribusi masing-masing kurang dari 15% terhadap total kebutuhan musiman. Rendahnya nilai kebutuhan air irigasi pada fase reproduktif tersebut tidak berkaitan dengan tingkat toleransi tanaman terhadap kekeringan, melainkan merupakan representasi dari tingginya kontribusi suplai curah hujan efektif (P_{eff}) pada jendela waktu simulasi. Meskipun secara fisiologis fase bunting (*booting*) merupakan periode kritis yang sangat peka terhadap defisit air, besarnya curah hujan efektif pada periode ini mampu memenuhi kebutuhan evapotranspirasi secara mandiri, sehingga meminimalkan kebutuhan air irigasi suplesi dari bendung (Ewaid *et al.*, 2019; Insan & Kuntiyawichai, 2022).

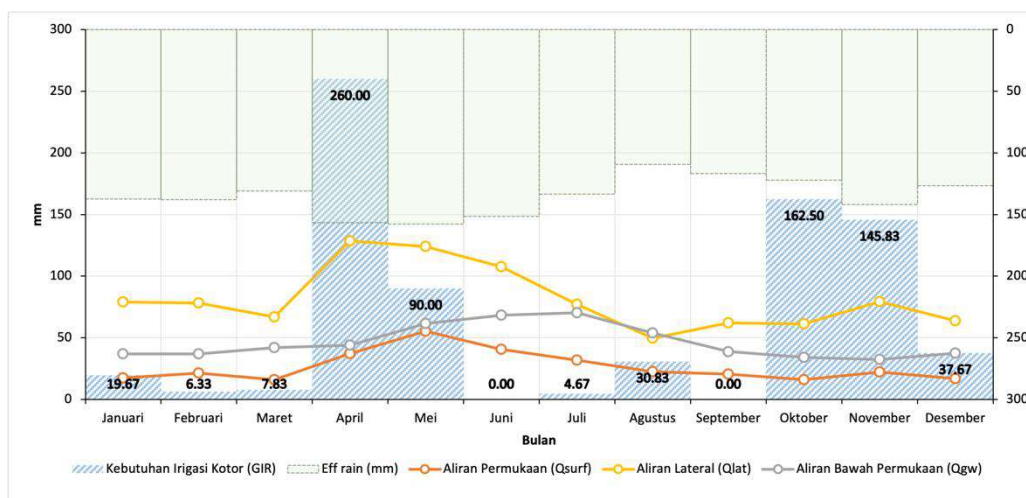
Variasi kuantitas kebutuhan air antar-fase pertumbuhan tersebut secara metodologis dikendalikan oleh nilai koefisien tanaman (K_c) yang disesuaikan pada setiap tahapan perkembangan. Spesifik untuk varietas padi Inpari 32, parameterisasi model menetapkan nilai K_c berada pada kisaran 1,00–1,10 pada fase awal (*initial*), meningkat mencapai puncaknya pada kisaran 1,15–1,25 pada fase vegetatif akhir hingga reproduktif (*mid-season*) seiring dengan pencapaian kerapatan tajuk maksimum, lalu menurun kembali secara signifikan ke kisaran 0,60–0,90 pada fase pemasakan (*late-season*). Tren fluktuasi nilai ini sepenuhnya konsisten dengan kerangka teoretis FAO-56 dan karakteristik agronomi regional, di mana penurunan nilai K_c pada fase akhir mencerminkan proses penuaan daun (*senescence*) serta pengeringan petak sawah menjelang masa panen (FAO, 1989; Purbiati *et al.*, 2024). Dengan demikian, pola

kebutuhan air yang dihasilkan oleh model CROPWAT tidak hanya valid secara hidrologis, melainkan juga representatif dalam menggambarkan dinamika biofisik tanaman di lapangan.

Oleh karena itu, hasil ini menegaskan bahwa sisi permintaan air irigasi di Sub-DAS Bila bersifat terkonsentrasi secara temporal (*time-concentrated demand*), dengan tekanan tertinggi terjadi pada fase awal musim tanam, khususnya saat persiapan lahan dan pertumbuhan vegetatif. Implikasinya, sistem yang tampak cukup pada skala tahunan belum tentu andal secara operasional apabila pasokan air tidak mampu mengikuti lonjakan kebutuhan pada fase-fase tersebut. Oleh karena itu, penilaian keberlanjutan layanan irigasi tidak cukup didasarkan pada kecukupan air tahunan, tetapi harus mempertimbangkan sinkronisasi temporal antara puncak kebutuhan irigasi dan dinamika ketersediaan air sungai, sebagaimana dijelaskan dalam kajian pengelolaan irigasi berbasis neraca air (Agnesia *et al.*, 2021).

2.4.3. Neraca Air Lahan Sawah dan Keandalan Sistem Irigasi Berdasarkan Integrasi Simulasi SWAT–CROPWAT

Integrasi hasil simulasi SWAT dan CROPWAT menunjukkan adanya perbedaan antara kondisi neraca air tahunan dan neraca air bulanan di Sub-DAS Bila (Gambar 9). Secara agregat, total hasil air (WYLD) tahunan mencapai 1.882,03 mm hampir 2,5 kali lebih besar dibandingkan total kebutuhan irigasi kotor (GIR) tahunan sebesar 765,33 mm. Dengan demikian, pada skala tahunan sistem berada pada kondisi surplus. Namun, surplus ini tidak terdistribusi merata sepanjang tahun, sehingga pada bulan-bulan tertentu layanan irigasi tetap mengalami defisit.



Gambar 9. Integrasi hasil simulasi ketersediaan air dari model SWAT dengan GIR hasil perhitungan CROPWAT

Analisis bulanan menunjukkan bahwa puncak kebutuhan air irigasi terjadi pada bulan April (260,00 mm), Oktober (162,50 mm), dan November (145,83 mm), yang masing-masing bertepatan dengan fase persiapan lahan dan awal pertumbuhan

tanaman padi pada musim kemarau dan musim hujan. Pada bulan-bulan tersebut, komponen hasil air (Q_{surf} , Q_{lat} , dan Q_{gw}) belum cukup untuk mengimbangi lonjakan kebutuhan irigasi. Pola ini mencerminkan karakteristik khas DAS beriklim monsun, di mana pada fase awal transisi musim, khususnya di bawah rezim aliran rendah (*low flow*), kontinuitas aliran sungai cenderung lebih dikendalikan oleh pelepasan aliran dasar (*baseflow*) dan simpanan air tanah (*groundwater*). Karakteristik pelepasan bawah permukaan yang stabil namun lambat ini memicu jeda waktu (*time lag*) respons hidrologis antara perubahan curah hujan dan pemulihan pasokan aliran sungai (Akoko *et al.*, 2021; Bhagat *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2026).

Ketidakeimbangan antara pasokan dan permintaan air pada periode-periode kritis tersebut tercermin secara kuantitatif melalui nilai *IDS* sebesar 106,12 mm. Defisit ini terutama terkonsentrasi pada bulan April sebesar 48,18 mm, Oktober sebesar 48,57 mm, dan November sebesar 9,37 mm, yang secara kumulatif setara dengan 13,90% dari total kebutuhan air irigasi tahunan. Meskipun secara absolut nilai defisit ini relatif kecil dibandingkan total ketersediaan air tahunan, konsentrasinya pada fase-fase awal pertumbuhan tanaman padi menjadikannya faktor pembatas (*limiting factor*) penting bagi stabilitas layanan irigasi dan keberhasilan budidaya. Dengan demikian, signifikansi nilai *IDS* dalam penelitian ini bukanlah terletak pada besarnya defisit kumulatif, melainkan pada penegasan bahwa ketidaksinkronan temporal antara pasokan air sungai dan puncak kebutuhan irigasi menghasilkan tekanan terhadap layanan pada bulan-bulan yang paling sensitif dalam siklus budidaya padi.

Dari sisi keandalan, nilai *IRI* sebesar 0,75 menunjukkan bahwa kebutuhan air irigasi dapat terpenuhi pada 75% bulan dalam satu tahun, atau sembilan dari dua belas bulan, namun masih terjadi kegagalan layanan pada 25% bulan, terutama pada periode-periode kritis. Temuan ini sejalan dengan kerangka evaluasi kinerja sistem sumber daya air yang menekankan bahwa kinerja layanan irigasi perlu dinilai dari seberapa sering sistem gagal memenuhi kebutuhan (*reliability*) dan seberapa besar defisit yang terjadi ketika kegagalan muncul (*vulnerability/deficit severity*), terutama pada periode-periode kritis, sehingga indikator agregat tahunan saja berpotensi menutupi risiko operasional yang berulang (Waheed *et al.*, 2023; Yuan *et al.*, 2024).

Secara keseluruhan, hasil integrasi SWAT–CROPWAT menegaskan bahwa masalah utama pengelolaan air irigasi di Sub-DAS Bila bukan terletak pada kekurangan air tahunan, melainkan pada *mismatch* temporal antara hasil air (*WYLD*) dan kebutuhan irigasi yang terkonsentrasi secara musiman. Dominasi aliran bawah permukaan memang menopang stabilitas pasokan dasar, tetapi tidak selalu mampu mengakomodasi lonjakan kebutuhan air dalam waktu singkat. Dengan demikian, evaluasi neraca air yang dikombinasikan dengan indikator *IRI* dan *IDS* menjadi landasan kuantitatif yang kuat untuk merumuskan strategi pengelolaan air yang lebih adaptif pada bulan-bulan kritis terhadap variabilitas iklim monsun dan dinamika sistem pertanian lahan sawah.

2.5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa temuan sebagai berikut:

1. Penelitian ini mengembangkan kerangka hidro-agronomik terintegrasi berbasis model SWAT–CROPWAT untuk menganalisis keterkaitan antara ketersediaan air sungai

dan kebutuhan air irigasi padi di Sub-DAS Bila secara spasial-terdistribusi dan temporal pada skala intra-musiman. Kinerja model SWAT tergolong sangat baik, dengan nilai NSE sebesar 0,77 pada periode kalibrasi dan 0,76 pada periode validasi, nilai R^2 sebesar 0,80 dan 0,77, serta P_{bias} sebesar -2,12% dan -0,89%, sehingga model dinilai mampu merepresentasikan proses hidrologi utama DAS secara andal.

2. Rezim hidrologi Sub-DAS Bila didominasi oleh aliran bawah permukaan, dengan kontribusi aliran lateral (Q_{lat}) sebesar 51,90% dan aliran air tanah dangkal (Q_{gw}) sebesar 29,60% terhadap total hasil air ($WYLD$) tahunan rata-rata sekitar 1.882,03 mm, sedangkan limpasan permukaan (Q_{surf}) hanya menyumbang sekitar 16,90%. Temuan ini menegaskan bahwa infiltrasi, perkolasi, dan pelepasan air dari akuifer dangkal memainkan peran penting dalam menopang ketersediaan air sungai, terutama pada periode debit rendah.
3. Kebutuhan air irigasi padi menunjukkan pola permintaan yang bersifat musiman dan terkonsentrasi pada fase-fase pertumbuhan tertentu. Lebih dari 80% kebutuhan air irigasi terjadi pada fase persiapan lahan dan pertumbuhan vegetatif. Kebutuhan irigasi bruto relatif sebanding antara musim hujan (379,90 mm) dan musim kemarau (385,50 mm), yang menunjukkan bahwa tekanan terhadap sistem irigasi lebih ditentukan oleh dinamika fase pertumbuhan tanaman dan evapotranspirasi daripada oleh total curah hujan musiman semata.
4. Analisis neraca air dan keandalan irigasi menunjukkan bahwa meskipun Sub-DAS Bila mengalami surplus air pada skala tahunan, layanan irigasi belum sepenuhnya andal karena terjadi ketidaksinkronan temporal antara hasil air ($WYLD$) dan kebutuhan irigasi. Defisit berulang pada April, Oktober, dan November menghasilkan nilai IRI sebesar 0,75 dan IDS sebesar 106,12 mm, atau sekitar 13,90% dari total kebutuhan irigasi tahunan. Temuan ini menunjukkan bahwa masalah utama pengelolaan air di Sub-DAS Bila bukan berupa kekurangan air tahunan, melainkan *mismatch* temporal pasokan–kebutuhan pada bulan-bulan kritis.

2.6 Daftar Pustaka

- Abbas, S. A., Bailey, R. T., White, J. T., Arnold, J. G., White, M. J., & Eerkasova, N., & Gao, J. (2024). A framework for parameter estimation, sensitivity analysis, and uncertainty analysis for holistic hydrologic modeling using SWAT+. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(1), 21–48. <https://doi.org/10.5194/HESS-28-21-2024>
- Abdullah, Hardianty H, R., Boceng, A., & Asra, R. (2022). Flood Vulnerability Projection in Rice Land Based on The HadCM3 Climate Model in The Bila Watershed Province Of South Sulawesi. *Jurnal Galung Tropika*, 11(2), 143–152. <https://doi.org/10.31850/jgt.v11i2.898>
- Abuhay, W., Gashaw, T., & Tsegaye, L. (2023). Assessing impacts of land use/land cover changes on the hydrology of Upper Gilgel Abbay watershed using the SWAT model. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100535. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100535>
- Agnesia, C., Suryadi, E., & Perwitasari, S. D. N. (2021). Analisis Ketersediaan dan Kebutuhan Air Berdasarkan Neraca Air di Sub DAS Cikeruh Jawa Barat. *Jurnal Agritechno*, 106–115. <https://doi.org/10.20956/at.v14i2.503>
- Agrawal, A., Srivastava, P. K., Tripathi, V. K., Shrinivasa, D. J., Maurya, S., & Sharma, R. (2023). Future projections of crop water and irrigation water requirements

- using a bias-corrected regional climate model coupled with CROPWAT. *Journal of Water and Climate Change*, 14(4), 1147–1161. <https://doi.org/10.2166/WCC.2023.349>
- Ahmad, Q. ul A., Moors, E., Biemans, H., Shaheen, N., Masih, I., & ur Rahman Hashmi, M. Z. (2023). Climate-induced shifts in irrigation water demand and supply during sensitive crop growth phases in South Asia. *Climatic Change*, 176(11), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S10584-023-03629-7>
- Akoko, G., Kato, T., & Tu, L. H. (2020). Evaluation of Irrigation Water Resources Availability and Climate Change Impacts—A Case Study of Mwea Irrigation Scheme, Kenya. *Water*, 12(9), 2330. <https://doi.org/10.3390/w12092330>
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., & Kato, T. (2021). A Review of SWAT Model Application in Africa. *Water*, 13(9), 1313. <https://doi.org/10.3390/w13091313>
- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 326, 116799. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116799>
- Ansari, A., Pranesti, A., Telaumbanua, M., Alam, T., Taryono, Wulandari, R. A., Nugroho, B. D. A., & Supriyanta. (2023). Evaluating the effect of climate change on rice production in Indonesia using multimodelling approach. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E19639>
- Ariska, M., Suhadi, Supari, Irfan, M., & Iskandar, I. (2024). Spatio-Temporal Variations of Indonesian Rainfall and Their Links to Indo-Pacific Modes. *Atmosphere* 2024, Vol. 15, Page 1036, 15(9), 1036. <https://doi.org/10.3390/ATMOS15091036>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Griensven, A. van, Liew, M. W. Van, Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Badan Pusat Statistik Indonesia (BPS). (2023). *Rice Harvest Area and Production in Indonesia 2023*. <https://www.bps.go.id/>
- Behura, K. B., Raul, S. K., Paul, J. C., Mohanty, S., Jena, P. P., Dwibedi, S. K., Ghosh, S., Singh, L. K., Devi, S. R., Singha, A. K., & Mohanty, A. K. (2025). Comprehensive analysis of methods for estimating actual paddy evapotranspiration—A review. *Frontiers in Water*, 7, 1553732. <https://doi.org/10.3389/FRWA.2025.1553732>
- Bennour, A., Jia, L., Menenti, M., Zheng, C., Zeng, Y., Barnieh, B. A., & Jiang, M. (2022). Calibration and Validation of SWAT Model by Using Hydrological Remote Sensing Observables in the Lake Chad Basin. *Remote Sensing* 2022, Vol. 14, Page 1511, 14(6), 1511. <https://doi.org/10.3390/RS14061511>
- Bhagat, H., Ghosh, P., & Nagesh Kumar, D. (2021). Estimation of seasonal base flow contribution to a tropical river using stable isotope analysis. *Journal of Hydrology*, 601, 126661. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126661>
- Bhere, S., & Reddy, M. J. (2022). Assessment of Reliability, Resilience, and Vulnerability (RRV) of terrestrial water storage using Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) for Indian river basins. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100851. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2022.100851>
- Bwire, D., Saito, H., Sidle, R. C., & Nishiwaki, J. (2024). Water Management and Hydrological Characteristics of Paddy-Rice Fields under Alternate Wetting and Drying Irrigation Practice as Climate Smart Practice: A Review. *Agronomy*

- 2024, Vol. 14, Page 1421, 14(7), 1421.
<https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14071421>
- Carlos Mendoza, J. A., Chavez Alcazar, T. A., & Zuñiga Medina, S. A. (2021). Calibration and Uncertainty Analysis for Modelling Runoff in the Tambo River Basin, Peru, Using Sequential Uncertainty Fitting Ver-2 (SUFI-2) Algorithm. *Air, Soil and Water Research*, 14. <https://doi.org/10.1177/1178622120988707>
- Cavalcante, R. B. L., Ferreira, D. B. da S., Pontes, P. R. M., Tedeschi, R. G., da Costa, C. P. W., & de Souza, E. B. (2020). Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmospheric Research*, 238, 104879. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2020.104879>
- Chen, J., Zheng, M., Lin, F., Chen, X., & Yao, H. (2025). Spatiotemporal variation of forest water conservation based on dual-variable calibration of runoff and evapotranspiration with SWAT model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 373, 110755. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2025.110755>
- Chen, Y., Faramarzi, M., Gan, T. Y., & She, Y. (2023). Evaluation and uncertainty assessment of weather data and model calibration on daily streamflow simulation in a large-scale regulated and snow-dominated river basin. *Journal of Hydrology*, 617, 129103. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129103>
- Chen, Y., Li, J., Li, B., Dang, H., Zhang, C., Wang, C., & Chen, S. (2026). Precipitation and groundwater alternately dominate seasonal streamflow in mountainous catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 63, 103039. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2025.103039>
- Cho, G. H., Ahmad, M. J., & Choi, K. S. (2021). Water Supply Reliability of Agricultural Reservoirs under Varying Climate and Rice Farming Practices. *Water* 2021, Vol. 13, Page 2988, 13(21), 2988. <https://doi.org/10.3390/W13212988>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64). <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Deb, P., & Kiem, A. S. (2020). Evaluation of rainfall–runoff model performance under non-stationary hydroclimatic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1667–1684. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1754420>
- Deb, P., Moradkhani, H., Han, X., Abbaszadeh, P., & Xu, L. (2022). Assessing irrigation mitigating drought impacts on crop yields with an integrated modeling framework. *Journal of Hydrology*, 609, 127760. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.127760>
- Demir, M. S., & Muratoglu, A. (2025). Improving water footprint assessment in agriculture: A high-resolution SWAT model study of the Ceyhan Basin, Türkiye. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 100664. <https://doi.org/10.1016/J.ECOHYD.2025.100664>
- European Space Agency (ESA). (2024). *Copernicus Sentinel-2A imagery (Level-2A)*, European Space Agency, 2024. <https://Scihub.Copernicus.Eu/>.
- Ewaid, Abed, & Al-Ansari. (2019). Crop Water Requirements and Irrigation Schedules for Some Major Crops in Southern Iraq. *Water*, 11(4), 756. <https://doi.org/10.3390/w11040756>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1989). *Irrigation water management: irrigation scheduling, Training manual No. 4*. (C. Brouwer, K. Prins, & M. Heibloem, Eds.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2015 2:1, 2(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

- Gabr, M. E., & Fattouh, E. M. (2021). Assessment of irrigation management practices using FAO-CROPWAT 8, case studies: Tina Plain and East South El-Kantara, Sinai, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1623–1636. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2020.09.017>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC4D4F>
- Huang, Y., & Yang, Y. (2026). Upstream–downstream hydrological responses to climate and cryospheric changes in Three River Basins originating from the Southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 664, 134337. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2025.134337>
- Insan, S., & Kuntiyawichai, K. (2022). Assessment of Agricultural Water Sufficiency under Climate and Land Use Changes in the Lam Takong River Basin. *Water*, 14(18), 2794. <https://doi.org/10.3390/w14182794>
- Jin, Z., Yue, R., Ma, Z., Cheng, S., Khan, M. N., & Nie, L. (2024). Effect of water and nitrogen coupling on energy balance and production efficiency in rice production. *Energy*, 288, 129739. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.129739>
- Johnson, J. M., Becker, M., Dossou-Yovo, E. R., & Saito, K. (2024). Enhancing rice yields, water productivity, and profitability through alternate wetting and drying technology in farmers' fields in the dry climatic zones of West Africa. *Agricultural Water Management*, 304, 109096. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109096>
- Keller, A. A., Garner, K., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2023). Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models. *Science of The Total Environment*, 867, 161209. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.161209>
- Kishore, N., Pandey, A., Reddy, C. R. G., & Sahu, R. T. (2025). Evaluation of the SWAT model for water balance components under changing climatic conditions in the Mahanadi River Catchment, Chhattisgarh. *Water Practice and Technology*, 20(5), 1220–1236. <https://doi.org/10.2166/WPT.2025.072>
- Kumar, S., Yadav, A., Kumar, A., Hasanain, M., Shankar, K., Karan, S., Rawat, S., Sinha, A., Kumar, V., Gairola, A., Prajapati, S. K., & Dayal, P. (2023). Climate Smart Irrigation Practices for Improving Water Productivity in India: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(12), 333–348. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/V13I123689>
- Li, Z., & Quiring, S. M. (2021). Investigating spatial heterogeneity of the controls of surface water balance in the contiguous United States by considering anthropogenic factors. *Journal of Hydrology*, 601, 126621. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126621>
- Lias, S. A., Irmayani, & Laban, S. (2020). The potential of water availability in Maros Watershed using Thornthwaite-Mather water balance method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 486(1), 012135. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/486/1/012135>
- Luo, W., Chen, M., Kang, Y., Li, W., Li, D., Cui, Y., Khan, S., & Luo, Y. (2022). Analysis of crop water requirements and irrigation demands for rice: Implications for increasing effective rainfall. *Agricultural Water Management*, 260, 107285. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107285>
- Mahmud, M., Nurdianto, N., Cuandi, C., & Ardiman, A. (2025). Hydrological Potential of Jamblang Weir and Evaluation of Cropping Pattern Feasibility in the Jamblang

- Irrigation Area. *International Journal of Social Service and Research*, 5(8), 1009-1019. <https://ijssr.ridwaninstitute.co.id/index.php/ijssr/article/view/1296>
- Mal, S., & Sen, S. (2025). Optimizing agricultural water use: Crop water requirement and irrigation scheduling of tomato & soybean using FAO CropWat 8.0 model in Chandrapur district, Maharashtra, India. *Next Research*, 2(3), 100529. <https://doi.org/10.1016/J.NEXRES.2025.100529>
- Mcguire, K. J., Klaus, | Julian, Jackson, | C Rhett, Correspondence, K. J., & Mcguire, V. (2024). JAMES BUTTLE REVIEW: Interflow, subsurface stormflow and throughflow: A synthesis of field work and modelling. *Hydrological Processes*, 38(9), e15263. <https://doi.org/10.1002/HYP.15263>
- Mo, L., Rustum, R., & Adeloye, A. J. (2025). Reliability Performance Indices for Planning and Operational Evaluation of Main Tanks in Water Distribution Networks. *Water* 2025, Vol. 17, 17(6). <https://doi.org/10.3390/W17060847>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/TRANS.58.10715>
- Moura, L. B., Lopes, T. R., Duarte, S. N., Sica, P., & Folegatti, M. V. (2025). Hydrological Assessment Using the SWAT Model in the Jundiá River Basin, Brazil: Calibration, Model Performance, and Land Use Change Impact Analysis. *Resources* 2025, Vol. 14, Page 112, 14(7), 112. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES14070112>
- Mullick, Md. R. A., & Das, N. (2021). Estimation of the spatial and temporal water footprint of rice production in Bangladesh. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 511–524. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.002>
- Nasiri, S., Ansari, H., & Ziaei, A. N. (2020). Simulation of water balance equation components using SWAT model in Samalqan Watershed (Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(11), 421. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05366-y>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (NASA LaRC). (2024). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Project: Climatology Data for Agricultural Applications*. <https://Power.Larc.Nasa.Gov/>.
- Paiva, K., Rau, P., Montesinos, C., Lavado-Casimiro, W., Bourrel, L., & Frappart, F. (2023). Hydrological Response Assessment of Land Cover Change in a Peruvian Amazonian Basin Impacted by Deforestation Using the SWAT Model. *Remote Sensing* 2023, Vol. 15, 15(24). <https://doi.org/10.3390/RS15245774>
- Palanisami, K., & Nagothu, U. S. (2024). Re-Estimating the Crop Water Requirement (CWR). In *India's Water Future in a Changing Climate* (pp. 161-174). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1785-9_8
- Purbiati, T., Anggraeni, L., Sugiono, S., Zubaidi, T., Purnama, S., Hermanto, C., Krismawati, A., Arifin, Z., Antarlina, S. S., Kilmanun, J. C., & Yustina, I. (2024). Performance and community acceptance of paddy management with balanced input cultivation technology in Kebonagung Village Madiun East Java Indonesia. *Heliyon*, 10(9), e29834. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29834>
- Putera, M. I., Munir, A., Achmad, M., & Suhardi. (2020). Land use assessment of Jeneberang watershed using hydrology and water availability analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 473(1), 012099. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012099>
- Saade, J., Atieh, M., Ghanimeh, S., & Golmohammadi, G. (2021). Modeling Impact of Climate Change on Surface Water Availability Using SWAT Model in a Semi-

- Arid Basin: Case of El Kalb River, Lebanon. *Hydrology*, 8(3), 134. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030134>
- Saikanth, D. R. K., Kumar, S., Rani, M., Sharma, A., Srivastava, S., Vyas, D., Singh, G. A., & Kumar, S. (2023). A Comprehensive Review on Climate Change Adaptation Strategies and Challenges in Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 10–19. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/V13I113138>
- Staddal, I. (2016). The Analysis of Surface Runoff Using SWAT Model in Bila Watershed, South Sulawesi. *Jurnal Technopreneur (JTech)*, 4(1), 57–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.30869/jtech.v4i1.53>
- Staddal, I., Haridjaja, O., & Hidayat, Y. (2016). The Analysis of Streamflow on Bila Watershed, South Sulawesi. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(2), 117–130. <https://doi.org/10.32679/jsda.v12i2.56>
- Subbarayan, S., Youssef, Y. M., Singh, L., Dąbrowska, D., Alarifi, N., Ramsankaran, R. A. A. J., Visweshwaran, R., & Saqr, A. M. (2025). Soil and Water Assessment Tool-Based Prediction of Runoff Under Scenarios of Land Use/Land Cover and Climate Change Across Indian Agro-Climatic Zones: Implications for Sustainable Development Goals. *Water*, 17(3), 458. <https://doi.org/10.3390/W17030458/S1>
- Sudhir-Yadav, Evangelista, G., Faronilo, J., Humphreys, E., Henry, A., & Fernandez, L. (2014). Establishment method effects on crop performance and water productivity of irrigated rice in the tropics. *Field Crops Research*, 166, 112–127. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2014.06.001>
- Tirtalistyani, R., Murtiningrum, M., & Kanwar, R. S. (2022). Indonesia Rice Irrigation System: Time for Innovation. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 12477, 14(19), 12477. <https://doi.org/10.3390/SU141912477>
- Tran, B. C., Tran, A. P., Tran, D. H., Duc Nguyen, A., Blanco Campbell, S., Nguyen, N. A., & Le, T. H. (2025). Coupling of SWAT and WEAP Models for Quantifying Water Supply, Demand and Balance Under Dual Impacts of Climate Change and Socio-Economic Development: A Case Study from Cauto River Basin, Cuba. *Water* 2025, Vol. 17, Page 2672, 17(18), 2672. <https://doi.org/10.3390/W17182672>
- Tumsa, B. C., Kenea, G., & Tola, B. (2022). The application of SWAT+ model to quantify the impacts of sensitive LULC changes on water balance in Guder catchment, Oromia, Ethiopia. *Heliyon*, 8(12), e12569. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12569>
- Valencia, S., Villegas, J. C., Hoyos, N., Duque-Villegas, M., & Salazar, J. F. (2024). Streamflow response to land use/land cover change in the tropical Andes using multiple SWAT model variants. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101888. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2024.101888>
- Veettil, A. V., Mishra, A. K., & Green, T. R. (2022). Explaining water security indicators using hydrologic and agricultural systems models. *Journal of Hydrology*, 607, 127463. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.127463>
- Waheed, S. Q., Alobaidy, M. N., & Grigg, N. S. (2023). Resilience Appraisal of Water Resources System under Climate Change Influence Using a Probabilistic-Nonstationary Approach. *Environments* 2023, Vol. 10, 10(5). <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS10050087>
- Wang, A., Wang, J., Luan, B., Zhang, M., Wang, X., & Yu, P. (2025). Quantifying the impact of land use changes on surface runoff in the Loess Plateau area of Northwest China by SWAT. *Journal of Environmental Management*, 377, 124641. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.124641>

- Wang, S., Wang, Y., Wang, Y., & Wang, Z. (2022). Assessment of influencing factors on non-point source pollution critical source areas in an agricultural watershed. *Ecological Indicators*, 141, 109084. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109084>
- Wendt, D. E., Bloomfield, J. P., Van Loon, A. F., Garcia, M., Heudorfer, B., Larsen, J., & Hannah, D. M. (2021). Evaluating integrated water management strategies to inform hydrological drought mitigation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(10), 3113–3139. <https://doi.org/10.5194/NHESS-21-3113-2021>,
- Wu, S. J., Mai, J. Sen, Lin, Y. H., & Yeh, K. C. (2022). Modeling Probabilistic-Based Reliability Analysis for Irrigation Water Supply Due to Uncertainties in Hydrological and Irrigation Factors. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 12747, 14(19), 12747. <https://doi.org/10.3390/SU141912747>
- Yalcin, E. (2023). A CMIP6 multi-model ensemble-based analysis of potential climate change impacts on irrigation water demand and supply using SWAT and CROPWAT models: a case study of Akmes Dam, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology* 2023 155:1, 155(1), 679–699. <https://doi.org/10.1007/S00704-023-04657-0>
- Yuan, H., Mahdi, M., Xueqian, S., & Galoie, M. (2024). A novel robust evaluation approach to improve systematic behavior of failure safety in water supply system under various ellipsoid uncertainties. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 8746-. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59598-z>
- Zeng, Y., Liu, D., Guo, S., Xiong, L., Liu, P., Chen, J., Chen, H., Yin, J., Wu, Z., & Zhou, W. (2024). Assessment of the impacts of water resources allocation on the reliability, resilience and vulnerability of the water–energy–food–society (WEFS) nexus system. *Agricultural Water Management*, 295, 108780. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.108780>
- Zhao, X., Chen, M., Xie, H., Luo, W., Wei, G., Zheng, S., Wu, C., Khan, S., Cui, Y., & Luo, Y. (2023). Analysis of irrigation demands of rice: Irrigation decision-making needs to consider future rainfall. *Agricultural Water Management*, 280, 108196. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108196>
- Zhou, Z., Jin, J., & Wang, L. (2022). Modeling the effects of elevation and precipitation on Rice (*Oryza sativa* L.) production considering multiple planting methods and cultivars in Central China. *Science of The Total Environment*, 813, 152679. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152679>
- Zhu, S., Tong, W., Li, H., Li, K., Xu, W., & Liang, B. (2025). Temporal Variations in Rice Water Requirements and the Impact of Effective Rainfall on Irrigation Demand: Strategies for Sustainable Rice Cultivation. *Water*, 17(5), 656. <https://doi.org/10.3390/W17050656/S1>
- Zulkafli, Z., Muharam, F. M., Raffar, N., Jajarmizadeh, A., Abdi, M. J., Rehan, B. M., & Nurulhuda, K. (2021). Contrasting Influences of Seasonal and Intra-Seasonal Hydroclimatic Variabilities on the Irrigated Rice Paddies of Northern Peninsular Malaysia for Weather Index Insurance Design. *Sustainability* 2021, Vol. 13, 13(9). <https://doi.org/10.3390/SU13095207>

BAB III

ANALISIS KUALITAS AIR SUNGAI SUB-DAS BILA UNTUK IIRIGASI LAHAN SAWAH

3.1. Abstrak

Sub-DAS Bila merupakan sumber utama air irigasi sawah di wilayah monsun Sulawesi Selatan, namun evaluasi mutu air yang hanya bertumpu pada pengukuran sesaat dan pendekatan kepatuhan baku mutu sering kali belum mampu menangkap gradien degradasi spasial serta implikasinya terhadap operasi dan pemeliharaan jaringan irigasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kualitas air Sungai Bila pada ruas sepanjang $\pm 30,43$ km menggunakan model kualitas air sungai QUAL2Kw berbasis proses dengan pendekatan *steady-state* untuk merepresentasikan kondisi *synoptic* April 2024, bukan dinamika tahunan penuh, yang dikalibrasi melalui neraca massa iteratif. Parameter yang dianalisis meliputi DO, pH, CBOD_f, COD, ISS, NH_4^+ , NO_3^- , dan PO_4^{3-} , sedangkan TN dan TP diperlakukan sebagai keluaran turunan model. Hasil simulasi hidraulika menunjukkan debit meningkat dari 31,80 menjadi 182,71 m³/s dan kedalaman dari 0,77 menjadi 2,51 m, sedangkan kecepatan relatif stabil pada kisaran 1,55–1,77 m/s. Pada saat yang sama, kapasitas reaerasi menurun tajam dengan nilai ka_{20} turun dari 11,40 hari⁻¹ menjadi 1,68 hari⁻¹. Profil longitudinal kualitas air menunjukkan degradasi yang konsisten menuju hilir, ditandai oleh penurunan DO dari 8,96 menjadi 5,48 mg/L, peningkatan CBOD_f dari 1,44 menjadi 4,64 mg/L, COD dari 2,00 menjadi 13,95 mg/L, dan ISS dari 3,18 menjadi 14,08 mg/L. Nutrien anorganik berada pada kisaran rendah dan meningkat moderat, dengan NH_4^+ sebesar 33,50–48,20 $\mu\text{gN/L}$, NO_3^- sebesar 124,20–138,20 $\mu\text{gN/L}$, dan PO_4^{3-} sebesar 52,60–59,30 $\mu\text{gP/L}$, sedangkan TN dan TP meningkat dari 157,65 menjadi 261,82 $\mu\text{gN/L}$ dan dari 52,65 menjadi 65,15 $\mu\text{gP/L}$. Kinerja model tergolong memadai dengan rata-rata NSE 0,71, R^2 0,95, dan P_{bias} -1,29%, dengan kecocokan terbaik pada CBOD_f dan ISS. Berdasarkan PP 22 Tahun 2021, mutu air secara regulatif masih layak untuk irigasi karena memenuhi minimal Kelas 4 dan pada umumnya setara Kelas 2. Namun, temuan penelitian ini menunjukkan adanya penurunan mutu dari setara Kelas 1 pada segmen hulu–tengah menjadi setara Kelas 2 pada segmen tengah–hilir, terutama dipicu oleh penurunan DO dan peningkatan COD, disertai lonjakan ISS yang berpotensi mempercepat sedimentasi dan meningkatkan beban operasi dan pemeliharaan jaringan irigasi. Hasil ini menegaskan bahwa status “layak” tidak identik dengan “aman”, dan bahwa segmen tengah–hilir merupakan zona prioritas pengelolaan untuk menjaga margin keselamatan mutu air pada kondisi saat ini maupun pada skenario perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim.

Kata kunci: Beban pencemar difus, irigasi lahan sawah, kualitas air sungai, pemodelan QUAL2Kw, profil longitudinal

3.2. Pendahuluan

Air sungai merupakan penopang vital bagi sistem budidaya padi global yang mencakup sekitar 160 juta hektar dan menyumbang sekitar 75% produksi beras dunia (FAO, 2022; Roudbari *et al.*, 2023). Keberlanjutan produksi padi tidak hanya bergantung pada ketersediaan air, tetapi juga pada mutu air yang digunakan dalam sistem irigasi (Salvato *et al.*, 2024). Di sisi lain, pertanian padi intensif yang menyerap sekitar 70% pengambilan air tawar global secara inheren memberikan tekanan yang besar terhadap

daya dukung sumber daya air (Qin *et al.*, 2024). Lahan sawah intensif di Asia telah diidentifikasi sebagai salah satu sumber penting pencemar non-titik (*non-point source pollution*), terutama melalui limpasan dan drainase yang membawa nitrogen, fosfor, bahan organik, serta padatan tersuspensi ke badan air permukaan (Nie *et al.*, 2024; Tan *et al.*, 2023; Zeng *et al.*, 2021). Kondisi ini menempatkan kualitas air sebagai komponen yang tidak terpisahkan dari ketahanan sistem pertanian berbasis irigasi (Anyango *et al.*, 2024).

Kualitas air merupakan salah satu faktor penentu bagi keberlanjutan pertanian karena degradasi mutu air berimplikasi langsung terhadap efektivitas pemanfaatan air irigasi, yang pada gilirannya berdampak pada produktivitas tanaman (Vranešević *et al.*, 2025). Ancaman penurunan kualitas air tidak hanya bersifat kimiawi, tetapi juga fisik. Masukan padatan tersuspensi anorganik (ISS) yang berlebihan ke dalam jaringan irigasi dapat memicu sedimentasi dan pendangkalan saluran, menurunkan kapasitas serta efisiensi penyaluran air, dan meningkatkan kebutuhan operasi dan pemeliharaan (Gurmu *et al.*, 2024). Pada tingkat petakan, akumulasi sedimen juga berpotensi memicu penyumbatan pori tanah (kolmasi) yang mengganggu aerasi zona perakaran (Bhatti *et al.*, 2021). Selain itu, gangguan terhadap keseimbangan oksigen terlarut (DO) di sungai juga merupakan indikator operasional yang esensial. DO yang rendah umumnya mencerminkan meningkatnya beban organik dan kecenderungan kondisi yang lebih reduktif (McCabe *et al.*, 2021). Apabila air dengan karakter tersebut digunakan untuk irigasi, maka risiko berkembangnya kondisi anaerobik di sistem sawah dapat meningkat dan berpotensi mengganggu ketersediaan serta serapan hara oleh tanaman (Bai *et al.*, 2025; Chakraborty, 2021). Pada sungai tropis, dinamika ini menjadi lebih kompleks karena suhu air yang relatif tinggi dapat mempercepat laju reaksi biogeokimia dan meningkatkan sensitivitas sistem terhadap masukan pencemar (Johnson *et al.*, 2024).

Dalam konteks daerah aliran sungai (DAS), kualitas air merupakan hasil interaksi kompleks antara karakteristik hidrologi, penggunaan/tutupan lahan, beban pencemar, dan dinamika aliran, sehingga variasinya tidak dapat dijelaskan hanya oleh satu faktor tunggal (Chen *et al.*, 2025). Sub-DAS Bila di Sulawesi Selatan merepresentasikan sistem DAS agraris yang berperan ganda sebagai sumber utama air irigasi sawah dan sebagai kontributor aliran menuju sistem perairan Danau Tempe (Dahlan *et al.*, 2021). Pada wilayah beriklim monsun, tekanan kualitas air sering kali tidak muncul sebagai beban pencemar yang konstan, tetapi sebagai hasil interaksi antara perubahan debit, kapasitas pengenceran, dan transport material tersuspensi (Ali *et al.*, 2025). Pada kondisi debit rendah, kapasitas pengenceran melemah sehingga konsentrasi polutan lebih mudah meningkat pada segmen tertentu (Sepp *et al.*, 2025). Sebaliknya, pada debit tinggi, peningkatan energi aliran dapat memperkuat erosi dan mobilisasi sedimen dari bagian hulu, yang pada akhirnya meningkatkan beban padatan tersuspensi pada segmen bawah (Yonouwinhi *et al.*, 2025). Kombinasi kedua kondisi tersebut berpotensi membentuk gradien kualitas air longitudinal dari hulu ke hilir yang berdampak langsung terhadap keberlanjutan fungsi irigasi.

Meskipun isu kualitas air pada sistem sungai pertanian telah banyak dibahas, pendekatan evaluasi kualitas air irigasi masih didominasi oleh perbandingan konsentrasi sesaat terhadap baku mutu (*compliance approach*). Pendekatan ini memang relevan untuk menilai kepatuhan regulatif, tetapi sering kali belum memadai untuk

menjelaskan tren degradasi spasial, mekanisme fisik-kimia yang mendasarinya, serta implikasinya terhadap pengelolaan irigasi (Rozemeijer *et al.*, 2025). Keterbatasan analitis ini menimbulkan kesenjangan besar pada sistem sungai agraris seperti Sub-DAS Bila, di mana penilaian berbasis kepatuhan normatif berpotensi menyamarkan akumulasi beban organik dan padatan tersuspensi yang terjadi pada ruas-ruas tertentu. Akibatnya, degradasi mutu air yang terjadi secara spasial gagal terdeteksi, padahal fenomena tersebut berpotensi menyusutkan margin keselamatan mutu air serta memperberat beban operasi jaringan irigasi dari waktu ke waktu.

Untuk menjembatani kesenjangan analitis tersebut, penelitian ini menerapkan pendekatan pemodelan berbasis proses menggunakan QUAL2Kw. Model ini dipilih karena kemampuannya dalam merepresentasikan kualitas air sungai secara spasial (per segmen) di sepanjang alur dengan menghubungkan kondisi hidraulika dan transpor konstituen dengan proses biogeokimia yang mengendalikan parameter kunci seperti oksigen terlarut, karbon organik, nitrogen, dan fosfor (Babamiri *et al.*, 2020; Mohamad Noor *et al.*, 2025; Soares *et al.*, 2023). Melalui kerangka kerja terdistribusi ini, pemodelan tidak hanya digunakan untuk mengevaluasi status mutu air secara umum, melainkan juga untuk mengidentifikasi kawasan kritis yang mengalami tekanan kualitas air paling nyata dalam rangka evaluasi kelayakan irigasi lahan sawah di wilayah studi. Secara spesifik, analisis diarahkan untuk: (i) memetakan profil kualitas air dan beban padatan secara longitudinal, (ii) mengidentifikasi proses fisik dan biokimia dominan yang memicu risiko degradasi mutu air pada periode kritis, serta (iii) mengevaluasi kelayakan air berdasarkan parameter kunci ekologi dan irigasi.

3.3. Metode Penelitian

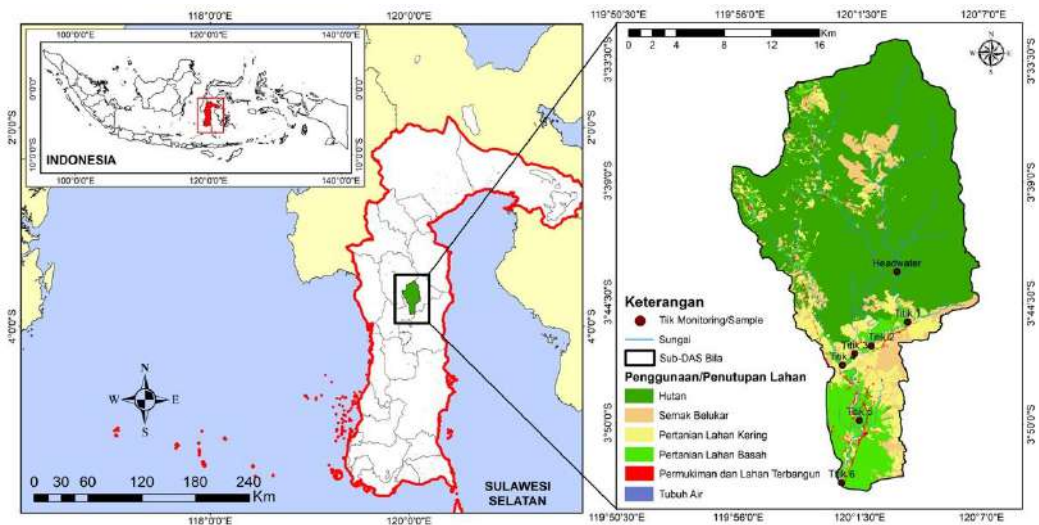
3.3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Sub-DAS Bila, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Secara geografis, wilayah Sub-DAS Bila terletak pada koordinat 119°55'00"–120°10'00" BT dan 3°33'20"–3°53'20" LS, dengan luas wilayah sekitar ±41.914,86 ha (Gambar 10). Sub-DAS ini mencakup tiga wilayah administrasi, yaitu Kabupaten Enrekang pada bagian hulu, Kabupaten Sidenreng Rappang pada bagian tengah, dan Kabupaten Wajo pada bagian hilir. Sungai Bila merupakan alur sungai dalam sistem Sub-DAS Bila dan menjadi objek analisis kualitas air pada penelitian ini. Secara fungsional, ruas Sungai Bila pada wilayah kajian berperan sebagai arteri hidrologi yang menyuplai air bagi sistem irigasi lahan sawah teknis sebelum bermuara ke sistem perairan Danau Tempe yang sensitif secara ekologis.

Secara klimatologis, Sub-DAS Bila berada dalam rezim iklim monsun dengan klasifikasi *Oldeman* Tipe C, yang secara umum dicirikan oleh musim hujan pada Oktober–Maret dan musim kemarau pada April–September. Pola musiman ini konsisten dengan karakteristik iklim monsun di wilayah Indonesia pada studi pembandingan dengan klasifikasi serupa (Ariska *et al.*, 2024). Penggunaan/tutupan lahan di sepanjang koridor sungai didominasi oleh hutan dan mozaik aktivitas pertanian, terutama padi sawah intensif, yang berpadu dengan kawasan permukiman dan semak belukar.

Pengambilan sampel kualitas air sungai dilakukan secara *synoptic* pada bulan April 2024. Pemilihan periode ini dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi

hidrologis transisi menuju musim kemarau. Pada fase ini, penurunan debit sungai secara persisten akan mereduksi kapasitas pengenceran (*dilution capacity*) badan air secara signifikan, sehingga sensitivitas kualitas air terhadap akumulasi tekanan beban pencemar menjadi jauh lebih nyata dan terukur (van Vliet *et al.*, 2023). Analisis laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Air, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin, sedangkan pengolahan data dan pemodelan dilakukan di Laboratorium Teknik Tanah dan Air, Universitas Hasanuddin pada periode April–September 2024.



Gambar 10. Lokasi Penelitian

3.3.2. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan penelitian ini dikelompokkan menjadi data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran lapangan dan analisis laboratorium, sedangkan data sekunder digunakan untuk mendukung konfigurasi model, penetapan kondisi batas, dan interpretasi hasil simulasi.

Data primer diperoleh melalui pengambilan sampel *synoptic* pada April 2024. Parameter kualitas air yang dianalisis meliputi suhu, pH, oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*, DO), *fast carbonaceous biochemical oxygen demand* (CBOD_f), *chemical oxygen demand* (COD), *Inorganic Suspended Solids* (ISS), amonium (NH_4^+), nitrat (NO_3^-), dan fosfat anorganik (PO_4^{3-}). Pengukuran parameter in situ, yaitu DO, pH, dan suhu, dilakukan menggunakan *Water Quality Checker Multiparameter*, sedangkan analisis parameter lainnya dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin dengan mengacu pada *American Public Health Association (APHA) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Lipps *et al.*, 2023). Satuan konsentrasi disajikan dalam mg/L untuk parameter DO, CBOD_f, COD, dan ISS, sedangkan nutrisi anorganik disajikan sebagai $\mu\text{gN/L}$ atau $\mu\text{gP/L}$ untuk menonjolkan rentang konsentrasi yang rendah. Konversi ke mg/L hanya

ditampilkan apabila diperlukan untuk interpretasi, perbandingan terhadap baku mutu, atau penyederhanaan narasi tanpa mengubah basis kuantitatif analisis.

Data sekunder digunakan untuk membangun konfigurasi hidrolika, kondisi batas model, dan parameter lingkungan pendukung. Data tersebut meliputi:

1. **Data hidrologi**, berupa debit aliran sungai harian (Q) yang diperoleh dari output simulasi model SWAT pada Bab II yang telah terkalibrasi dan tervalidasi terhadap data observasi Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pompengan–Jeneberang. Penggunaan *output* SWAT dimaksudkan untuk menjaga konsistensi neraca air dan massa antara analisis kuantitas air pada Bab II dan analisis kualitas air pada Bab III.
2. **Data iklim**, yang meliputi suhu udara, radiasi matahari, kecepatan angin, dan kelembapan relatif harian bulan April 2024 yang diperoleh dari basis data NASA POWER (NASA LaRC, 2024). Data ini digunakan sebagai input untuk koreksi laju reaksi biokimia dan perhitungan neraca panas (*heat balance*) sungai, sehingga kondisi meteorologis model konsisten dengan waktu pengambilan sampel *synoptic*.
3. **Data geometri dan fisik sungai**, berupa panjang ruas, segmentasi alur, kemiringan, elevasi, dan bentuk penampang. Panjang ruas dan segmentasi ditentukan melalui interpretasi citra satelit *Sentinel-2A* tahun 2024, sedangkan data kemiringan dan elevasi diekstraksi dari DEM FABDEM v1.2 resolusi 30 m yang memiliki akurasi vertikal lebih baik dalam merepresentasikan topografi permukaan tanah dibandingkan DEM standar (Hawker *et al.*, 2022). Bentuk penampang sungai ditetapkan berdasarkan pengukuran *cross-section* lapangan yang disesuaikan dengan kondisi penampang alami yang dominan, yaitu trapesium dan parabolik.
4. **Data lingkungan**, berupa peta penggunaan/penutupan lahan (*Land Use/Land Cover*, LULC) hasil analisis pada Bab II, yang digunakan untuk mengidentifikasi distribusi potensi beban pencemar difus (*non-point source*) di sepanjang koridor sungai.
5. **Data pendukung**, meliputi Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1:50.000 dan peta batas DAS yang digunakan untuk validasi tubuh air dan jaringan aliran sungai.

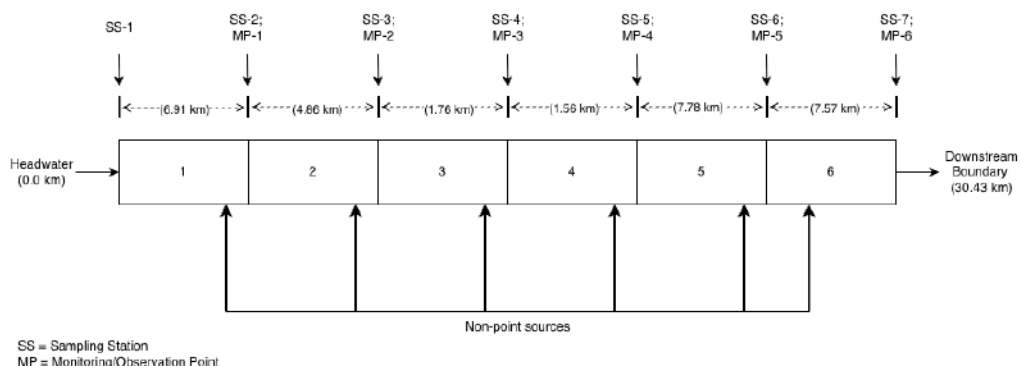
Alat yang digunakan dalam simulasi kualitas air adalah perangkat lunak QUAL2Kw v5.1 yang dijalankan pada antarmuka *Microsoft Excel*. Peralatan pendukung lainnya meliputi *Global Positioning System* (GPS) untuk penentuan koordinat titik sampling, ArcGIS v10.3 untuk analisis spasial dan segmentasi sungai, serta *Microsoft Office* untuk pengolahan data statistik dan penyajian grafik.

3.3.3. Tahapan Penelitian dan Kerangka Analisis

Penelitian ini dirancang dengan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan deterministik spasial–longitudinal. Kerangka analisis dibangun untuk merekonstruksi profil kualitas air sepanjang alur utama (*main stream*) Sungai Bila guna mendeteksi gradien degradasi fisik dan kimia akibat beban pencemar difus (*non-point source*). Integrasi data dilakukan melalui tiga komponen utama, yaitu pengukuran *synoptic* lapangan, analisis laboratorium, dan simulasi numerik menggunakan model QUAL2Kw.

Secara konseptual, desain penelitian diawali dengan diskretisasi atau segmentasi ruas sungai sepanjang $\pm 30,43$ km yang merepresentasikan segmen hulu hingga hilir. Ruas tersebut dibagi menjadi enam segmen hidrolika (*reach*) berdasarkan homogenitas kemiringan dasar dan morfologi penampang, dengan tujuh stasiun pengambilan sampel, yaitu SS-1 hingga SS-7, sebagai simpul verifikasi (Gambar 11).

Segmentasi ini bertujuan untuk menangkap variasi longitudinal kualitas air yang merespons perubahan penggunaan/tutupan lahan, masukan beban dari anak sungai, dan perubahan karakter hidraulika sepanjang alur. Sehubungan dengan tidak teridentifikasinya sumber pencemar titik (*point source*) di lokasi penelitian, dinamika kualitas air diasumsikan terutama dikendalikan oleh beban lateral difus yang berasal dari aktivitas pertanian dan permukiman.



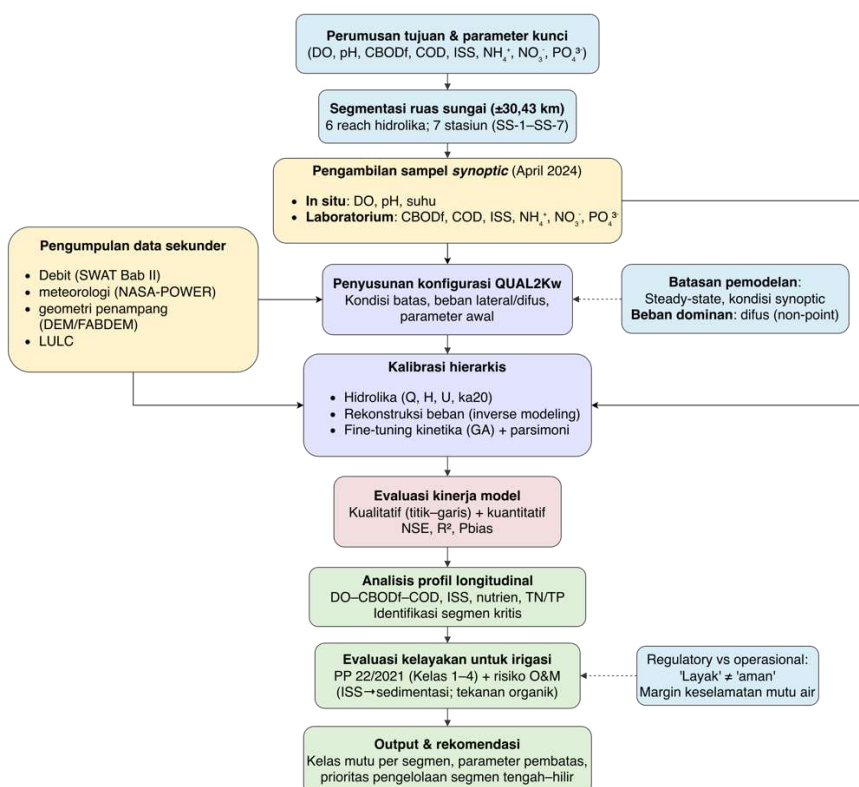
Gambar 11. Segmentasi sungai, titik monitoring dan sampling

Strategi pengambilan data primer dilakukan melalui metode *synoptic sampling*, yaitu pengambilan sampel pada banyak lokasi dalam periode waktu yang singkat (Kaushal *et al.*, 2023), pada bulan April 2024. Pemilihan waktu ini didasarkan pada dua pertimbangan utama. Pertama, periode tersebut merepresentasikan fase penurunan debit (*recession limb*) ketika kapasitas asimilasi sungai mulai melemah (van Vliet *et al.*, 2023). Kedua, periode tersebut bertepatan dengan awal Musim Tanam II (Gadu), ketika kebutuhan air irigasi relatif tinggi, sehingga evaluasi kualitas air pada saat tersebut memiliki relevansi manajerial yang besar. Pengambilan sampel dilakukan secara *triplo* ($n = 3$), dan nilai parameter kualitas air yang digunakan dalam analisis ditetapkan sebagai nilai rata-rata dari tiga pengukuran tersebut.

Parameter kunci yang dianalisis mencakup indikator organik, nutrisi, dan fisik, yaitu DO, pH, CBOD_f, COD, NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , dan ISS. Sementara itu, parameter agregat seperti total nitrogen (TN) dan total fosfor (TP) dievaluasi sebagai variabel keluaran (*derived output*) model yang dihasilkan melalui simulasi transformasi nutrisi secara mekanistik.

Tahapan simulasi dilaksanakan menggunakan model QUAL2Kw dengan pendekatan aliran tunak (*steady-state*). Pendekatan ini dipilih karena penelitian diarahkan untuk merekonstruksi profil longitudinal kualitas air Sungai Bila pada kondisi *synoptic* bulan April 2024, sehingga kondisi hidraulika diasumsikan tunak untuk mewakili keadaan aliran pada saat pengamatan. Sementara itu, komponen neraca panas dan laju reaksi kualitas air tetap dihitung menggunakan data meteorologi harian April 2024 yang sesuai dengan periode sampling. Dengan demikian, model digunakan untuk menggambarkan variasi longitudinal kualitas air pada kondisi pengamatan yang representatif, bukan untuk mensimulasikan perubahan kualitas air antar-musim atau antar-kejadian sepanjang tahun.

Keunggulan metodologis penelitian ini terletak pada integrasi antarmodel, di mana input debit hidrologi (Q) diambil dari *output* model SWAT pada Bab II untuk menjamin konsistensi neraca air DAS. Proses pemodelan dilakukan melalui iterasi kalibrasi parameter kinetika dan koefisien reaksi agar hasil simulasi merepresentasikan kondisi lapangan secara memadai, sedangkan evaluasi kinerja model dilakukan untuk memastikan keandalan representasi proses fisik dan biokimia di sepanjang alur sungai menggunakan indikator statistik NSE , R^2 , dan P_{bias} .



Gambar 12. Tahapan penelitian analisis kualitas air sungai sub-DAS Bila

Analisis data dilaksanakan melalui tiga tahapan yang saling berkesinambungan (Gambar 12). Tahap pertama difokuskan pada evaluasi kinerja model untuk memastikan bahwa profil hasil simulasi mampu merepresentasikan fenomena lapangan secara memadai. Tahap kedua diarahkan pada analisis profil longitudinal untuk memetakan zona degradasi di sepanjang alur sungai, sehingga dapat diidentifikasi segmen-segmen yang mengalami tekanan beban organik maupun akumulasi sedimen. Tahap ketiga adalah evaluasi kelayakan irigasi, yang tidak hanya menilai kesesuaian mutu air hasil simulasi terhadap baku mutu nasional sesuai PP 22/2021, tetapi juga mengevaluasi risiko fisik terhadap keberlanjutan infrastruktur irigasi. Kerangka analisis ini memungkinkan diagnosis yang lebih komprehensif, karena tidak hanya menyajikan kondisi kualitas air secara deskriptif, tetapi juga menjelaskan proses dominan yang

mengendalikan perubahan mutu air Sungai Bila dalam konteks pemanfaatannya untuk mendukung ketahanan pangan.

3.3.4. Analisis Data

3.3.4.1. Pemodelan Konsentrasi Parameter Kualitas Air

Simulasi profil kualitas air dilakukan menggunakan model numerik QUAL2Kw. Model ini dipilih karena dirancang khusus untuk mensimulasikan transportasi dan transformasi konstituen kualitas air pada sistem sungai satu-dimensi secara longitudinal dalam kondisi aliran tunak (*steady-state*) (Kannel *et al.*, 2007; Patel & Jariwala, 2024; Pelletier *et al.*, 2006). Kerangka komputasi QUAL2Kw menyelesaikan persamaan adveksi–dispersi menggunakan metode beda hingga (*finite difference method*), sehingga memadai untuk merekonstruksi profil beban pencemar pada sistem sungai yang didominasi oleh sumber difus (*non-point source*) (Ghorbani *et al.*, 2022; Hendrasarie & Swandika, 2020; Hobson *et al.*, 2014), seperti pada Sub-DAS Bila. Dalam penelitian ini, pendekatan *steady-state* digunakan untuk merepresentasikan kondisi *synoptic* April 2024, sedangkan komponen neraca panas dan koreksi temperatur terhadap laju reaksi tetap menggunakan data meteorologi harian pada periode yang sama. Dengan demikian, hasil model harus dibaca sebagai rekonstruksi longitudinal pada kondisi pengamatan April 2024, bukan sebagai representasi dinamika kualitas air tahunan penuh.

Secara matematis, struktur model dibangun berdasarkan integrasi tiga neraca keseimbangan utama pada setiap segmen (*reach*) sungai berdasarkan Kannel *et al.* (2007) dan Pelletier *et al.* (2006), yaitu sebagai berikut:

- a) **Neraca Debit (*Flow Balance*)**. QUAL2Kw mengasumsikan pencampuran sempurna (*completely mixed*) di setiap segmen hidrolika. Debit pada segmen hilir (Q_i) dihitung sebagai fungsi dari debit hulu, masukan debit lateral (*point/non-point*), dan pengambilan air (*abstraction*), yang dinyatakan dalam persamaan:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i}$$

dengan Q_i adalah debit yang keluar dari segmen i (m^3/s); Q_{i-1} adalah debit yang masuk dari segmen hulu ($i-1$) (m^3/s); $Q_{in,i}$ adalah debit masukan lateral (sumber difus/anak sungai) pada segmen i (m^3/s); $Q_{ab,i}$ adalah debit abstraksi/pengambilan air dari segmen i (m^3/s).

- b) **Neraca Panas (*Heat Balance*)**. Simulasi suhu air dalam penelitian ini digunakan untuk mengendalikan laju reaksi biokimia dan saturasi oksigen. Suhu air diselesaikan dengan persamaan keseimbangan panas yang memasukkan adveksi suhu oleh aliran, abstraksi, dispersi longitudinal, pertukaran panas dengan atmosfer dan sedimen, serta panas yang masuk dari sumber lateral, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{dt} = & \frac{Q_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \\ & + \frac{J_{h,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \end{aligned}$$

di mana T_i merupakan suhu air pada segmen I ($^{\circ}\text{C}$), t adalah waktu (hari), V_i adalah volume segmen (m^3), E'_i adalah koefisien difusi volumetrik antar-segmen (m^3/hari), $W_{h,i}$ adalah masukan panas dari sumber (cal/hari), ρ_w adalah densitas air (g/cm^3), C_{pw} adalah kalor jenis air, $J_{h,i}$ adalah fluks panas air–udara ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{hari}$), $J_{s,i}$ adalah fluks panas air–sedimen ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{hari}$), H_i adalah kedalaman rerata (m).

- c) **Neraca Massa Konstituen (Mass Balance).** Untuk setiap konstituen/parameter kualitas air, model QUAL2Kw menyelesaikan persamaan adveksi-dispersi satu dimensi yang ditambah dengan suku pembebanan eksternal dan transformasi reaksi internal, sebagai berikut:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} C_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} C_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (C_{i-1} - C_i) + \frac{E'_i}{V_i} (C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i$$

di mana C_i adalah Konsentrasi konstituen di segmen i (mg/L), E'_i adalah Koefisien dispersi longitudinal (m^3/hari), W_i adalah Beban pencemar eksternal yang masuk ke segmen i (g/hari), S_i adalah Suku sumber atau serapan internal akibat reaksi biokimia atau proses fisik ($\text{mg}/\text{L}/\text{hari}$).

Agar sistem persamaan tersebut dapat diselesaikan, struktur input model disusun berdasarkan skema diskretisasi sungai yang membagi ruas menjadi segmen-segmen (*reaches*) dengan jarak tertentu dari batas hulu ke hilir (Kannel *et al.*, 2007; Pelletier *et al.*, 2006). Penetapan kondisi batas hidrolika, khususnya debit hulu dan debit antarsegmen, ditentukan berdasarkan hasil simulasi SWAT pada Bab II yang telah terkalibrasi guna menjamin konsistensi neraca air DAS. Sementara itu, kondisi batas kualitas air dan konsentrasi awal di segmen hulu ditetapkan secara empiris berdasarkan hasil pengukuran lapangan dan laboratorium.

Untuk penyelesaian persamaan neraca panas dan penyesuaian laju reaksi berbasis temperatur, model memanfaatkan data meteorologi harian bulan April 2024, yang meliputi suhu udara, radiasi matahari, kecepatan angin, dan kelembapan relatif, yang bersumber dari basis data NASA POWER. Penggunaan data meteorologi pada periode ini dimaksudkan agar konfigurasi neraca panas dan transformasi biogeokimia dalam model tetap konsisten dengan kondisi *synoptic* saat pengambilan sampel kualitas air.

Berdasarkan karakteristik wilayah studi yang tidak memiliki sumber pencemar titik, seluruh masukan antropogenik direpresentasikan sebagai beban lateral atau beban difus yang secara matematis masuk sebagai variabel W_i . Estimasi beban ini dilakukan melalui pendekatan *inverse modeling* atau neraca massa iteratif (Chrapkiewicz *et al.*, 2024; Jun *et al.*, 2007), di mana nilai beban masukan disesuaikan secara bertahap hingga profil konsentrasi hasil simulasi menunjukkan kesesuaian yang memadai dengan data observasi pada titik-titik pemantauan.

Secara operasional, simulasi dijalankan pada kerangka kerja (*framework*) yang mengintegrasikan antarmuka grafis berbasis *Microsoft Excel* dengan mesin komputasi numerik (*numerical engine*). Proses perhitungan persamaan diferensial dieksekusi oleh modul eksternal berbasis *Fortran* untuk efisiensi komputasi, yang dikendalikan melalui makro VBA (*Visual Basic for Applications*). Hasil simulasi disajikan dalam dua format keluaran (*output*) utama, yaitu data tabular yang menyajikan nilai numerik parameter pada setiap segmen hidrolika untuk keperluan verifikasi statistik, dan grafik spasial (*spatial charts*) yang memvisualisasikan profil longitudinal parameter dari hulu ke hilir secara kontinu untuk mendeteksi tren gradien degradasi dan lokasi titik kritis di sepanjang alur sungai.

3.3.4.2. Kalibrasi dan Evaluasi Kinerja Model

Kalibrasi model dilaksanakan secara hierarkis untuk memastikan bahwa simulasi QUAL2Kw mampu merepresentasikan profil longitudinal kualitas air Sub-DAS Bila dengan tingkat akurasi yang memadai. Fokus evaluasi diarahkan pada parameter terukur, yaitu DO, pH, CBOD_f, COD, ISS, NH_4^+ , NO_3^- , dan PO_4^{3-} , serta pada variabel hidraulika seperti debit, kecepatan aliran, dan kedalaman yang berperan sebagai pengendali utama proses transport konstituen. Sehubungan dengan kompleksitas sistem sungai yang didominasi oleh sumber pencemar difus, strategi kalibrasi dilakukan secara bertahap untuk meminimalkan ketidakpastian (*uncertainty*) dan menghindari masalah *equifinality*, yaitu kondisi ketika kombinasi parameter yang berbeda menghasilkan keluaran model yang serupa. Tahapan kalibrasi disusun berdasarkan Chrapkiewicz *et al.* (2024), Ghorbani *et al.* (2022), Hendrasarie dan Swandika (2020), Hobson *et al.* (2014), Jun *et al.* (2007), Kannel *et al.* (2007), Kaushal *et al.* (2023), Patel dan Jariwala (2024), serta Pelletier *et al.* (2006), sebagai berikut:

- a) **Tahap 1: Kalibrasi Hidrolika (*Hydraulic Calibration*)**. Tahap ini merupakan prasyarat sebelum kalibrasi kualitas air. Kesesuaian debit, kecepatan aliran, dan kedalaman dievaluasi dengan membandingkan profil simulasi terhadap data observasi titik (*point measurements*). Akurasi hidrolika sangat krusial karena secara langsung mengendalikan proses adveksi–dispersi, waktu tempuh (*travel time*), dan laju reaerasi. Dalam model ini, koefisien reaerasi dihitung menggunakan formulasi *O'Connor–Dobbins*, sedangkan koreksi temperatur terhadap laju reaksi diterapkan menggunakan koefisien *Arrhenius*.
- b) **Tahap 2: Rekonstruksi Beban Lateral (*Load Reconstruction*)**. Estimasi beban eksternal (W_i) dilakukan melalui pendekatan *inverse modeling*. Beban difus pada setiap segmen disesuaikan secara iteratif hingga profil konsentrasi simulasi mendekati data observasi, terutama untuk konstituen konservatif dan organik utama seperti CBOD_f, COD, ISS, NH_4^+ , NO_3^- , dan PO_4^{3-} . Proses ini dihentikan ketika penyesuaian beban tidak lagi memberikan peningkatan signifikansi terhadap kesesuaian pola spasial. Pengaruh beban organik yang mengendap terhadap neraca oksigen disimulasikan melalui komponen detritus dan mekanisme sedimentasi–dekomposisi dasar.
- c) **Tahap 3: Parameterisasi Kinetika (*Kinetic Fine-tuning*)**. Setelah konfigurasi beban stabil, dilakukan *auto-calibration* menggunakan algoritma optimasi genetik (*Genetic*

Algorithm) bawaan QUAL2Kw untuk menyesuaikan parameter kinetika yang mengendalikan proses dominan, seperti oksidasi karbon, nitrifikasi, dan sedimentasi. Pada tahap ini, modul pertumbuhan alga dinonaktifkan. Keputusan ini didasarkan pada karakteristik hidrolika sungai yang memiliki waktu tinggal (*residence time*) relatif singkat akibat kecepatan arus yang cukup tinggi. Kondisi ini menyebabkan efek pembilasan alami (*washout*) yang menghambat pembentukan populasi biomassa alga (*fitoplankton*) secara signifikan, meskipun penetrasi cahaya matahari cukup memadai. Langkah ini juga mengikuti prinsip parsimoni (*parsimony principle*), yaitu menjaga model sesederhana mungkin dengan hanya mengkalibrasi parameter kunci untuk menghindari peningkatan ketidakpastian parameter yang tidak terukur (*over-fitting*). Parameter kinetika hasil kalibrasi yang digunakan dalam model disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter kinetika hasil auto-kalibrasi QUAL2Kw

Kategori Parameter	Deskripsi Parameter	Simbol	Nilai Hasil Kalibrasi	Satuan
Siklus Karbon (CBOD)	Laju oksidasi CBODf	kdc	4,5972	/hari
Siklus Nitrogen (NBOD)	Laju nitrifikasi amonium	kna	3,0482	/hari
	Hidrolisis nitrogen organik	khn	1,9862	/hari
	Laju denitrifikasi nitrat	kdn	0,8868	/hari
Detritus dan Sedimen	Laju pelarutan detritus	kdt	2,6771	/hari
	Kecepatan pengendapan detritus	vdt	1,2302	m/hari
	Kecepatan pengendapan padatan anorganik	vi	0,5898	m/hari

Evaluasi kinerja model dilakukan melalui dua pendekatan. Evaluasi kualitatif dilakukan melalui inspeksi visual terhadap kesesuaian tren profil longitudinal antara garis simulasi dan titik observasi (data lapangan). Evaluasi kuantitatif dilakukan menggunakan indikator statistik NSE , R^2 , dan P_{bias} untuk menilai akurasi prediksi. Formulasi matematis dan kriteria interpretasi indikator mengacu pada standar evaluasi model sebagaimana telah dijelaskan pada Bab II.

3.3.4.3. Analisis Kelayakan Kualitas Air untuk Irigasi

Analisis kelayakan dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian mutu air Sungai Bila sebagai sumber irigasi lahan sawah secara spasial. Evaluasi ini menggunakan pendekatan ganda (*dual-approach*), yaitu penilaian kepatuhan regulatif (*regulatory compliance*) terhadap baku mutu nasional dan penilaian risiko operasional terhadap infrastruktur irigasi. Acuan utama yang digunakan adalah Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PPRI, 2021). Merujuk pada peruntukan air sungai di wilayah kajian untuk kebutuhan irigasi pertanian, ambang batas Kelas 4 ditetapkan sebagai standar minimum kelayakan. Meskipun demikian, evaluasi juga disandingkan dengan Kelas 2 dan Kelas 3 guna mengukur batas keamanan (*margin of safety*) kualitas air.

Dalam proses evaluasi, diterapkan pendekatan substitusi parameter sebagai proksi konservatif secara hati-hati untuk kepentingan interpretasi operasional. Nilai *Inorganic Suspended Solids* (ISS) hasil simulasi digunakan sebagai proksi interpretatif terhadap *Total Suspended Solids* (TSS) untuk membaca implikasi fisik terhadap irigasi, terutama yang berkaitan dengan kekeruhan, potensi sedimentasi, dan pendangkalan saluran. Sementara itu, nilai *Fast Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand* (CBODf) digunakan sebagai proksi konservatif untuk merepresentasikan tekanan beban organik karbon yang relevan terhadap konsumsi oksigen terlarut (BOD). Penggunaan ISS dan CBODf dalam penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai substitusi formal dalam penetapan kelas mutu regulatif, melainkan sebagai alat bantu interpretasi operasional irigasi, khususnya pada segmen yang menunjukkan tren degradasi paling nyata. Daftar parameter kunci dan ambang batas yang digunakan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Baku Mutu Air Sungai untuk Prasarana/Sarana Rekreasi Air, Pembudidayaan Ikan Air Tawar, Peternakan, dan Mengairi Pertanian (PPRI, 2021)

Parameter	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4 (Irigasi)
Temperatur	°C	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Dev 3
TDS	mg/L	1.000	1.000	1.000	2.000
TSS	mg/L	40	50	100	400
pH	–	6–9	6–9	6–9	6–9
BOD	mg/L	2	3	6	12
COD	mg/L	10	25	40	80
DO (minimum)	mg/L	6	4	3	1
Nitrat (sebagai N)	mg/L	10	10	20	20
Amoniak (sebagai N)	mg/L	0,1	0,2	0,5	–
Total Fosfat (sebagai P)	mg/L	0,2	0,2	1,0	–

Catatan: “Dev 3” = deviasi maksimum 3°C terhadap suhu udara di atas permukaan air. TSS tidak berlaku untuk air gambut berdasarkan kondisi alaminya. DO merupakan batas minimum.

Secara prosedural, penilaian kelayakan dilakukan secara longitudinal mengikuti skema segmentasi model. Nilai konsentrasi parameter pada setiap segmen (*reach*) diekstraksi dari keluaran model QUAL2Kw untuk mendapatkan profil gradien kualitas air. Selanjutnya dilakukan analisis komparatif, di mana setiap parameter dibandingkan dengan ambang batas Kelas 4. Parameter dinyatakan “memenuhi” apabila nilainya berada di bawah ambang batas maksimum, atau di atas ambang minimum untuk DO.

Interpretasi hasil evaluasi selanjutnya dibedakan ke dalam dua dimensi risiko manajerial. Dimensi pertama adalah risiko fisiologis tanaman, yang mencakup evaluasi terhadap parameter kimia seperti pH, nutrisi, dan bahan organik untuk menilai relevansinya terhadap kesehatan tanaman dan kualitas tanah. Dimensi kedua adalah risiko fisik infrastruktur, yang difokuskan pada parameter padatan tersuspensi sebagai indikator potensi sedimentasi dan peningkatan beban operasi dan pemeliharaan jaringan irigasi. Dengan pendekatan ini, evaluasi kelayakan air tidak hanya berhenti pada status “memenuhi” atau “tidak memenuhi” baku mutu, tetapi juga mencakup pembacaan terhadap implikasi operasional air irigasi di lapangan.

3.4. Hasil dan Pembahasan

3.4.1. Kondisi Hidraulika dan Konsistensi Model (Debit, Kedalaman, Kecepatan, dan Reaerasi)

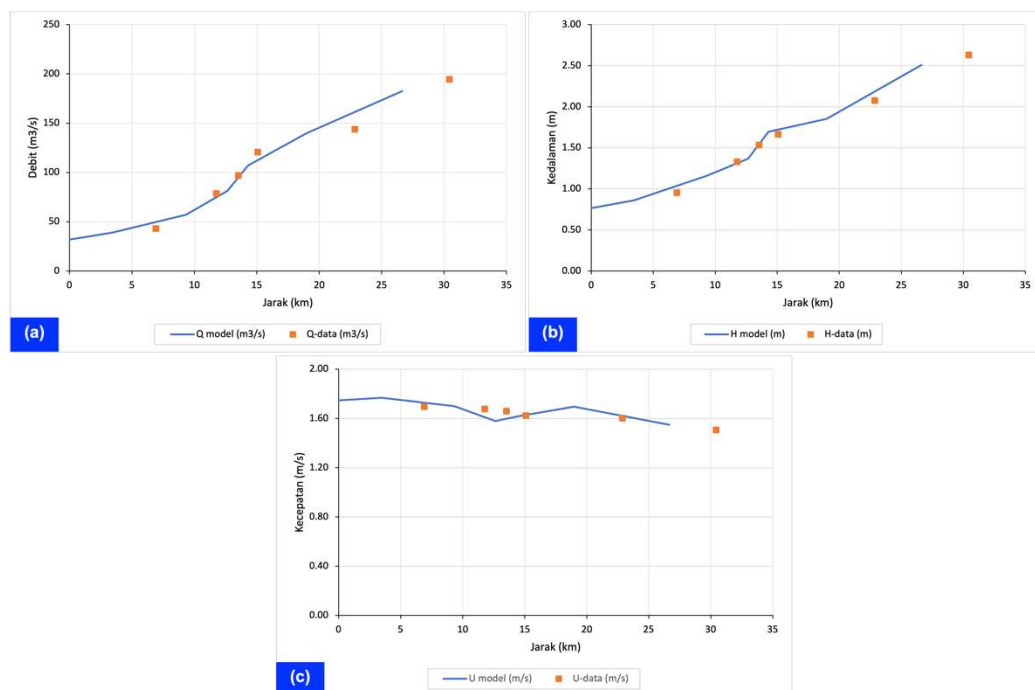
Evaluasi hidraulika dilakukan sebagai dasar interpretasi kualitas air karena debit (Q), kedalaman (H), kecepatan aliran (U), dan parameter geometri penampang mengendalikan proses transport (adveksi–dispersi), waktu tinggal (*travel time*), serta pertukaran oksigen (reaerasi) di dalam QUAL2Kw. Keluaran QUAL2Kw menunjukkan bahwa debit meningkat secara bertahap dari hulu ke hilir, dari 31,80 m³/s (*headwater*) menjadi 182,71 m³/s (*downstream river*), yang mencerminkan akumulasi aliran sepanjang ruas sungai akibat kontribusi *inflow* lateral atau anak sungai dan penggabungan aliran antarsegmen (Tabel 7). Sejalan dengan peningkatan debit, kedalaman meningkat dari 0,77 m menjadi 2,51 m, dan luas penampang basah (A_c) meningkat dari 18,20 m² menjadi 117,90 m², yang menunjukkan pembesaran kapasitas aliran menuju hilir. Sementara itu, kecepatan aliran relatif stabil pada kisaran 1,55–1,77 m/s, yang mengindikasikan bahwa peningkatan debit terutama diakomodasi oleh pembesaran penampang aliran (kedalaman dan lebar), bukan oleh percepatan aliran. Dari aspek transport, waktu tempuh (*travel time*) meningkat dari 0,00 hari di batas hulu menjadi 0,21 hari di hilir. Peningkatan *travel time* ini konsisten dengan bertambahnya panjang lintasan aliran dan perubahan geometri sungai, serta relevan untuk penafsiran transformasi biogeokimia karena waktu tinggal menentukan peluang berlangsungnya reaksi, seperti oksidasi karbon dan transformasi nitrogen di sepanjang alur (Repasch *et al.*, 2021).

Tabel 7. Keluaran hidraulika dan reaerasi QUAL2Kw per segmen

Segmen	Jarak dari hulu (km)	Q (m ³ /s)	E' (m ³ /hari)	H (m)	B (m)	Ac (m ²)	U (m/s)	Travel time (hari)	Slope	ka20 (hari ⁻¹)
Headwater	0,00	31,80	15,90	0,77	23,78	18,20	1,75	0,00	0,007582	–
Segmen 1	3,45	38,95	22,87	0,86	25,57	22,02	1,77	0,05	0,006658	11,40
Segmen 2	9,33	57,14	41,93	1,16	28,97	33,61	1,70	0,08	0,004203	6,67
Segmen 3	12,64	81,37	43,20	1,37	37,65	51,53	1,58	0,09	0,002883	4,70
Segmen 4	14,30	107,13	17,86	1,70	39,10	66,36	1,61	0,10	0,002301	3,35
Segmen 5	18,97	139,87	70,90	1,85	44,51	82,52	1,69	0,16	0,002245	3,04
Downstream River	30,43	182,71	91,35	2,51	46,97	117,90	1,55	0,21	0,001290	1,68

Kemiringan dasar (*slope*) menunjukkan kecenderungan menurun dari 0,007582 di bagian hulu menjadi 0,001290 di hilir. Pola ini berimplikasi langsung terhadap reaerasi. Koefisien reaerasi pada 20°C (ka_{20}) yang dihitung model, dengan nilai tersedia mulai dari Segmen 1, menurun dari 11,40 hari⁻¹ menjadi 1,68 hari⁻¹ di hilir. Penurunan ka_{20} secara fisik konsisten dengan bertambahnya kedalaman dan melemahnya intensitas turbulensi pada segmen yang lebih landai, sehingga laju pertukaran oksigen atmosfer–

air cenderung lebih kecil di hilir (Arora & Keshari, 2022). Dengan demikian, struktur hidraulika yang semakin dalam dan landai menuju hilir berpotensi meningkatkan sensitivitas DO terhadap beban organik dan nutrisi pada segmen bawah, karena penambahan beban yang bersifat *oxygen-demanding* lebih mudah memicu penurunan DO ketika kapasitas reaerasi relatif lebih rendah (Carter *et al.*, 2021).



Gambar 13. Perbandingan profil longitudinal Q , H , dan U antara observasi (titik) dan simulasi (garis)

Verifikasi terhadap data lapangan dilakukan pada titik monitoring. Perbandingan profil simulasi (garis) dan observasi (titik) pada debit, kedalaman, dan kecepatan menunjukkan bahwa model mampu menangkap tren longitudinal debit dan kedalaman dengan baik, sedangkan kecepatan masih menunjukkan deviasi yang lebih besar meskipun tetap berada pada kisaran yang sama (Gambar 13). Ringkasan indikator kesesuaian hidraulika (NSE , R^2 , dan P_{bias}) ditampilkan pada Tabel 8 sebagai verifikasi prasyarat, sedangkan evaluasi kuantitatif konstituen kualitas air disajikan pada subbab berikutnya.

Tabel 8. Kinerja hidraulika QUAL2Kw (observasi = titik; simulasi = garis)

Variabel	NSE	R^2	P_{bias} (%)
Debit (Q)	0,96	0,98	2,94
Kedalaman (H)	0,96	0,99	4,47
Kecepatan (U)	0,56	0,72	-1,03

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi hidraulika QUAL2Kw pada ruas Sub-DAS Bila cukup konsisten untuk digunakan sebagai dasar

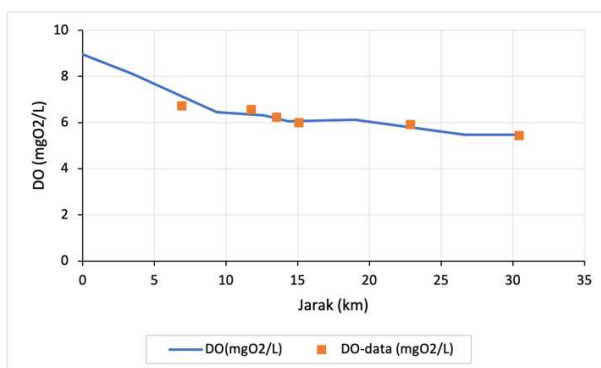
simulasi kualitas air, terutama karena debit dan kedalaman, yang dominan mengendalikan transport dan waktu tinggal, menunjukkan kesesuaian yang tinggi. Meskipun kinerja simulasi kecepatan relatif lebih rendah dibanding dua variabel lainnya, nilainya masih berada pada kisaran yang memadai untuk mendukung interpretasi gradien longitudinal kualitas air yang dihasilkan model.

3.4.2. Hasil Simulasi Kualitas Air dan Kinerja Model QUAL2Kw (Profil Longitudinal, Kalibrasi, dan Evaluasi)

Hasil simulasi QUAL2Kw disajikan sebagai profil longitudinal (garis) dari hulu (0,00 km) hingga batas hilir (30,43 km) dan dibandingkan dengan hasil pengukuran pada titik monitoring (titik) untuk menilai konsistensi pola spasial serta besaran konsentrasi. Karena konfigurasi model merepresentasikan kondisi *synoptic* April 2024 dengan pendekatan *steady-state*, profil yang dihasilkan harus dibaca sebagai potret longitudinal pada saat pengamatan tersebut, bukan sebagai dinamika kualitas air tahunan penuh. Pembahasan difokuskan pada parameter terukur, yaitu DO, CBOD_f, ISS, NH₄⁺, NO₃⁻, dan PO₄³⁻, yang merepresentasikan tekanan organik–oksigen, padatan tersuspensi, serta nutrisi anorganik yang relevan bagi pemanfaatan air irigasi. Interpretasi tren juga dikaitkan dengan kondisi hidraulika dan reaerasi pada Subbab 3.4.1, khususnya karena koefisien reaerasi (*ka*₂₀) cenderung menurun ke arah hilir sehingga segmen bawah menjadi lebih sensitif terhadap peningkatan beban organik.

3.4.2.1. Dinamika oksigen terlarut dan tekanan organik (DO, CBOD_f, dan COD)

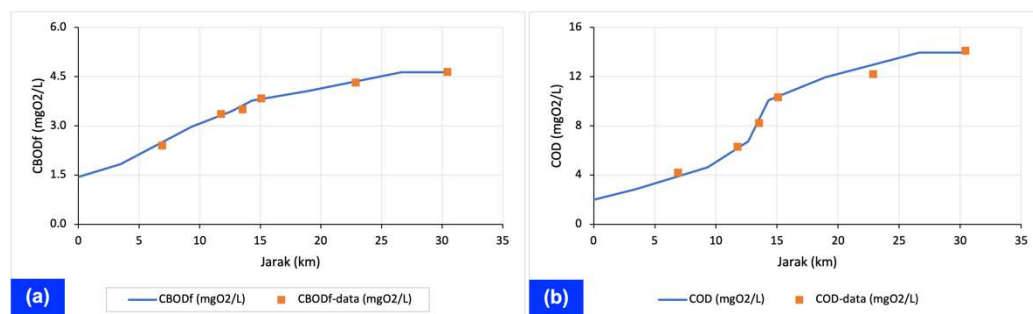
Profil DO hasil simulasi menunjukkan penurunan yang konsisten dari hulu ke hilir, dari 8,96 mg/L pada 0,00 km menjadi 5,48 mg/L pada ≥26,65–30,43 km. Pola observasi memperlihatkan tren penurunan yang searah, dari 6,72 mg/L pada 6,91 km menjadi 5,44 mg/L pada 30,43 km (Gambar 14). Dengan demikian, baik simulasi maupun observasi menegaskan adanya gradien longitudinal penurunan DO menuju hilir. Secara proses, penurunan ini konsisten dengan melemahnya kapasitas pemulihan oksigen dari atmosfer pada segmen hilir seiring menurunnya koefisien reaerasi (*ka*₂₀), serta meningkatnya waktu tempuh seiring bertambahnya panjang lintasan aliran, yang memperbesar peluang berlangsungnya reaksi biogeokimia pengonsumsi oksigen sepanjang alur (Carter *et al.*, 2021).



Gambar 14. Grafik perbandingan DO

Sejalan dengan penurunan DO, parameter organik menunjukkan peningkatan longitudinal yang kuat. Konsentrasi CBOD_f hasil simulasi meningkat dari 1,44 mg/L di hulu menjadi 4,64 mg/L di hilir, sedangkan hasil observasi meningkat dari 2,40 mg/L pada 6,91 km menjadi 4,64 mg/L pada 30,43 km (Gambar 15a). Parameter COD, yang diwakili sebagai *generic constituent* pada konfigurasi QUAL2Kw, juga meningkat tajam secara longitudinal. Hasil simulasi naik dari 2,00 mg/L di hulu menjadi 13,95 mg/L di hilir, sedangkan observasi meningkat dari 4,20 mg/L menjadi 14,10 mg/L (Gambar 15b). Kenaikan CBOD_f dan COD yang searah ini mengindikasikan adanya akumulasi tekanan organik ke arah hilir yang secara mekanistik berkontribusi pada konsumsi oksigen terlarut (*oxygen demand*), terutama melalui oksidasi karbon yang berlangsung sepanjang alur (Aguilar-Torrejón *et al.*, 2023).

Secara spasial, perubahan paling jelas menuju kondisi hilir tampak setelah sekitar 18,97 km (Segmen 5–hilir), ketika DO simulasi turun dari 6,12 menjadi 5,48 mg/L, sementara CBOD_f meningkat dari 4,06 menjadi 4,64 mg/L dan COD meningkat dari 11,96 menjadi 13,95 mg/L. Pola ini memperkuat interpretasi bahwa segmen hilir merupakan bagian sungai yang lebih sensitif terhadap defisit DO karena kombinasi tekanan organik yang lebih tinggi dan kapasitas reaerasi yang lebih rendah.



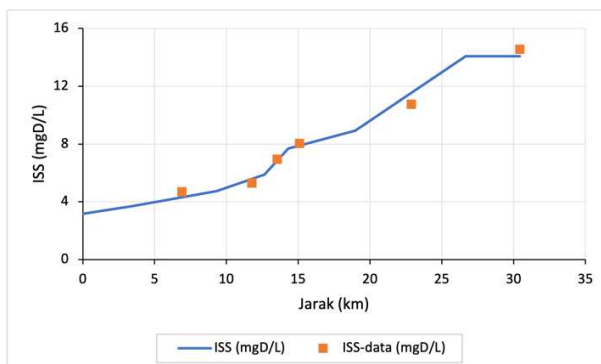
Gambar 15. Grafik perbandingan a. BOD_f; b. COD

3.4.2.2. Padatan tersuspensi (ISS) dan implikasi fisik

Parameter padatan tersuspensi menunjukkan kenaikan dari hulu ke hilir. Hasil simulasi ISS meningkat dari 3,18 mg/L di hulu menjadi 14,08 mg/L di hilir, sedangkan observasi meningkat dari 4,70 mg/L pada 6,91 km menjadi 14,55 mg/L pada 30,43 km (Gambar 16). Kenaikan ISS yang kuat ini mengindikasikan bahwa segmen hilir menerima kontribusi padatan tersuspensi yang lebih besar, yang berasal dari kombinasi masukan sedimen difus seperti erosi permukaan, erosi tebing, limpasan lahan, dan pengangkutan material tersuspensi dari segmen hulu ke hilir (Gong *et al.*, 2025).

Dari perspektif pengelolaan irigasi, peningkatan ISS menuju hilir merupakan indikator kritis karena dapat berimplikasi pada kekeruhan dan potensi pendangkalan saluran (sedimentasi), sehingga segmen dengan ISS tinggi layak dipertimbangkan sebagai prioritas pengendalian sedimen (Thapa *et al.*, 2024). Selain itu, kenaikan ISS menunjukkan adanya peningkatan beban padatan yang relatif kuat di bagian bawah ruas sungai. Temuan ini penting karena padatan tersuspensi tidak hanya berdampak secara fisik melalui sedimentasi, tetapi juga dapat berperan sebagai media pengangkut polutan terikat partikel dan memengaruhi dinamika oksigen melalui peningkatan konsumsi

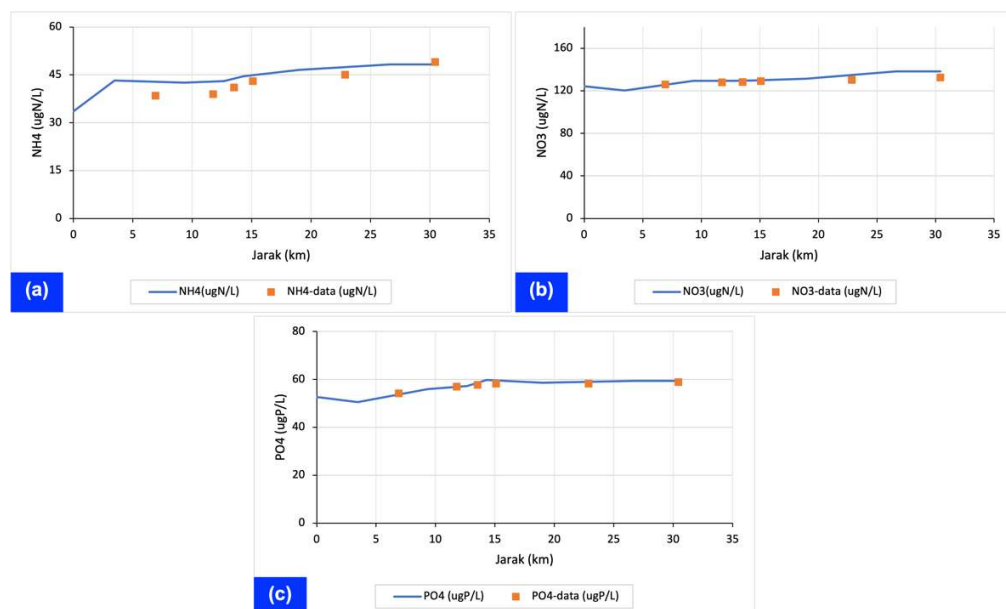
oksigen tidak langsung, misalnya melalui partikel organik halus atau komponen detritus di dalam sistem (McCabe *et al.*, 2021).



Gambar 16. Grafik perbandingan ISS

3.4.2.3. Nutrien anorganik (NH_4^+ , NO_3^- , dan PO_4^{3-})

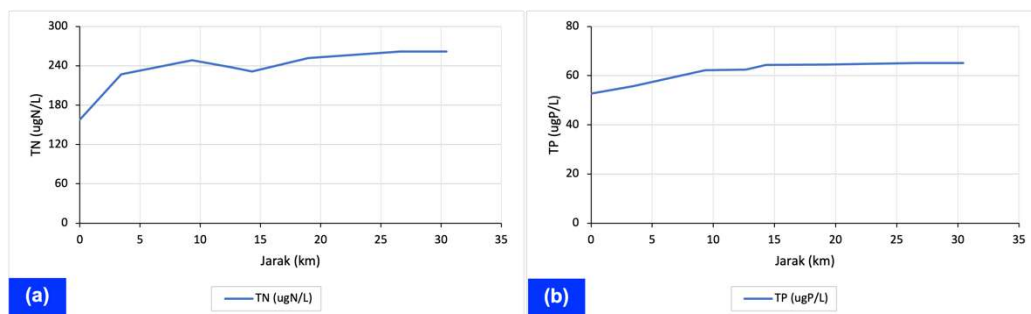
Konsentrasi NH_4^+ (sebagai N) hasil simulasi meningkat dari 33,50 $\mu\text{gN/L}$ di hulu menjadi 48,20 $\mu\text{gN/L}$ di hilir, sedangkan observasi meningkat dari 38,50 $\mu\text{gN/L}$ menjadi 49,00 $\mu\text{gN/L}$ (Gambar 17a). Peningkatan bertahap ini mengindikasikan adanya kontribusi beban nitrogen tereduksi yang makin terakumulasi ke arah hilir, meskipun magnitudonya tetap jauh lebih kecil dibanding dinamika organik. Konsentrasi NO_3^- (sebagai N) hasil simulasi meningkat dari 124,20 $\mu\text{gN/L}$ menjadi 138,20 $\mu\text{gN/L}$, sedangkan observasi meningkat dari 126,10 $\mu\text{gN/L}$ menjadi 132,70 $\mu\text{gN/L}$ (Gambar 17b). Kenaikan NO_3^- yang relatif moderat ini menunjukkan bahwa nitrogen anorganik berada pada kisaran yang relatif stabil, dengan kecenderungan sedikit meningkat menuju hilir.



Gambar 17. Grafik perbandingan a. NH_4^+ ; b. NO_3^- ; c. PO_4^{3-}

Konsentrasi PO_4^{3-} anorganik (sebagai P) hasil simulasi berada pada rentang nilai yang terbatas dan meningkat tipis dari 52,60 $\mu\text{gP/L}$ di hulu menjadi 59,30 $\mu\text{gP/L}$ di hilir. Data observasi juga menunjukkan tren nilai yang serupa, yaitu berkisar antara 54,30 $\mu\text{gP/L}$ hingga 58,90 $\mu\text{gP/L}$ (Gambar 17c). Secara umum, pola ini mengindikasikan bahwa fosfat anorganik berada dalam kondisi relatif stabil di sepanjang ruas sungai dengan peningkatan marginal ke arah hilir. Sintesis terhadap dinamika nutrien ini menegaskan bahwa perubahan hara anorganik yang relatif kecil pada skala puluhan hingga ratusan $\mu\text{g/L}$, jika dibandingkan dengan peningkatan masif CBOD_f, COD, dan ISS, menunjukkan bahwa karakteristik gradien kualitas air pada ruas penelitian lebih dominan dipengaruhi oleh tekanan organik dan padatan tersuspensi. Sementara itu, dinamika nitrogen dan fosfor anorganik hanya berperan sebagai komponen penunjang dalam penilaian status kualitas air serta implikasinya bagi pemanfaatan irigasi (Mamun *et al.*, 2022).

Profil longitudinal menunjukkan bahwa TN meningkat dari 157,65 $\mu\text{g/L}$ (0,158 mg/L) di hulu menjadi 261,82 $\mu\text{g/L}$ (0,262 mg/L) di hilir, dengan peningkatan paling nyata pada segmen awal hingga menengah (0,00–9,33 km), kemudian berfluktuasi ringan sebelum kembali meningkat menuju hilir (Gambar 18a). TP juga meningkat dari 52,65 $\mu\text{g/L}$ (0,053 mg/L) menjadi 65,15 $\mu\text{g/L}$ (0,065 mg/L) secara bertahap hingga segmen hilir (Gambar 18b). Kenaikan TN dan TP ini konsisten dengan pola peningkatan nutrien anorganik (NH_4^+ , NO_3^- , dan PO_4^{3-}) yang relatif moderat, serta menunjukkan adanya akumulasi beban nutrien secara longitudinal meskipun besarnya tetap berada pada skala rendah (sub-mg/L). Dengan demikian, TN dan TP berfungsi sebagai indikator sintesis untuk mendukung pembahasan mutu air irigasi, khususnya dalam mengidentifikasi segmen hilir sebagai bagian sungai yang relatif lebih sensitif terhadap akumulasi tekanan kualitas air.



Gambar 18. Grafik a. TN; b. TP

3.4.2.4. Evaluasi kinerja model (NSE , R^2 , dan P_{bias})

Kinerja model dievaluasi secara kuantitatif menggunakan NSE , R^2 , dan P_{bias} berdasarkan pasangan data observasi (titik) dan simulasi (garis) pada lokasi monitoring. Hasil evaluasi kinerja model yang ditunjukkan pada Tabel 9 menunjukkan bahwa model secara umum mampu merepresentasikan pola longitudinal dan besaran konsentrasi dengan baik, terutama untuk konstituen dominan yang mengendalikan neraca oksigen dan padatan tersuspensi.

Tabel 9. Indikator kinerja model kualitas air QUAL2Kw

Parameter	NSE	R ²	<i>P_{bias}</i> (%)
DO	0,77	0,85	-0,30
CBODf	0,99	0,99	-0,72
ISS	0,98	0,98	0,37
NH ₄ ⁺	0,35	0,94	-5,67
NO ₃ ⁻	0,45	0,97	-0,65
Inorg-P	0,75	0,97	-0,79
Rata-rata	0,71	0,95	-1,29

Nilai R^2 yang tinggi (0,85–0,99) menunjukkan bahwa variasi spasial atau tren longitudinal umumnya dapat ditangkap oleh model, sedangkan nilai P_{bias} yang kecil menunjukkan tidak adanya bias sistematis yang besar pada sebagian besar parameter. Kinerja terbaik diperoleh pada CBODf dan ISS ($NSE \geq 0,98$), yang konsisten dengan dominannya pengaruh beban difus organik dan padatan tersuspensi pada ruas penelitian. Sebaliknya, NSE yang lebih rendah pada NH_4^+ dan NO_3^- mengindikasikan bahwa meskipun tren dapat diikuti dengan baik (R^2 tinggi), besaran residu relatif kecil pada skala konsentrasi yang rendah sehingga lebih sensitif terhadap ketidakpastian pengukuran, variasi spasial mikro, serta keterbatasan representasi proses dan masukan difus pada kondisi data terbatas. Secara keseluruhan, kombinasi evaluasi kualitatif berupa kesesuaian titik–garis dan evaluasi kuantitatif menggunakan NSE , R^2 , P_{bias} menunjukkan bahwa konfigurasi QUAL2Kw yang digunakan cukup andal untuk mendukung analisis kualitas air Sub-DAS Bila dan menjadi dasar penilaian kelayakan mutu air untuk irigasi (Demir & Muratoglu, 2025; Moriasi *et al.*, 2015; Raeisi *et al.*, 2022).

3.4.3. Analisis Kelayakan Mutu Air untuk Irigasi (Acuan PP 22/2021)

Analisis kelayakan mutu air dilakukan untuk menilai kesesuaian kualitas air Sub-DAS Bila pada ruas Sungai Bila sebagai sumber irigasi lahan sawah. Penilaian dilakukan dengan membandingkan konsentrasi hasil simulasi QUAL2Kw pada setiap segmen terhadap Baku Mutu Air Sungai dan Sejenisnya sesuai PP Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI, yang mengklasifikasikan mutu air ke dalam Kelas 1 sampai Kelas 4 berdasarkan peruntukan. Dalam konteks pemanfaatan air untuk mengairi pertanian, Kelas 4 ditetapkan sebagai standar minimum kelayakan. Namun, untuk memperoleh gambaran *margin of safety*, hasil simulasi juga disandingkan dengan ambang Kelas 1 dan Kelas 2 pada parameter yang relevan. Karena tidak semua parameter baku mutu tersedia dalam bentuk variabel yang identik pada konfigurasi pengukuran dan model, dilakukan pendekatan substitusi parameter sebagai proksi konservatif (Noor *et al.*, 2025). Nilai ISS digunakan sebagai proksi interpretatif terhadap TSS untuk membaca implikasi fisik-operasional irigasi (Molner *et al.*, 2023). Sedangkan CBODf digunakan sebagai proksi konservatif untuk membaca tekanan beban organik karbon yang relevan terhadap konsumsi oksigen terlarut (Wardani & Mirwan, 2023). Pendekatan proksi ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan definisi parameter baku mutu secara formal dalam penetapan kelas mutu regulatif, melainkan untuk membantu menghubungkan keluaran model dengan implikasi pengelolaan, terutama pada segmen yang menunjukkan tren degradasi paling jelas.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pH stabil pada kisaran 7,21–7,38, sehingga berada dalam rentang baku mutu semua kelas (6–9) dan tidak menjadi faktor pembatas kelayakan. Dari sisi padatan, beban tersuspensi menunjukkan kenaikan longitudinal, dengan ISS meningkat dari 3,18 mg/L di hulu menjadi 14,08 mg/L di hilir. Secara regulatif, nilai ini masih jauh di bawah ambang TSS Kelas 1 (40 mg/L) maupun Kelas 4 (400 mg/L), sehingga tidak menjadi pembatas kelas mutu. Namun, secara operasional untuk irigasi, kenaikan ISS yang mencapai sekitar 4–5 kali lipat dari hulu ke hilir merupakan sinyal penting, karena pada saluran irigasi, khususnya saluran tersier, kecepatan aliran lebih rendah sehingga partikel anorganik lebih mudah mengendap secara akumulatif dan mempercepat kebutuhan pengerukan atau pembersihan saluran (Benavides-Muñoz, 2025).

Parameter organik dan oksigen menghasilkan temuan yang paling signifikan terkait dengan “batas aman” mutu air. Profil DO hasil simulasi menurun secara longitudinal dari 8,96 mg/L di hulu menjadi minimum 5,48 mg/L di hilir. Ditinjau dari aspek kepatuhan regulatif, nilai minimum ini masih memenuhi kriteria Kelas 2 (≥ 4 mg/L) dan jauh di atas batas Kelas 4 (≥ 1 mg/L), tetapi tidak lagi memenuhi kriteria Kelas 1 (≥ 6 mg/L) pada segmen hilir. Sejalan dengan itu, COD meningkat dari 2,00 mg/L menjadi 13,95 mg/L, sehingga tetap memenuhi Kelas 2 (≤ 25 mg/L) dan Kelas 4 (≤ 80 mg/L), namun melampaui ambang Kelas 1 (≤ 10 mg/L) pada segmen tengah–hilir (Tabel 10). Pola ini menunjukkan bahwa parameter pembatas pada ruas penelitian adalah DO minimum dan COD, yang mendorong pergeseran status dari setara Kelas 1 pada segmen hulu–tengah menjadi setara Kelas 2 pada segmen tengah–hilir. Dengan demikian, kelas mutu kasus terburuk (*worst-case*) untuk ruas kajian ditentukan berdasarkan parameter pembatas pada segmen terburuk, sehingga interpretasi kelas menekankan kondisi paling kritis yang berimplikasi langsung pada pengelolaan irigasi, bukan sekadar nilai rata-rata.

Secara proses, pergeseran tersebut selaras dengan dinamika sistem yang tercermin pada analisis hidraulika sebelumnya. Ke arah hilir, koefisien reaerasi (ka_{20}) menurun, yang secara fisik konsisten dengan kondisi aliran yang semakin dalam dan bergradien lebih landai, sehingga kapasitas pemulihan DO dari atmosfer cenderung melemah (Arora & Keshari, 2022). Pada saat yang sama, peningkatan COD dan CBOD_f merepresentasikan tekanan organik yang lebih besar dan berkorelasi dengan meningkatnya kebutuhan oksigen untuk oksidasi dan dekomposisi bahan organik (Aguilar-Torrejón *et al.*, 2023). Kombinasi meningkatnya *oxygen demand* dan melemahnya reaerasi menyebabkan segmen hilir memiliki *margin of safety* DO yang lebih tipis, sehingga lebih sensitif terhadap penambahan beban pencemar, terutama ketika debit rendah mengurangi kapasitas pengenceran dan memperpanjang waktu proses di dalam ruas sungai (Carter *et al.*, 2021).

Dari aspek nutrisi, konsentrasi nitrogen dan fosfor anorganik berada pada skala rendah. Nilai NO_3^- maksimum sekitar 0,138 mgN/L jauh di bawah ambang baku mutu, sedangkan NH_4^+ dan fosfat anorganik juga berada pada kisaran rendah (sub-mg/L). Kondisi ini menunjukkan bahwa pada saat pengamatan dan kondisi simulasi *steady-state*, nutrisi belum menjadi pembatas utama kelayakan irigasi. Meskipun demikian, tren kenaikan longitudinal yang kecil tetap penting dipertahankan sebagai baseline untuk analisis skenario pada Bab IV, karena perubahan hidrologi dan beban difus berpotensi menggeser dinamika nutrisi pada masa depan (Richardson *et al.*, 2025).

Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, pada kondisi *synoptic* April 2024 mutu air Sungai Bila pada ruas kajian secara regulatif layak untuk irigasi karena memenuhi minimal Kelas 4. Berdasarkan parameter pembatas utama yang identik dengan baku mutu, yaitu DO minimum dan COD, ruas kajian secara *worst-case* berada pada kondisi setara Kelas 2. Namun demikian, status layak tidak identik dengan aman secara operasional. Segmen tengah–hilir tetap merupakan zona prioritas pengelolaan karena mengalami penipisan *margin of safety* DO bersamaan dengan peningkatan COD dan akumulasi ISS yang dapat mempercepat sedimentasi serta menambah beban operasi dan pemeliharaan jaringan irigasi. Di sisi lain, CBOD_f sebagai proksi konservatif tekanan organik karbon menunjukkan bahwa pada segmen terburuk terdapat indikasi tekanan organik yang mencapai kisaran ambang Kelas 3. Dalam pembacaan ini, ISS dan CBOD_f digunakan untuk memperkuat interpretasi operasional, bukan sebagai dasar formal penetapan kelas mutu, tetapi sebagai sinyal tambahan bahwa tekanan organik karbon di segmen tengah–hilir lebih tinggi daripada yang tersirat oleh DO dan COD saja. Temuan ini memperkuat argumen perlunya pengendalian beban non-titik, terutama beban organik dan sedimen, pada segmen tengah–hilir untuk menjaga *margin of safety* mutu air pada kondisi hidrologi yang lebih kritis.

Tabel 10. Ringkasan interpretasi kelas mutu berdasarkan hasil simulasi dan pembacaan operasional (PP 22/2021 Lampiran VI)

Parameter (simulasi)	Rentang hulu–hilir	Ambang Kelas 1	Ambang Kelas 2	Kelas parameter (segmen terburuk)
pH	7,21–7,38	6–9	6–9	Kelas 1
ISS (proksi TSS) (mg/L)	3,18–14,08	≤40	≤50	Kelas 1
DO (mg/L, minimum)	min 5,48	≥6	≥4	Kelas 2
COD (mg/L)	2,00–13,95	≤10	≤25	Kelas 2
CBOD _f (proksi BOD) (mg/L)	1,44–4,64	≤2	≤3	Kelas 3*

Catatan: ISS dan CBOD_f digunakan hanya sebagai proksi interpretatif untuk membaca implikasi fisik dan tekanan organik, bukan sebagai substitusi formal parameter TSS dan BOD dalam penetapan kelas mutu regulatif. Kelas mutu “*worst-case*” ruas kajian dalam pembahasan secara formal ditentukan oleh parameter pembatas utama yang identik dengan PP 22/2021, yaitu DO minimum dan COD.

3.5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kondisi hidraulika Sungai Bila pada ruas kajian menunjukkan penguatan aliran ke arah hilir. Debit meningkat dari 31,80 m³/s di hulu menjadi 182,71 m³/s di hilir, diikuti peningkatan kedalaman dari 0,77 m menjadi 2,51 m dan luas penampang basah dari 18,20 m² menjadi 117,90 m², sedangkan kecepatan relatif stabil pada kisaran 1,55–1,77 m/s. Kemiringan dasar menurun dan koefisien reaerasi ka_{20} turun dari 11,40 hari⁻¹ pada Segmen 1 menjadi 1,68 hari⁻¹ di hilir, sehingga segmen bawah menjadi lebih sensitif terhadap defisit oksigen terlarut (DO).

2. Profil kualitas air menunjukkan adanya gradien degradasi longitudinal yang konsisten dari hulu ke hilir, terutama pada parameter organik–oksigen dan padatan tersuspensi. DO menurun dari 8,96 menjadi 5,48 mg/L, sementara CBOD_f meningkat dari 1,44 menjadi 4,64 mg/L, COD meningkat dari 2,00 menjadi 13,95 mg/L, dan ISS meningkat dari 3,18 menjadi 14,08 mg/L. Nutrien anorganik berada pada kisaran rendah dan meningkat relatif moderat, dengan NH₄⁺ meningkat dari 33,50 menjadi 48,20 µgN/L, NO₃⁻ dari 124,20 menjadi 138,20 µgN/L, dan fosfat anorganik dari 52,60 menjadi 59,30 µgP/L. TN dan TP sebagai keluaran model juga meningkat secara longitudinal dari 157,65 menjadi 261,82 µgN/L dan dari 52,65 menjadi 65,15 µgP/L. Kinerja model QUAL2Kw dinilai memadai untuk mendukung analisis kualitas air Sub-DAS Bila, dengan rata-rata *NSE* sebesar 0,71, *R*² sebesar 0,95, dan *P_{bias}* sebesar -1,29%.
3. Pada kondisi *synoptic* April 2024, berdasarkan PP 22 Tahun 2021 Lampiran VI, mutu air Sungai Bila pada ruas kajian layak untuk irigasi karena memenuhi minimal Kelas 4. Berdasarkan parameter pembatas utama yang identik dengan baku mutu, yaitu DO minimum dan COD, ruas kajian secara umum berada pada kondisi setara Kelas 2, sedangkan pH dan ISS sebagai proksi interpretatif terhadap TSS masih berada pada rentang rendah yang setara dengan Kelas 1. Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa status “layak” secara regulatif tidak identik dengan “aman” secara operasional. Segmen tengah–hilir merupakan zona prioritas pengelolaan karena mengalami kerentanan ganda, yaitu menipisnya *margin of safety* DO akibat kombinasi peningkatan tekanan organik dan penurunan kapasitas reaerasi, serta meningkatnya akumulasi padatan tersuspensi yang berpotensi mempercepat sedimentasi dan menambah beban operasi dan pemeliharaan jaringan irigasi.

1.6. Daftar Pustaka

- Aguilar-Torrejón, J. A., Balderas-Hernández, P., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C. E., Rodríguez-Torres, I., & Torres-Blancas, T. (2023). Relationship, importance, and development of analytical techniques: COD, BOD, and, TOC in water—An overview through time. *SN Applied Sciences* 2023 5:4, 5(4), 118-. <https://doi.org/10.1007/S42452-023-05318-7>
- Ali, N. F. M., Mohamed, I., Yunus, R. M., & Othman, F. (2025). Spatio-temporal patterns of river water quality in the klang river basin, malaysia: a functional data analysis approach to detect pre- and post-pandemic shifts. *Environmental Monitoring and Assessment* 2025 197:11, 197(11), 1198-. <https://doi.org/10.1007/S10661-025-14644-9>
- Anyango, G. W., Bhowmick, G. D., & Sahoo Bhattacharya, N. (2024). A critical review of irrigation water quality index and water quality management practices in micro-irrigation for efficient policy making. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100304. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100304>
- Ariska, M., Suhadi, Supari, Irfan, M., & Iskandar, I. (2024). Spatio-Temporal Variations of Indonesian Rainfall and Their Links to Indo-Pacific Modes. *Atmosphere* 2024, Vol. 15, Page 1036, 15(9), 1036. <https://doi.org/10.3390/ATMOS15091036>
- Arora, S., & Keshari, A. K. (2022). Modelling re-aeration of rivers using predictive models and developed ANN models under varying hydrodynamic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 67(15), 2294–2309. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2138402>

- Babamiri, O., Vanaei, A., Guo, X., Wu, P., Richter, A., & Ng, K. T. W. (2020). Numerical Simulation of Water Quality and Self-Purification in a Mountainous River Using QUAL2KW. *Journal of Environmental Informatics*, 37(1), 26–35. <https://doi.org/10.3808/jei.202000435>
- Bai, X., Smidt, S. J., Her, Y. G., Li, Y., Kim, D., Manirakiza, N., Duriancik, L., & Bhadha, J. H. (2025). Sensitivity of redox conditions to irrigation practice and organic matter decomposition in a rotational flooded rice (*Oryza sativa*) cropping system. *Journal of Environmental Quality*, 54(6), 1804–1816. <https://doi.org/10.1002/JEQ2.70087>
- Benavides-Muñoz, H. M. (2025). Predictive Sinusoidal Modeling of Sedimentation Patterns in Irrigation Channels via Image Analysis. *Water* 2025, Vol. 17, 17(14). <https://doi.org/10.3390/W17142109>
- Bhatti, M. T., Ashraf, M., & Anwar, A. A. (2021). Soil Erosion and Sediment Load Management Strategies for Sustainable Irrigation in Arid Regions. *Sustainability* 2021, Vol. 13, 13(6). <https://doi.org/10.3390/SU13063547>
- Carter, A. M., Blaszcak, J. R., Heffernan, J. B., & Bernhardt, E. S. (2021). Hypoxia dynamics and spatial distribution in a low gradient river. *Limnology and Oceanography*, 66(6), 2251–2265. <https://doi.org/10.1002/LNO.11751>
- Chakraborty, S. K. (2021). River Pollution and Perturbation: Perspectives and Processes. *Riverine Ecology* Volume 2, 443–530. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53941-2_5
- Chen, C., Chen, X., Tang, H., Feng, X., Han, Y., He, Y., Yan, L., He, Y., Yang, L., & He, K. (2025). A Quantitative Assessment of the Impacts of Land Use and Natural Factors on Water Quality in the Red River Basin, China. *Water* 2025, Vol. 17, 17(13). <https://doi.org/10.3390/W17131968>
- Chen, L. na, Zhao, Z. long, Guo, G. mian, Li, J., Wu, W. bo, Zhang, F. xiu, & Zhang, X. (2022). Effects of muddy water irrigation with different sediment gradations on nitrogen transformation in agricultural soil of Yellow River Basin. *Water Science and Engineering*, 15(3), 228–236. <https://doi.org/10.1016/J.WSE.2021.12.005>
- Chrapkiewicz, K., Lipp, A. G., Barron, L. P., Barnes, R., & Roberts, G. G. (2024). Apportioning sources of chemicals of emerging concern along an urban river with inverse modelling. *Science of The Total Environment*, 933, 172827. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.172827>
- Dahlan, Dalya, N., Afriyani, & Ahmad, T. S. (2021). Tinjauan Aspek Ekonomi dan Strategi Implementasi Pengelolaan Sumber Daya Hutan Berkelanjutan di Kabupaten Sidrap. *Al-Buhuts*, 17(2), 356–370. <https://doi.org/10.30603/AB.V17I2.2354>
- Demir, M. S., & Muratoglu, A. (2025). Improving water footprint assessment in agriculture: A high-resolution SWAT model study of the Ceyhan Basin, Türkiye. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 100664. <https://doi.org/10.1016/J.ECOHYD.2025.100664>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. In World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2211en>
- Ghorbani, Z., Amanipoor, H., & Battaleb-Looie, S. (2022). Water quality simulation of Dez River in Iran using QUAL2KW model. *Geocarto International*, 37(4), 1126–1138. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1762763>
- Gong, C., Zhang, H., Huo, S., Zhang, J., Weng, N., & Li, W. (2025). Transformation processes of total suspended solids and dissolved organic matter in rivers: Influences of different land use sources and degradation processes. *Science of The Total Environment*, 963, 178509. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2025.178509>

- Gurmu, Z. A., Ritzema, H., de Fraiture, C., & Ayana, M. (2024). Hydrodynamic modelling to develop design and operational options for sedimentation reduction in irrigation schemes, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101816. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2024.101816>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC4D4F>
- Hendrasarie, N., & Swandika, I. D. A. (2020). Resistance of Loading Loads in Surabaya River and Its Branch with Qual2KW Model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(4), 042096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042096>
- Hobson, A. J., Neilson, B. T., Stackelberg, N. von, Shupryt, M., Ostermiller, J., Pelletier, G., & Chapra, S. C. (2014). Development of a Minimalistic Data Collection Strategy for QUAL2Kw. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8), 04014096. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000488](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000488)
- Johnson, M. F., Albertson, L. K., Algar, A. C., Dugdale, S. J., Edwards, P., England, J., Gibbins, C., Kazama, S., Komori, D., MacColl, A. D. C., Scholl, E. A., Wilby, R. L., de Oliveira Roque, F., & Wood, P. J. (2024). Rising water temperature in rivers: Ecological impacts and future resilience. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 11(4), e1724. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1724>
- Jun, K. S., Kang, J. W., & Lee, K. S. (2007). Simultaneous estimation of model parameters and diffuse pollution sources for river water quality modeling. *Water Science and Technology*, 56(1), 155–162. <https://doi.org/10.2166/WST.2007.447>
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., Pelletier, G. J., & Kim, H. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, 202(3–4), 503–517. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2006.12.033>
- Kaushal, S. S., Maas, C. M., Mayer, P. M., Newcomer-Johnson, T. A., Grant, S. B., Rippey, M. A., Shatkay, R. R., Leathers, J., Gold, A. J., Smith, C., McMullen, E. C., Haq, S., Smith, R., Duan, S., Malin, J., Yaculak, A., Reimer, J. E., Delaney Newcomb, K., Sides Raley, A., ... Belt, K. T. (2023). Longitudinal stream synoptic monitoring tracks chemicals along watershed continuums: a typology of trends. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1122485. <https://doi.org/10.3389/FENV.2023.1122485>
- Lipps, W. C., Braun-Howland, E. B., & Baxter, T. E. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater (24th Edition)*. American Public Health Association, American Water Works Association. <https://documentatiecentrum.watlab.be/>
- Mamun, M., Kim, J. Y., Kim, J. E., & An, K. G. (2022). Longitudinal Chemical Gradients and the Functional Responses of Nutrients, Organic Matter, and Other Parameters to the Land Use Pattern and Monsoon Intensity. *Water* 2022, Vol. 14, 14(2). <https://doi.org/10.3390/W14020237>
- McCabe, K. M., Smith, E. M., Lang, S. Q., Osburn, C. L., & Benitez-Nelson, C. R. (2021). Particulate and Dissolved Organic Matter in Stormwater Runoff Influences Oxygen Demand in Urbanized Headwater Catchments. *Environmental Science & Technology*, 55(2), 952–961. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.0C04502>
- Mohamad Noor, S. S., Saad, N. A., Mohd Akhir, M. F., & Abd Rahim, M. S. (2025). QUAL2K water quality model: A comprehensive review of its applications, and limitations. *Environmental Modelling & Software*, 184, 106284. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSFT.2024.106284>

- Molner, J. V., Soria, J. M., Pérez-González, R., & Sòria-Perpinyà, X. (2023). Measurement of Turbidity and Total Suspended Matter in the Albufera of Valencia Lagoon (Spain) Using Sentinel-2 Images. *Journal of Marine Science and Engineering* 2023, Vol. 11, 11(10). <https://doi.org/10.3390/JMSE11101894>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/TRANS.58.10715>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center. (2024). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Project: Climatology Data for Agricultural Applications*. <https://Power.Larc.Nasa.Gov/>.
- Nie, Y., Huang, G., Tong, S., Chen, W., Song, Y., Wang, X., Zhang, Q., & Jiang, P. (2024). Assessing the impacts of rice terraces and ponds on the sediment and phosphorus loads in a typical hilly watershed of three gorge reservoir, China. *Journal of Cleaner Production*, 459, 142560. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.142560>
- Patel, H. B., & Jariwala, N. D. (2024). Determining Assimilative Capacity of River Tapi Using Qual2kw Model. *Water Conservation & Management*, 8(2), 217–226. <https://doi.org/10.26480/wcm.02.2024.217.226>
- Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21(3), 419–425. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2005.07.002>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PPRI). (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lampiran VI)*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 32.
- Qin, J., Duan, W., Zou, S., Chen, Y., Huang, W., & Rosa, L. (2024). Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture. *Nature Communications* 2024 15:1, 15(1), 3084-. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47383-5>
- Raeisi, N., Moradi, S., & Scholz, M. (2022). Surface Water Resources Assessment and Planning with the QUAL2KW Model: A Case Study of the Maroon and Jarahi Basin (Iran). *Water*, 14(5), 705. <https://doi.org/10.3390/w14050705>
- Repasch, M., Scheingross, J. S., Hovius, N., Lupker, M., Wittmann, H., Haghipour, N., Gröcke, D. R., Orfeo, O., Eglinton, T. I., & Sachse, D. (2021). Fluvial organic carbon cycling regulated by sediment transit time and mineral protection. *Nature Geoscience* 2021 14:11, 14(11), 842–848. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00845-7>
- Richardson, C. M., Peucker-Ehrenbrink, B., Wyatt, S., Bourbonnais, A., Hatje, V., Frey, C., Sanders, T., Varela, D. E., & Paytan, A. (2025). Effects of climate change on river and groundwater nutrient inputs to the coastal ocean. *Communications Earth & Environment* 2025 6:1, 6(1), 761-. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02594-6>
- Roudbari, M. V., Dehnavi, A., Jamshidi, S., & Yazdani, M. (2023). A multi-pollutant pilot study to evaluate the grey water footprint of irrigated paddy rice. *Agricultural Water Management*, 282, 108291. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108291>
- Rozemeijer, J., Jordan, P., Hooijboer, A., Kronvang, B., Glendell, M., Hensley, R., Rinke, K., Stutter, M., Bieroza, M., Turner, R., Mellander, P. E., Thorburn, P., Cassidy, R., Appels, J., Ouwerkerk, K., & Rode, M. (2025). Best practice in high-frequency water quality monitoring for improved management and assessment;

- a novel decision workflow. *Environmental Monitoring and Assessment* 2025 197:4, 197(4), 353-. <https://doi.org/10.1007/S10661-025-13795-Z>
- Salvato, L. A., Marvin-DiPasquale, M., Fleck, J. A., McCord, S. A., & Linquist, B. A. (2024). Influence of irrigation water and soil on annual mercury dynamics in Sacramento Valley rice fields. *Journal of Environmental Quality*, 53(3), 327–339. <https://doi.org/10.1002/JEQ2.20557>
- Sepp, M., Abbasi, M., Döll, P., Freixa, A., Marcé, R., & Sabater, S. (2025). Impacts of climate change on the dilution capacity of perennial and non-perennial European rivers. *Water Research*, 287, 124499. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2025.124499>
- Soares, S., Vasco, J., & Scalize, P. (2023). Water Quality Simulation in the Bois River, Goiás, Central Brazil. *Sustainability* 2023, Vol. 15, 15(4). <https://doi.org/10.3390/SU15043828>
- Tan, S., Zhao, G., Peng, C., Ye, W., Xie, D., Chen, F., Ni, C., Shao, J., Zheng, L., & Ni, J. (2023). Multi-scale effects of landscape on nitrogen (N) and phosphorus (P) in a subtropical agricultural watershed: A case of Qi river basin (QRB), China. *Ecological Indicators*, 147, 110017. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.110017>
- Thapa, S., Sinclair, H. D., Creed, M. J., Borthwick, A. G. L., Watson, C. S., & Muthusamy, M. (2024). Sediment Transport and Flood Risk: Impact of Newly Constructed Embankments on River Morphology and Flood Dynamics in Kathmandu, Nepal. *Water Resources Research*, 60(10), e2024WR037742. <https://doi.org/10.1029/2024WR037742>
- van Vliet, M. T. H., Thorslund, J., Stokal, M., Hofstra, N., Flörke, M., Ehalt Macedo, H., Nkwasa, A., Tang, T., Kaushal, S. S., Kumar, R., van Griensven, A., Bouwman, L., & Mosley, L. M. (2023). Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment* 2023 4:10, 4(10), 687–702. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>
- Vranešević, M., Meseldžija, M., Grabić, J., Zemunac, R., & Boukalova, Z. (2025). Irrigation water quality in a framework of sustainable development goal 6: a review of challenges impacts policy alignments. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1580338. <https://doi.org/10.3389/FAGRO.2025.1580338/>
- Wardani, P. A., & Mirwan, D. M. (2023). Analysis of Buduran River Water Quality Using Qual2kw as Raw Material for Siwalanpanji Ipa. *Journal of Environmental Engineering and Sustainable Technology*, 9(02), 41–51. <https://doi.org/10.21776/UB.JEEST.2022.009.02.1>
- Yonouwinhi, T. J. B., Thiébot, J., Guillou, S. S., d'Almeida, G. A. F. A., & Abagale, F. K. (2025). Modelling of Water Level Fluctuations and Sediment Fluxes in Nokoué Lake (Southern Benin). *Water* 2025, Vol. 17, 17(15). <https://doi.org/10.3390/W17152209>
- Zeng, F., Zuo, Z., Mo, J., Chen, C., Yang, X., Wang, J., Wang, Y., Zhao, Z., Chen, T., Li, Y., Zhang, Z., Hu, Z., & Xu, H. (2021). Runoff Losses in Nitrogen and Phosphorus From Paddy and Maize Cropping Systems: A Field Study in Dongjiang Basin, South China. *Frontiers in Plant Science*, 12, 675121. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.675121>

BAB IV

PROYEKSI NERACA AIR LAHAN SAWAH DAN KUALITAS AIR IRIGASI SUB-DAS BILA DI BAWAH SKENARIO PERUBAHAN PENGUNAAN LAHAN DAN IKLIM

4.1. Abstrak

Penelitian ini memproyeksikan neraca air lahan sawah dan kualitas air irigasi Sub-DAS Bila pada horizon 2036 di bawah skenario gabungan perubahan penggunaan/tutupan lahan (*land use/land cover*, LULC) dan iklim. Rantai pemodelan terhubung digunakan untuk menjaga keterlacakan antara kondisi baseline dan skenario, dengan baseline didefinisikan sebagai iklim periode 2011–2023, LULC tahun 2024, dan kualitas air *synoptic* April 2024. Peta LULC 2036 disusun menggunakan pendekatan *Cellular Automata–Artificial Neural Network* (CA–ANN) pada *plugin* MOLUSCE–QGIS berbasis peta LULC multitemporal, sedangkan skenario iklim mengacu pada CMIP6 SSP3–7.0 yang dikoreksi dengan metode delta. Input skenario kemudian diintegrasikan ke dalam simulasi hidrologi menggunakan SWAT, perhitungan kebutuhan irigasi padi menggunakan CROPWAT, serta proyeksi kualitas air sungai menggunakan QUAL2Kw dengan parameterisasi baseline dipertahankan, sedangkan masukan difus diskalakan sebagai *first-order approximation* agar ketertelusuran antara perubahan LULC dan tekanan kualitas air tetap terjaga. Hasil menunjukkan bahwa lanskap bergerak menuju mosaik yang semakin agro-dominan. Pada horizon 2036 dibanding baseline 2024, vegetasi alami dan semialami menurun, ditandai oleh berkurangnya hutan sebesar 810,76 ha (–2,84%) dan semak belukar sebesar 642,89 ha (–16,84%), yang berlangsung paralel dengan peningkatan pertanian lahan kering sebesar 682,87 ha (+14,41%), pertanian lahan basah sebesar 728,45 ha (+17,67%), dan permukiman/lahan terbangun sebesar 74,42 ha (+19,82%). Sinyal iklim menunjukkan presipitasi tahunan relatif stabil, tetapi temperatur meningkat, dengan ΔT_{min} sekitar +0,34 °C dan ΔT_{max} sekitar +0,45 °C, yang berpotensi meningkatkan *evaporative demand* dan memperkuat proses biogeokimia. Simulasi SWAT menempatkan Sub-DAS Bila pada rezim lembap dengan presipitasi 2.550,77 mm/tahun dan hasil air (WYLD) 1.849,85 mm/tahun, dengan kontribusi dominan dari aliran lateral dan air tanah dangkal. Kebutuhan irigasi mencapai NIR 450,90 mm/tahun dan GIR 751,50 mm/tahun ($\eta = 0,60$). Meskipun neraca air tahunan tetap surplus, defisit intra-musiman muncul pada April, Oktober, dan November dengan IDS/ 122,12 mm atau sekitar 16,25% dari GIR tahunan, sehingga isu utama pengelolaan terletak pada ketidakselarasan waktu antara pasokan dan kebutuhan air, dengan reliabilitas bulanan IRI sekitar 0,75. Pada sisi kualitas air, sinyal degradasi menuju hilir menguat. Pada segmen hilir, CBOD_f meningkat dari 4,64 menjadi 5,07 mg/L, COD meningkat dari 13,95 menjadi 15,27 mg/L, ISS meningkat dari 14,08 menjadi 16,82 mg/L, dan DO minimum menurun dari 5,48 menjadi 4,77 mg/L. Mengacu pada PP 22 Tahun 2021, mutu air masih layak untuk irigasi, dengan pH 7,10–7,36 dan ISS setara Kelas 1, sedangkan COD dan DO berada pada Kelas 2. Namun, DO perlu diperlakukan sebagai indikator peringatan dini karena margin keselamatan pada segmen tengah–hilir menipis, sedangkan kenaikan COD dan ISS mengindikasikan penguatan tekanan organik dan risiko operasional pada sistem irigasi. Dengan demikian, pengendalian beban difus dan penanganan segmen prioritas menjadi penting untuk menjaga stabilitas kuantitas dan kualitas air irigasi pada kondisi 2036.

Kata kunci: CA–ANN, CMIP6 SSP3–7.0, IDS/ IRI, QUAL2Kw

4.2. Pendahuluan

Sistem budidaya padi sawah merupakan salah satu pengguna air terbesar dalam sektor pertanian karena kebutuhan air yang tinggi pada hampir seluruh fase pertumbuhan dan praktik penggenangan yang umum diterapkan pada lahan irigasi (Bo *et al.*, 2024). Pada wilayah monsun tropis, kestabilan produksi padi tidak hanya ditentukan oleh besarnya curah hujan tahunan, tetapi juga oleh kesesuaian waktu antara pasokan air dan kebutuhan air tanaman pada fase-fase pertumbuhan yang peka terhadap cekaman air (Hariadi *et al.*, 2026). Kondisi ini semakin diperburuk oleh anomali iklim yang memperparah ketidakpastian hidrologis, karena dapat menggeser pola hujan, meningkatkan temperatur, memperbesar *evaporative demand*, dan pada akhirnya memengaruhi kebutuhan air irigasi serta keandalan layanan air bagi sistem produksi padi (Bai *et al.*, 2023; Eva *et al.*, 2024; Johnson *et al.*, 2024). Tantangan perencanaan sumber daya air menjadi semakin kompleks karena proyeksi hidrologi masa depan juga dipengaruhi oleh ketidakpastian antar-model iklim, pilihan skenario emisi, dan respons hidrologi lokal yang tidak selalu linier (IPCC, 2023; Zeng *et al.*, 2024).

Di saat yang sama, perubahan penggunaan/tutupan lahan (*land use/land cover*, LULC), terutama ekspansi pertanian, pertumbuhan permukiman, dan penurunan tutupan vegetasi alami, dapat memodifikasi komponen utama neraca air DAS, seperti limpasan permukaan (*runoff*), *water yield*, evapotranspirasi, dan pengisian air tanah, serta memperkuat risiko hidrologi “*too much*” dan “*too little*” melalui perubahan konektivitas aliran, erosi, dan angkutan sedimen (Grafton *et al.*, 2024; Insan & Kuntiyawichai, 2022; Kodoatie & Sjarief, 2010). Studi menunjukkan bahwa konversi vegetasi alami menuju lanskap budidaya cenderung meningkatkan limpasan permukaan dan memperbesar keluaran air jangka pendek, tetapi pada saat yang sama dapat melemahkan fungsi penyangga hidrologi, menurunkan kapasitas infiltrasi, dan memperbesar kerentanan sistem terhadap kekurangan air pada periode kering (Kayitesi *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2022). Ketika perubahan LULC terjadi bersamaan dengan perubahan iklim, respons hidrologi sering bersifat non-aditif karena konfigurasi lanskap memengaruhi bagaimana hujan dipartisikan menjadi limpasan, infiltrasi, dan evapotranspirasi. Akibatnya, dampak terhadap ketersediaan air dan risiko defisit irigasi menjadi sangat bergantung pada karakteristik setempat seperti topografi, tanah, jaringan aliran, dan mosaik penutup lahan (IPCC, 2023; Kayitesi *et al.*, 2022). Oleh karena itu, dampak terhadap ketersediaan air irigasi tidak dapat dijelaskan secara memadai hanya dengan menilai salah satu penggerak secara terpisah, melainkan harus dibaca sebagai hasil interaksi antara perubahan iklim dan perubahan lanskap pada skala DAS.

Selain kuantitas air, kualitas air irigasi semakin diakui sebagai pembatas penting bagi keberlanjutan sistem sawah irigasi (Vranešević *et al.*, 2025). Perubahan LULC dan intensifikasi pertanian dapat meningkatkan tekanan beban difus berupa bahan organik, nutrisi, dan sedimen tersuspensi, yang pada gilirannya menurunkan mutu air sungai dan memperbesar risiko gangguan terhadap fungsi layanan irigasi (Robotham *et al.*, 2021). Dalam sistem sungai yang menerima limpasan pertanian dan drainase sawah, perubahan debit, suhu, serta komposisi beban pencemar dapat memengaruhi dinamika biogeokimia secara nyata, termasuk kebutuhan oksigen, transformasi nutrisi, dan transport padatan tersuspensi (Hu *et al.*, 2021; Robotham *et al.*, 2021; Sazawa *et al.*,

2023). Dengan demikian, proyeksi sumber daya air masa depan tidak cukup hanya menilai ketersediaan air berbasis debit, tetapi juga perlu menilai perubahan mutu air yang menentukan apakah air tersebut tetap layak dan aman digunakan untuk irigasi.

Pendekatan proyeksi yang terintegrasi menjadi sangat penting di Sub-DAS Bila, yang berfungsi sebagai sumber pasokan air bagi sistem irigasi lahan sawah di wilayah hilir. Secara empiris, wilayah DAS Bila telah menunjukkan adanya tekanan perubahan penggunaan/tutupan lahan pada zona resapan dan indikasi pelemahan kondisi hidrologi. Penurunan hutan primer dilaporkan berkorelasi dengan meningkatnya koefisien aliran permukaan serta membesarnya koefisien regim sungai, yang mencerminkan variabilitas debit yang lebih tinggi dan meningkatnya risiko kejadian ekstrem banjir maupun kekeringan (Staddal *et al.*, 2016). Konsisten dengan temuan tersebut, kajian perubahan penggunaan/penutupan lahan di Sub-DAS Bila menunjukkan penurunan beberapa kelas vegetasi dan peningkatan kelas budidaya serta permukiman, sehingga tekanan LULC diperkirakan tetap berlanjut pada horizon proyeksi (Asra *et al.*, 2020). Dari sisi iklim, kajian berbasis model iklim pada DAS Bila juga menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan curah hujan pada bulan-bulan tertentu yang berkaitan dengan meningkatnya kerawanan banjir pada lahan sawah (Abdullah *et al.*, 2022). Temuan-temuan ini menegaskan bahwa sinyal risiko iklim dan perubahan lanskap di wilayah studi telah muncul, namun belum sepenuhnya diterjemahkan ke dalam evaluasi operasional terhadap pasokan air, kebutuhan irigasi, dan mutu air secara terpadu.

Meskipun kajian proyeksi pada skala DAS terus berkembang, banyak penelitian masih menerapkan pendekatan parsial. Pemodelan hidrologi, kebutuhan air tanaman, perubahan LULC, dan kualitas air sering dilakukan secara terpisah atau hanya menekankan satu penggerak utama, padahal keputusan pengelolaan irigasi membutuhkan gambaran yang terintegrasi dan berbasis skenario untuk menangkap keterkaitan antar-proses (Toosi *et al.*, 2025; Wagner *et al.*, 2023). Dalam implementasi pemodelan berbasis skenario tersebut, integrasi proyeksi iklim modern seperti *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) menghadapi tantangan berupa bias sistematis pada parameter presipitasi dan temperatur, yang dapat merambat menjadi kesalahan estimasi debit serta defisit irigasi (Yalcin, 2023). Guna mengatasi perambatan bias ini, penerapan metode koreksi yang transparan, mudah ditelusuri, dan memadai seperti *delta change* menjadi bagian penting dalam rantai pemodelan dampak iklim (Kartal, 2024; Menapace *et al.*, 2025). Sementara itu, pada aspek mutu air, model proses satu-dimensi seperti QUAL2Kw telah banyak digunakan untuk merepresentasikan hubungan antara hidraulika, transpor, dan biogeokimia sungai secara operasional (Babamiri *et al.*, 2020; Ghorbani *et al.*, 2022; Mohamad Noor *et al.*, 2025; Pelletier *et al.*, 2006). Namun, pengintegrasian model kualitas air ke dalam satu kesatuan rantai skenario iklim koreksi bias dan LULC untuk menilai risiko irigasi masa depan masih relatif terbatas.

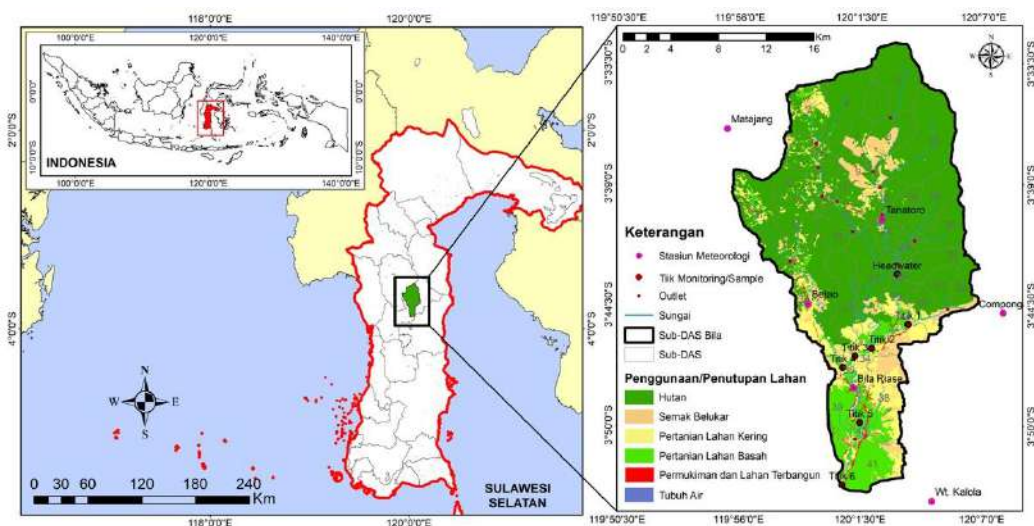
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan memproyeksikan neraca air lahan sawah dan kualitas air irigasi Sub-DAS Bila pada horizon 2036 di bawah skenario gabungan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim. Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga hal. Pertama, penelitian ini tidak lagi menilai kondisi eksisting, tetapi melakukan proyeksi masa depan dengan menggunakan *input* skenario berupa peta LULC hasil CA-ANN dan data iklim CMIP6 yang telah dikoreksi, sehingga perubahan

dibanding baseline dapat ditelusuri secara konsisten lintas komponen. Kedua, penelitian ini mengintegrasikan sisi pasokan dan sisi kebutuhan air irigasi melalui kerangka SWAT–CROPWAT, sekaligus menggabungkannya dengan proyeksi kualitas air menggunakan QUAL2Kw, sehingga risiko kekurangan air dan penurunan mutu air dapat dievaluasi secara bersamaan dalam satu kerangka analitis. Ketiga, keluaran proyeksi diarahkan untuk mengidentifikasi periode intra-musiman dan segmen sungai yang paling kritis bagi operasi irigasi padi, sehingga memberikan dasar ilmiah yang lebih operasional bagi perumusan strategi adaptasi pengelolaan.

4.3. Metode Penelitian

4.3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Sub-DAS Bila, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Secara geografis, wilayah studi terletak pada koordinat $119^{\circ}55'00''$ – $120^{\circ}10'00''$ BT dan $3^{\circ}33'20''$ – $3^{\circ}53'20''$ LS, dengan luas sekitar $\pm 41.914,86$ ha. Sub-DAS Bila merupakan daerah tangkapan hulu yang berfungsi sebagai salah satu sumber pasokan air irigasi bagi aktivitas pertanian di wilayah hilir dan bermuara ke Danau Tempe, sebuah sistem hidrologi strategis di Sulawesi selatan yang menopang budidaya padi dan agroekosistem hilir. Secara administratif, wilayah tangkapan ini mencakup Kabupaten Enrekang, Sidenreng Rappang, dan Wajo, serta berperan sebagai kawasan hulu yang membantu mengatur ketersediaan air, transport sedimen, dan stabilitas lanskap (Gambar 19).



Gambar 19. Lokasi Penelitian

Kegiatan penelitian dilaksanakan secara bertahap. Pengumpulan literatur, pengumpulan data sekunder, dan pengambilan data lapangan di wilayah Sub-DAS Bila dilakukan pada periode Februari sampai Maret 2024. Selanjutnya, pengolahan data dan pemodelan, yang mencakup penyusunan *input* skenario dan analisis berbasis model, dilaksanakan pada periode April sampai Oktober 2024 di Laboratorium Agroeinformatika, Universitas Hasanuddin, Makassar.

4.3.2. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan untuk penyusunan skenario perubahan penggunaan/tutupan lahan (*land use/land cover*, LULC) adalah citra Landsat multitemporal tahun 2012 dan 2018 (*path/row* 114/62 dan 114/63) dengan tutupan awan kurang dari 10%, yang diperoleh dari *United States Geological Survey* (USGS) *EarthExplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), serta citra satelit *Sentinel-2A* tahun 2024 yang diperoleh dari *European Space Agency* (ESA) (<https://www.esa.int/>). Data topografi menggunakan *Digital Elevation Model* (DEM) FABDEM v1.2 dengan resolusi 30 m (Hawker et al., 2022). Data infrastruktur dan fitur hidrologi, yang meliputi jaringan jalan, sungai, permukiman, dan fasilitas publik, bersumber dari Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1:50.000 yang disediakan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) (<https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>), dan digunakan sebagai dasar pembentukan variabel aksesibilitas atau proksimitas. Mengacu pada kerangka *Cellular Automata–Artificial Neural Network* (CA–ANN), variabel pendorong spasial yang digunakan meliputi kemiringan lereng (*slope*), jarak ke jalan (*distance to road*, DsTRoad), jarak ke permukiman (*distance to settlement*, DsTSettl), jarak ke fasilitas publik (*distance to public facilities*, DsTPF), dan jarak ke sungai (*distance to river*, DsTRiver).

Bahan yang digunakan untuk skenario perubahan iklim adalah data proyeksi iklim berbasis *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) pada skenario *Shared Socioeconomic Pathway* (SSP) 3–7.0 sebagai representasi jalur perkembangan menengah (Tebaldi et al., 2021). Variabel yang digunakan mencakup curah hujan serta temperatur minimum dan maksimum. Sebagai pembanding terhadap kondisi historis, digunakan data iklim baseline observasi pada wilayah studi untuk memastikan keterbandingan karakter iklim historis dan data proyeksi pada area Sub-DAS Bila. Sumber data proyeksi CMIP6 diperoleh dari World Bank Climate Change Knowledge Portal (CCKP) (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/indonesia/trends-variability-projections>).

Data yang digunakan untuk pemodelan SWAT–CROPWAT, yang meliputi data spasial, hidrometeorologi, dan agronomi, telah dijelaskan secara rinci pada Bab II. Sementara itu, data yang digunakan untuk pemodelan kualitas air QUAL2Kw, baik sebagai input maupun sebagai acuan evaluasi simulasi, telah dijelaskan secara rinci pada Bab III. Dengan demikian, Subbagian 4.3.2 pada Bab IV ini difokuskan pada bahan dan alat yang spesifik untuk penyusunan skenario LULC berbasis CA–ANN dan skenario iklim berbasis CMIP6.

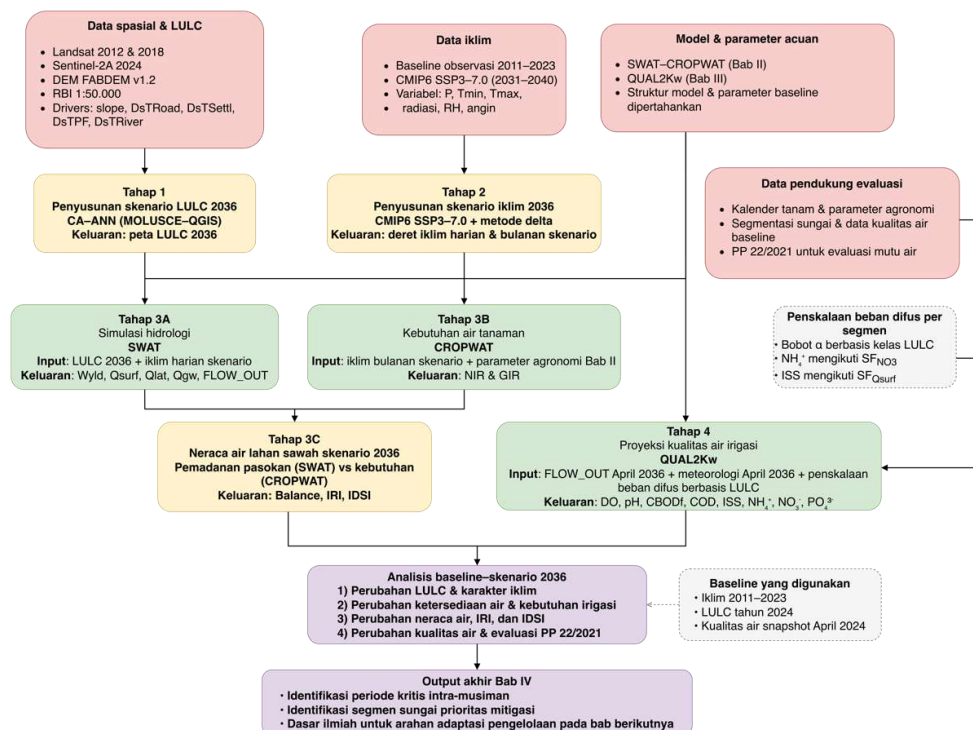
Analisis spasial dan penyiapan data LULC dilakukan menggunakan *Quantum Geographic Information System* (QGIS), dengan dukungan *plugin Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) (Congedo, 2021), *plugin Accuracy Assessment of Thematic Maps* (AcATaMa) (Sujarwo et al., 2023), dan *plugin Modules for Land Use Change Evaluation* (MOLUSCE) untuk pemodelan CA–ANN (Kamaraj & Rangarajan, 2022; Muhammad et al., 2022). Seluruh *plugin* dijalankan dalam QGIS v3.34. Untuk simulasi proyeksi neraca air dan kualitas air pada Bab IV digunakan perangkat lunak ArcSWAT v2012 pada ArcGIS v10.3, CROPWAT v8.0, dan QUAL2Kw v5.1 sesuai kerangka pemodelan yang telah dijelaskan pada Bab II dan Bab III. Pemeriksaan administratif data,

yang meliputi format, kelengkapan, dan konsistensi satuan, dilakukan menggunakan *Microsoft Office*.

4.3.3. Tahapan Penelitian dan Kerangka Analisis

Penelitian ini disusun sebagai analisis proyeksi berbasis skenario yang mengintegrasikan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim ke dalam evaluasi neraca air lahan sawah dan kualitas air irigasi di Sub-DAS Bila. Kerangka analisis dibangun melalui *linked-model chain*, yaitu rantai pemodelan terhubung, di mana keluaran dari tahap penyusunan skenario menjadi masukan bagi simulasi hidrologi, kebutuhan air tanaman, dan kualitas air. Seluruh proyeksi pada Bab IV difokuskan pada horizon tahun 2036, sehingga perubahan yang dianalisis merepresentasikan kondisi masa depan dibandingkan dengan baseline.

Untuk menjaga keterlacakan, baseline pada Bab IV ditetapkan secara eksplisit sebagai berikut: (i) baseline iklim periode 2011–2023 yang digunakan untuk penyusunan sinyal delta CMIP6 dan simulasi SWAT–CROPWAT, (ii) baseline LULC berupa peta tahun 2024 sebagai acuan perubahan spasial menuju 2036, dan (iii) baseline kualitas air berupa *snapshot synoptic* bulan April 2024 sebagaimana dianalisis pada Bab III. Dengan definisi ini, baseline pada Bab IV tidak berubah-ubah, melainkan dibedakan secara tegas menurut komponen yang dianalisis, sehingga seluruh perubahan pada skenario 2036 dapat ditelusuri secara konsisten terhadap kondisi awal masing-masing komponen.



Gambar 20. Tahapan penelitian proyeksi neraca air lahan sawah dan kualitas air irigasi Sub-DAS Bila pada horizon 2036.

Secara umum, tahapan penelitian pada Bab IV terdiri atas empat kelompok kerja (Gambar 20), yaitu: (i) penyusunan skenario perubahan LULC tahun 2036 berbasis CA–ANN, (ii) penyusunan skenario iklim tahun 2036 berbasis CMIP6 SSP3–7.0, (iii) penyusunan neraca air lahan sawah berbasis skenario melalui integrasi SWAT–CROPWAT sebagai representasi sisi pasokan dan sisi kebutuhan air irigasi, serta (iv) simulasi kualitas air berbasis skenario menggunakan QUAL2Kw. Adapun alur tahapan penelitian dijelaskan sebagai berikut:

- a) **Tahap 1. Penyusunan skenario LULC tahun 2036 berbasis CA–ANN.** Tahap ini menghasilkan peta LULC skenario tahun 2036 yang dibangun dari informasi LULC multitemporal dan lima variabel pendorong spasial yang merepresentasikan aksesibilitas dan kendali biofisik. Peta LULC skenario 2036 selanjutnya disiapkan dalam format dan sistem referensi spasial yang konsisten untuk digunakan sebagai input proyeksi pada tahap pemodelan hidrologi dan analisis lanjutan.
- b) **Tahap 2. Penyusunan skenario iklim CMIP6 SSP3–7.0 untuk horizon 2036.** Tahap ini menyiapkan data iklim proyeksi berbasis CMIP6 pada skenario SSP3–7.0 untuk horizon 2036 dan memastikan kesesuaiannya bagi kebutuhan pemodelan. Data iklim skenario digunakan sebagai penggerak utama pada simulasi hidrologi (SWAT) dan sebagai input perhitungan kebutuhan air tanaman (CROPWAT), sehingga perubahan rezim iklim tercermin secara konsisten pada sisi pasokan maupun sisi permintaan air irigasi. Variabel meteorologi yang relevan juga digunakan sebagai input pada pemodelan kualitas air (QUAL2Kw) untuk merepresentasikan pengaruh kondisi atmosfer terhadap proses fisik dan biogeokimia sungai pada skenario yang sama.
- c) **Tahap 3. Penyusunan neraca air lahan sawah berbasis skenario menggunakan SWAT–CROPWAT.** Tahap ini mengintegrasikan peta LULC skenario 2036 (Tahap 1) dan iklim skenario 2036 (Tahap 2) untuk mensimulasikan respons hidrologi Sub-DAS Bila menggunakan SWAT sebagai representasi ketersediaan air. Secara paralel, iklim skenario yang sama digunakan pada CROPWAT untuk menghitung kebutuhan air tanaman dan kebutuhan irigasi. Konfigurasi dan parameter dasar model mengacu pada Bab II, sedangkan perubahan pada Bab IV terutama berasal dari substitusi input eksisting dengan input skenario. Keluaran SWAT dan CROPWAT kemudian dipadankan untuk membentuk indikator neraca air lahan sawah pada kondisi skenario tahun 2036, sehingga perubahan kecukupan air irigasi dapat dinilai secara langsung terhadap baseline.
- d) **Tahap 4. Simulasi kualitas air berbasis skenario menggunakan QUAL2Kw.** Tahap ini mensimulasikan kualitas air sungai untuk irigasi pada kondisi skenario tahun 2036 menggunakan QUAL2Kw. Debit hasil simulasi SWAT pada skenario 2036 digunakan sebagai penggerak hidraulika atau kondisi batas, sedangkan kondisi meteorologi mengikuti skenario iklim yang sama. Struktur segmentasi, konfigurasi, dan parameter dasar model mengacu pada Bab III, sedangkan perubahan pada Bab IV diturunkan dari perubahan input debit, kondisi iklim, dan penskalaan masukan difus berbasis perubahan LULC. Dengan demikian, evaluasi kualitas air dilakukan secara konsisten terhadap perubahan kuantitas air pada skenario yang sama.
- e) **Kerangka perbandingan baseline–skenario 2036.** Seluruh hasil Bab IV dianalisis sebagai perbandingan antara kondisi baseline dan kondisi skenario tahun 2036.

Perbandingan dilakukan untuk menilai arah dan besaran perubahan pada: (i) ketersediaan air, (ii) kebutuhan air tanaman dan kebutuhan irigasi, serta (iii) kualitas air irigasi. Kerangka ini memungkinkan identifikasi periode intra-musiman dan segmen kritis yang rentan terhadap defisit air dan penurunan kualitas air, sehingga dapat digunakan sebagai dasar ilmiah untuk merumuskan arahan adaptasi pengelolaan pada bab berikutnya.

4.3.4. Analisis Data

4.3.4.1. Analisis Perubahan LULC Skenario 2036 Berbasis CA-ANN

Analisis perubahan LULC untuk skenario tahun 2036 dilakukan melalui empat tahapan, yaitu: (i) penyusunan peta LULC multitemporal, (ii) klasifikasi dan evaluasi akurasi LULC, (iii) penyiapan variabel pendorong spasial sebagai determinan transisi, dan (iv) pemodelan serta validasi proyeksi menggunakan pendekatan CA-ANN (Baig *et al.*, 2022; Muhammad *et al.*, 2022). Seluruh pengolahan dilakukan dalam lingkungan *open-source* GIS menggunakan QGIS v3.34 untuk menjamin transparansi dan reproduktibilitas metodologi, dengan alur sebagai berikut:

- a) **Data LULC multitemporal dan praolah citra.** Data berupa citra *Landsat* multitemporal tahun 2012 dan 2018 (*path/row* 114/62 dan 114/63) serta citra *Sentinel-2A* tahun 2024. Citra dipraolah melalui penyeragaman sistem koordinat, mosaik, pemotongan wilayah studi, serta reproyeksi ke *WGS 1984 UTM Zone 50S* agar konsisten antarwaktu. Data topografi menggunakan DEM *FABDEM v1.2* sebagai basis penurunan variabel kemiringan lereng (*slope*). Fitur infrastruktur dan hidrologi, yaitu jalan, sungai, permukiman, dan fasilitas publik, diturunkan atau didigitasi dari Peta RBI skala 1:50.000 untuk penyusunan variabel jarak (*proximity/accessibility*). Konsistensi spasial dan tematik diverifikasi melalui pengecekan kesesuaian terhadap hasil klasifikasi terbaru dan pemeriksaan lapangan terbatas (*field checks*) untuk memastikan akurasi spasial.
- b) **Klasifikasi LULC dan penilaian akurasi.** Peta LULC tahun 2012, 2018, dan 2024 dibangun melalui klasifikasi terawasi (*pixel-based supervised classification*) menggunakan *plugin* SCP pada QGIS v3.34. Algoritma *Maximum Likelihood* digunakan karena memiliki performa yang baik pada data multispektral (Congedo, 2021; El Moussaoui *et al.*, 2025). Sampel pelatihan disusun secara representatif untuk setiap tahun pengamatan, yaitu 180 *training samples* per tahun pada enam kelas LULC, yakni hutan, semak belukar, pertanian lahan kering, pertanian lahan basah, permukiman/lahan terbangun, dan tubuh air, dengan mengacu pada standar nasional Indonesia SNI 7645:2010 (BSN, 2014). Untuk meningkatkan separabilitas kelas, dapat diterapkan penguatan spektral (*spectral enhancement*) sesuai praktik umum klasifikasi multispektral (Toosi *et al.*, 2020). Akurasi klasifikasi dievaluasi menggunakan *plugin* AcATaMa melalui *confusion matrix* dan metrik akurasi, termasuk *Overall Accuracy* (OA) dan koefisien Kappa (κ) (Sujarwo *et al.*, 2023). Secara umum, OA dan κ dihitung sebagai:

$$OA = \frac{\text{piksel terklasifikasi benar}}{\text{total piksel referensi}} \times 100$$

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^n a_{i,i} - \sum_{i=1}^n (T_i F_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (T_i F_i)}$$

dengan N adalah total sampel, $a_{i,i}$ adalah jumlah sampel benar pada kelas i , dan T_i serta F_i adalah total baris dan kolom pada *confusion matrix*. Nilai κ yang sangat tinggi ($>0,90$) menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat baik (Blissag *et al.*, 2024), sedangkan nilai numeriknya dilaporkan pada bagian hasil.

- c) **Variabel pendorong spasial (drivers).** Pemodelan CA–ANN menggunakan lima variabel pendorong spasial yang merepresentasikan determinan utama proses perubahan penggunaan/tutupan lahan, yaitu *slope*, *DsTRoad*, *DsTSettl*, *DsTPF*, dan *DsTRiver*. Variabel-variabel ini umum digunakan untuk mewakili kesesuaian lahan, aksesibilitas, dan potensi perkembangan wilayah (Abbas *et al.*, 2021; Lukas *et al.*, 2023). Meskipun variabel sosioekonomi eksplisit tidak dimasukkan karena keterbatasan data dan resolusi spasial, variabel berbasis aksesibilitas diperlakukan sebagai proksi yang memadai untuk menangkap pengaruh aktivitas manusia, sejalan dengan studi CA–ANN di wilayah tropis yang memiliki keterbatasan data (*data-scarce*) (Baig *et al.*, 2022; Din & Yamamoto, 2024; Mishra *et al.*, 2024). Variabel *slope* diturunkan dari DEM, sedangkan variabel jarak dihitung dari fitur RBI menggunakan metode *Euclidean distance*, yang menghitung kedekatan garis lurus dan telah luas digunakan dalam pemodelan transisi LULC (Gharaibeh *et al.*, 2020). Secara matematis:

$$d_{(a,b)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}$$

dengan $d_{(a,b)}$ adalah jarak *Euclidean* antara dua titik a dan b dalam ruang berdimensi n (Diep *et al.*, 2025). Seluruh *raster drivers* diseragamkan pada *grid* spasial yang sama, baik *extent*, resolusi, maupun proyeksi, dengan peta LULC, serta disesuaikan ke resolusi analisis 30 m agar konsisten.

- d) **Konfigurasi CA–ANN, validasi, dan proyeksi 2036.** Proyeksi LULC dilakukan menggunakan model CA–ANN yang tertanam dalam *plugin* MOLUSCE pada QGIS v3.34. Tahap pelatihan menggunakan jaringan saraf *feedforward multilayer perceptron* (MLP) dengan algoritma *backpropagation*. Konfigurasi ANN ditetapkan konsisten pada seluruh simulasi, yaitu *learning rate* 0,001, *momentum* 0,001, 100 iterasi, dan 10 neuron pada *hidden layer*, sebagaimana digunakan pada studi CA–ANN sejenis (Baig *et al.*, 2022; Kamaraj & Rangarajan, 2022; Lukas *et al.*, 2023). Perubahan historis digunakan untuk membangun matriks probabilitas transisi (*transition probability matrix*), dan MOLUSCE mengekstrak sampel pelatihan dari piksel yang berubah maupun tidak berubah. Hasil ANN berupa peta potensi transisi (*transition potential*) yang kemudian dialokasikan secara spasial menggunakan komponen CA dengan 3×3 *Moore neighborhood* untuk menjaga kontiguitas spasial dan efek ketetanggaan lokal (Xu *et al.*, 2021).

Validasi kinerja dilakukan melalui simulasi *hindcasting*, yaitu mensimulasikan tahun pengamatan dan membandingkannya dengan peta observasi, menggunakan metrik validasi berbasis kappa yang mencakup *kappa overall*, *kappa location*, dan *kappa histogram* (Skilodimou et al., 2023). Secara matematis:

$$K_{overall} = \frac{(\sum_{i=1}^c P_{ij}) - (\sum_{i=1}^c P_{it}P_{tj})}{1 - (\sum_{i=1}^c P_{it}P_{tj})}$$

$$K_{location} = \frac{(\sum_{i=1}^c P_{ij}) - (\sum_{i=1}^c P_{it}P_{tj})}{\min(P_{it}P_{tj}) - (\sum_{i=1}^c P_{it}P_{tj})}$$

$$K_{histogram} = \frac{\min(P_{it}P_{tj}) - (\sum_{i=1}^c P_{it}P_{tj})}{1 - (\sum_{i=1}^c P_{it}P_{tj})}$$

dengan P_{ij} menyatakan proporsi atau kemungkinan piksel yang pada peta referensi berada pada kelas i tetapi pada peta hasil simulasi dipetakan sebagai kelas j . P_{it} dan P_{tj} masing-masing adalah probabilitas marjinal untuk baris dan kolom, sedangkan c adalah jumlah kelas LULC. Secara operasional, $K_{overall}$ mengukur kesesuaian total, sedangkan $K_{location}$ dan $K_{histogram}$ memisahkan komponen kesesuaian berdasarkan lokasi (*spatial allocation*) dan komposisi atau proporsi kelas (*quantity/histogram*). Pemenuhan validasi juga ditunjang oleh pemeriksaan konsistensi *Neural Network Learning Curve* (NNLC) dan keselarasan galat pelatihan–validasi (Hussain et al., 2025). Setelah model dinyatakan layak, simulasi diterapkan untuk menghasilkan peta LULC skenario tahun 2036 dengan asumsi *business-as-usual* (BAU), yang selanjutnya digunakan sebagai input skenario perubahan penggunaan/tutupan lahan pada analisis bab ini.

4.3.4.2. Analisis Skenario Iklim CMIP6 SSP3–7.0 dan Metode Delta untuk Horizon 2036

Analisis skenario iklim bertujuan menyiapkan data iklim proyeksi untuk horizon 2036 berdasarkan CMIP6 pada skenario SSP3–7.0. Data proyeksi diperoleh dari *World Bank* CCKP dan digunakan untuk membentuk skenario iklim yang dapat dibandingkan secara konsisten dengan baseline observasi serta kompatibel untuk kebutuhan pemodelan pada bab ini. Variabel iklim yang digunakan mencakup curah hujan (P), temperatur minimum (T_{min}), dan temperatur maksimum (T_{max}). Alur analisis secara bertahap sebagai berikut:

- Penetapan baseline dan horizon skenario.** Baseline iklim didefinisikan menggunakan data observasi pada wilayah studi sebagaimana digunakan pada Bab II dan Bab III, yaitu periode 2011–2023. Meskipun analisis difokuskan pada horizon 2036, sinyal perubahan iklim diturunkan dari periode representatif di sekitar tahun tersebut, yaitu jendela dekadal 2031–2040, agar faktor perubahan lebih stabil dan tidak terlalu dipengaruhi variabilitas antar-tahun.
- Penerapan metode delta (*delta change*).** Untuk menerjemahkan sinyal perubahan iklim dari CMIP6 ke skala lokal, digunakan metode delta sebagai pendekatan koreksi

sederhana yang mempertahankan pola dasar observasi. Metode ini menyesuaikan deret baseline observasi melalui penambahan faktor perubahan untuk variabel temperatur dan pengalihan faktor perubahan untuk variabel presipitasi (Barkey *et al.*, 2019). Secara umum:

(i) Koreksi aditif (*additive*)

$$X_{cor,i} = X_{obs,i} + (\mu_p - \mu_b)$$

(ii) Koreksi multiplikatif (*multiplicative*)

$$X_{cor,i} = X_{obs,i} \times \frac{\mu_p}{\mu_b}$$

dengan $X_{cor,i}$ adalah nilai iklim terkoreksi pada waktu ke- i , $X_{obs,i}$ adalah nilai observasi baseline pada waktu ke- i , μ_p adalah nilai rata-rata periode proyeksi, dan μ_b adalah nilai rata-rata periode dasar. Dalam implementasi penelitian ini, faktor perubahan dihitung per bulan ($m = 1, \dots, 12$) agar pola musiman tetap terjaga. Untuk temperatur digunakan koreksi aditif dengan menghitung anomali bulanan:

$$\Delta T_m^{min} = \bar{T}_{m,2031-2040}^{CMIP6,min} - \bar{T}_{m,2011-2023}^{base,min}$$

$$\Delta T_m^{max} = \bar{T}_{m,2031-2040}^{CMIP6,max} - \bar{T}_{m,2011-2023}^{base,max}$$

Sedangkan untuk curah hujan digunakan koreksi multiplikatif dengan menghitung faktor skala bulanan:

$$F_{p,m} = \frac{\bar{P}_{m,2031-2040}^{CMIP6}}{\max(\bar{P}_{m,2011-2023}^{base}, \varepsilon)}$$

dengan $F_{p,m}$ adalah faktor skala curah hujan bulan ke- m (tak berdimensi), sedangkan ε adalah ambang kecil (1 mm/bulan) untuk mencegah rasio tidak realistis ketika $\bar{P}_{m,2011-2023}^{base}$ sangat kecil atau mendekati nol.

c) **Penyusunan data iklim skenario pada dua resolusi waktu (harian dan bulanan).**

Untuk kebutuhan simulasi hidrologi SWAT, yang menggunakan deret harian, faktor perubahan bulanan diterapkan pada deret harian observasi baseline. Untuk setiap hari ke- d yang berada pada bulan $m(d)$, temperatur harian skenario dihitung sebagai:

$$T_d^{min,scen} = T_d^{min,obs} + \Delta T_{m(d)}^{min}$$

$$T_d^{max,scen} = T_d^{max,obs} + \Delta T_{m(d)}^{max}$$

Curah hujan harian skenario dihitung dengan penskalaan multiplikatif:

$$P_d^{scen} = P_d^{obs} \times F_{P,m(d)}$$

Pendekatan ini mempertahankan urutan hari hujan dan hari kering pada baseline, sehingga hari tanpa hujan tetap bernilai nol, sementara intensitas hujan pada hari hujan diskalakan mengikuti faktor perubahan bulanan. Untuk kebutuhan CROPWAT dan input meteorologi QUAL2Kw, yang menggunakan deret bulanan, digunakan data iklim bulanan hasil penyesuaian delta sebagai berikut:

$$\bar{T}_m^{min,scen} = \bar{T}_m^{min,base} + \Delta T_m^{min}$$

$$\bar{T}_m^{max,scen} = \bar{T}_m^{max,base} + \Delta T_m^{max}$$

$$\bar{P}_m^{scen} = \bar{P}_m^{base} \times F_{P,m}$$

- d) **Pemeriksaan konsistensi.** Sebelum digunakan dalam simulasi, data iklim skenario diperiksa terhadap konsistensi satuan, kelengkapan periode, dan kewajaran nilai, misalnya tidak terdapat curah hujan negatif. Statistik bulanan dari deret harian skenario diverifikasi agar mendekati target $\bar{P}_m^{scen}$ dan $\bar{T}_m^{scen}$. Keterbatasan metode delta, khususnya karena tidak merepresentasikan perubahan varian dan ekstrem harian secara eksplisit akibat mempertahankan struktur kejadian harian baseline, dipertimbangkan dalam interpretasi hasil.

4.3.4.3. Analisis Neraca Air Lahan Sawah Berbasis Skenario Tahun 2036 (SWAT–CROPWAT)

Analisis neraca air lahan sawah pada Bab IV dilakukan dengan mempertahankan kerangka dan indikator yang telah dibangun pada Bab II, tetapi dengan mengganti input eksisting menjadi input skenario tahun 2036. Skenario tersebut mencakup peta LULC hasil proyeksi CA–ANN tahun 2036 dan iklim proyeksi CMIP6 SSP3–7.0 (horizon 2036) yang telah disiapkan menggunakan metode delta. Dengan pendekatan ini, perbedaan hasil antara baseline dan skenario 2036 dapat diatribusikan secara konsisten pada perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim. Alur analisis sebagai berikut:

- a) **Simulasi ketersediaan air menggunakan SWAT pada skenario 2036.** Simulasi SWAT pada Bab IV dijalankan dengan struktur model, parameter, dan konfigurasi yang mengacu pada Bab II, termasuk pengaturan periode simulasi, *warm-up*, dan konfigurasi HRU. Perubahan utama pada Bab IV adalah substitusi input sebagai berikut: (i) peta LULC eksisting diganti dengan peta LULC skenario 2036, dan (ii) input iklim harian diganti dengan deret iklim harian skenario hasil penerapan faktor delta bulanan pada baseline harian. Keluaran SWAT yang digunakan untuk membaca respons ketersediaan air pada skenario 2036 difokuskan pada komponen yang relevan untuk pasokan irigasi, yaitu hasil air (*WYLD*) sebagai proksi pasokan efektif ke aliran sungai, serta komponen pembentuknya berupa *surface runoff* (Q_{surf}), *lateral*

flow (Q_{lat}), dan *groundwater/baseflow* (Q_{gw}). Agregasi keluaran dilakukan konsisten dengan Bab II, yaitu dari skala harian ke bulanan, untuk mendukung pemadanan dengan kebutuhan irigasi dan analisis intra-musiman.

- b) **Perhitungan kebutuhan irigasi padi menggunakan CROPWAT pada skenario 2036.** Perhitungan kebutuhan air irigasi pada Bab IV menggunakan CROPWAT dengan input iklim bulanan skenario dan parameter agronomi serta kalender tanam yang sama dengan Bab II. Karena persamaan perhitungan ET_o , ET_c , P_{eff} , dan kebutuhan irigasi telah dijelaskan rinci pada Bab II, Bab IV memfokuskan pada *output* utama sebagai komponen permintaan air, yaitu *Net Irrigation Requirement (NIR)* sebagai kebutuhan irigasi bersih dan *Gross Irrigation Requirement (GIR)* sebagai kebutuhan irigasi kotor, dengan efisiensi irigasi mengikuti asumsi Bab II. Dengan demikian, perubahan *NIR* dan *GIR* pada skenario 2036 merepresentasikan respons kebutuhan irigasi terhadap perubahan iklim proyeksi tanpa mengubah asumsi agronomi dan efisiensi sistem.
- c) **Penyusunan neraca air dan indikator keandalan irigasi pada skenario 2036.** Neraca air lahan sawah pada Bab IV dihitung dengan rumus yang sama seperti Bab II, yaitu dengan memadankan ketersediaan air bulanan hasil SWAT terhadap kebutuhan irigasi bulanan hasil CROPWAT (*GIR*). Selanjutnya, evaluasi kinerja pemenuhan kebutuhan irigasi dilakukan menggunakan indikator yang juga telah ditetapkan pada Bab II, yaitu *Balance* sebagai selisih pasokan dan kebutuhan, *Irrigation Reliability Index (IRI)* untuk menangkap frekuensi terpenuhinya kebutuhan irigasi, dan *Irrigation Deficit Severity Index (IDSI)* untuk menangkap akumulasi besaran defisit. Seluruh indikator tersebut dihitung untuk kondisi baseline dan skenario 2036, kemudian dibandingkan untuk menilai perubahan tingkat kecukupan air dan risiko defisit intra-musiman pada periode tanam.
- d) **Kerangka perbandingan baseline–skenario 2036.** Analisis Bab IV menekankan perbandingan langsung antara baseline dan skenario 2036 pada tiga keluaran utama, yaitu: (i) perubahan komponen ketersediaan air, meliputi $WYLD$, Q_{surf} , Q_{lat} , dan Q_{gw} ; (ii) perubahan kebutuhan irigasi, meliputi *NIR* dan *GIR*; serta (iii) perubahan neraca air dan indikator keandalan, meliputi *Balance*, *IRI*, dan *IDSI*. Kerangka ini memastikan bahwa hasil proyeksi dapat ditafsirkan sebagai dampak gabungan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim pada horizon 2036 dalam mendukung pengelolaan irigasi padi di Sub-DAS Bila.

4.3.4.4. Analisis Proyeksi Kualitas Air Irigasi Berbasis Skenario Tahun 2036 (QUAL2Kw)

Analisis kualitas air pada Bab IV dilakukan dengan mempertahankan kerangka pemodelan, segmentasi sungai, serta parameter kinetika QUAL2Kw yang telah dibangun dan dievaluasi pada Bab III. Perubahan pada Bab IV berasal dari penggantian input eksisting menjadi input skenario 2036, yang dibangun dari: (i) peta LULC hasil proyeksi CA-ANN tahun 2036 dan (ii) iklim proyeksi CMIP6 SSP3–7.0 (horizon 2036) yang telah disiapkan melalui metode delta. Dalam konteks ini, baseline kualitas air tetap merujuk pada *snapshot synoptic* April 2024 pada Bab III, sehingga perbedaan hasil antara baseline dan skenario 2036 dapat diatribusikan secara konsisten pada pengaruh gabungan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim.

Skenario kualitas air yang digunakan adalah *Scenario Hydro–Climate + LULC Load*, yaitu: (a) debit sungai dan meteorologi mengikuti skenario 2036, serta (b) masukan lateral atau difus diskalakan mengikuti perubahan komposisi LULC pada sub-DAS kontributor tiap segmen. Dalam penelitian ini, penskalaan beban difus diperlakukan sebagai *first-order approximation* untuk menjaga ketertelusuran (*traceability*) antara perubahan LULC dan tekanan kualitas air pada skenario 2036, bukan untuk merekonstruksi secara rinci seluruh kompleksitas proses sumber difus di tingkat tapak. Dalam konfigurasi QUAL2Kw, variabel hidraulika yang digunakan adalah debit sungai hasil *routing* SWAT (*FLOW_OUT*) sebagai kondisi batas dan debit antarsegmen, sedangkan WYLD digunakan untuk interpretasi respons hidrologi DAS serta keterkaitannya dengan pasokan air pada analisis neraca air SWAT–CROPWAT. Alur analisis dijelaskan sebagai berikut:

- a) **Simulasi hidraulika dan meteorologi QUAL2Kw pada skenario 2036.** QUAL2Kw merupakan model satu-dimensi longitudinal dengan asumsi aliran tunak (*steady-state*). Oleh karena itu, proyeksi pada Bab IV dijalankan sebagai *snapshot* pada bulan yang sama dengan simulasi baseline Bab III, yaitu April, untuk menjaga keterbandingan baseline–skenario pada kondisi hidrologi dan meteorologi yang sebanding (Fernandez & Camacho, 2023). Input penggerak diganti menjadi kondisi skenario 2036 sebagai berikut:
 - **Debit skenario 2036 dari SWAT.** Debit hulu dan debit antarsegmen yang digunakan QUAL2Kw diturunkan dari keluaran SWAT skenario 2036 berupa debit sungai hasil *routing* (*FLOW_OUT*) pada subbasin yang dipetakan ke segmen (*reach*) QUAL2Kw. Untuk membentuk input tunak, *FLOW_OUT* harian pada April 2036 diagregasi menjadi debit representatif April, yaitu rerata harian April, dan digunakan sebagai kondisi batas hidraulika (*upstream boundary*) pada bagian hulu serta debit antarsegmen dalam QUAL2Kw. Debit skenario ini mengendalikan proses transport (adveksi–dispersi), waktu tempuh, dan kapasitas pengenceran pada tiap segmen. Komponen WYLD, Q_{surf} , Q_{lat} , dan Q_{gw} dianalisis sebagai pembentuk respons debit untuk kepentingan interpretasi mekanisme perubahan, tetapi input hidraulika QUAL2Kw menggunakan debit sungai (*FLOW_OUT*) sebagai variabel utama.
 - **Meteorologi skenario 2036 dari CMIP6.** Variabel meteorologi yang diperlukan pada QUAL2Kw untuk neraca panas dan koreksi temperatur laju reaksi, yaitu suhu udara, radiasi, kelembapan relatif, dan kecepatan angin, disusun untuk April 2036 dari data CMIP6 SSP3–7.0 yang telah disiapkan melalui metode delta. Dengan demikian, kondisi atmosfer pada simulasi skenario konsisten dengan *snapshot* hidraulika yang digunakan.
- b) **Prinsip penskalaan beban lateral difus berbasis LULC sebagai *first-order approximation*.** Pada Bab III, tekanan beban pencemar difus (W_i) direpresentasikan dalam QUAL2Kw sebagai masukan lateral atau *non-point source* pada tiap segmen, yang secara operasional dimasukkan sebagai konsentrasi masukan $C_{in,i,k}$ (mg/L) dan dikalibrasi melalui *inverse modeling* agar profil simulasi sesuai dengan observasi. Dalam konfigurasi penelitian ini, QUAL2Kw diperlakukan berbasis input konsentrasi (mg/L) pada lembar masukan, sehingga W_i dipahami sebagai tekanan beban yang diekspresikan melalui $C_{in,i,k}$. Pada Bab IV, masukan difus tersebut tidak dikalibrasi

ulang, tetapi diskalakan untuk merefleksikan perubahan komposisi LULC pada sub-DAS kontributor masing-masing segmen (Wang *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2023). Secara konseptual, hubungan antara konsentrasi masukan dan beban massa berdasarkan Pedretti *et al.* (2025) dan Williams *et al.* (2025) dapat dinyatakan sebagai:

$$W_{i,k} = Q_{in,i} \times C_{in,i,k}$$

dengan $W_{i,k}$ adalah beban massa lateral konstituen k pada segmen i ; $Q_{in,i}$ adalah debit masukan lateral pada segmen i ; dan $C_{in,i,k}$ adalah konsentrasi masukan lateral konstituen k pada segmen i (mg/L). Dalam penelitian ini, konsentrasi masukan lateral skenario dibentuk melalui penskalaan terhadap baseline:

$$C_{in,i,k}^{2036} = C_{in,i,k}^{base} \times SF_{i,k}$$

dengan $C_{in,i,k}^{2036}$ adalah konsentrasi masukan lateral konstituen k pada segmen i untuk skenario 2036 (mg/L), $C_{in,i,k}^{base}$ adalah konsentrasi masukan lateral baseline (mg/L) pada konfigurasi Bab III, dan $SF_{i,k}$ adalah faktor skala (tak berdimensi) akibat perubahan komposisi LULC pada sub-DAS kontributor segmen i . Berikut proses perhitungan skala per segmen dan perhitungan bobot tiap konstituen:

- **Pembentukan faktor skala berbasis komposisi LULC per segmen.** Setiap segmen i menerima kontribusi dari campuran kelas LULC pada sub-DAS kontributor, yaitu hutan, semak belukar, pertanian, dan permukiman. Untuk merepresentasikan perubahan tekanan beban difus akibat perubahan komposisi LULC, faktor skala $SF_{i,k}$ dibangun melalui indeks tekanan beban relatif berbobot luas (*area-weighted pressure index*). Pendekatan ini sejalan dengan kerangka *export coefficient* yang memetakan kontribusi beban non-titik sebagai gabungan berbobot luas dari koefisien relatif tiap kelas penggunaan/tutupan lahan (Wang *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2024), yang dinyatakan sebagai:

$$I_{i,k}^t = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_{j,k} A_{i,j}^t}{\sum_{j=1}^n A_{i,j}^t}$$

dengan $I_{i,k}^t$ adalah indeks tekanan beban relatif pada segmen i untuk konstituen k pada kondisi t (baseline atau 2036); $\alpha_{j,k}$ adalah bobot relatif kelas LULC j untuk konstituen k (tak berdimensi; Tabel 11); $A_{i,j}^t$ adalah luas (ha) kelas LULC j pada sub-DAS kontributor segmen i pada kondisi t ; dan n adalah jumlah kelas LULC. Faktor skala kemudian ditentukan sebagai rasio indeks skenario terhadap baseline:

$$SF_{i,k} = \frac{I_{i,k}^{2036}}{I_{i,k}^{base}}$$

Jika $SF_{i,k} > 1$ maka $C_{in,i,k}$ cenderung meningkat pada skenario 2036; jika $SF_{i,k} < 1$ maka $C_{in,i,k}$ cenderung menurun. Dengan formulasi ini, perubahan tekanan beban difus pada skenario 2036 dibaca sebagai pendekatan tingkat pertama (*first-order approximation*) yang menjaga keterlacakan terhadap baseline Bab III, sehingga arah perubahan kualitas air dapat dihubungkan secara eksplisit dengan perubahan komposisi LULC pada sub-DAS kontributor tiap segmen.

- **Bobot relatif per kelas LULC (α) untuk penskalaan beban difus.** Bobot $\alpha_{j,k}$ ditetapkan sebagai bobot relatif per kelas LULC untuk masing-masing konstituen dan dinormalisasi dengan hutan sebagai nilai acuan 1.000. Dengan demikian, bobot berfungsi sebagai faktor relatif lintas kelas dan kompatibel untuk perhitungan $SF_{i,k}$.

Tabel 11. Bobot relatif (α) berbasis kelas LULC untuk penskalaan beban difus skenario 2036.

Kelas LULC	(α BOD)	(α COD)	(α NO ₃ ⁻)	(α PO ₄ ³⁻)
Hutan	1.000	1.000	1.000	1.000
Semak Belukar	1.183	1.146	1.202	1.756
Pertanian (lahan kering + basah)	1.366	1.223	1.904	2.467
Permukiman	1.563	1.534	3.423	7.667

*Keterangan: α BOD digunakan sebagai proksi penskalaan beban organik karbon (CBODf), α COD untuk COD, α NO₃⁻ untuk nitrat, dan α PO₄³⁻ untuk fosfat. Nilai α dinormalisasi terhadap hutan agar berfungsi sebagai faktor relatif lintas kelas dan kompatibel untuk perhitungan $SF_{i,k}$. Bobot ini digunakan sebagai dasar penskalaan *first-order approximation*, bukan sebagai *export coefficient* absolut. Berdasarkan Borah & Bera (2004); Johnes (1996); Shrestha *et al.* (2008); Wang *et al.* (2020); Zhang *et al.* (2023), dimodifikasi oleh penulis.

Karena bobot per kelas untuk NH₄⁺ tidak selalu tersedia sebagai satu paket bersama BOD, COD, NO₃⁻, dan PO₄³⁻, maka konsentrasi masukan NH₄⁺ pada skenario diskalakan mengikuti faktor perubahan nitrogen terlarut (NO₃⁻) sebagai *first-order approximation* yang defensif untuk menjaga *traceability* antar-konstituen nitrogen, yaitu:

$$C_{in,i,NH4}^{2036} = C_{in,i,NH4}^{base} \times SF_{i,NO3}$$

Nilai $SF_{i,NO3}$ dihitung menggunakan bobot α NO₃⁻ pada Tabel 11. Sementara itu, karena ISS/TSS sangat dipengaruhi oleh respons erosi dan limpasan permukaan (*surface runoff*), penskalaan konsentrasi masukan ISS pada skenario 2036 diturunkan dari perubahan limpasan permukaan (Q_{surf}) hasil SWAT pada area kontributor segmen sebagai *first-order approximation* untuk menangkap arah perubahan tekanan sedimen difus, yaitu:

$$C_{in,i,ISS}^{2036} = C_{in,i,ISS}^{base} \times SF_{i,ISS}$$

$$SF_{i,ISS} = \frac{Qsurf_i^{2036}}{Qsurf_i^{base}}$$

dengan $Qsurf_i^t$ adalah limpasan permukaan pada area kontributor segmen i dari simulasi SWAT untuk kondisi t , yaitu baseline atau 2036. Dengan demikian, perubahan ISS pada skenario tidak dibaca sebagai estimasi absolut erosi-sedimen yang berdiri sendiri, tetapi sebagai pendekatan defensif untuk menautkan perubahan limpasan permukaan dan perubahan tekanan padatan tersuspensi pada skala segmen.

- c) **Simulasi QUAL2Kw dan evaluasi perubahan baseline–skenario.** Setelah debit sungai skenario (*FLOW_OUT* April 2036), meteorologi skenario (April 2036), serta konsentrasi masukan lateral skenario ($C_{in,i,k}^{2036}$) ditetapkan, QUAL2Kw dijalankan untuk menghasilkan profil longitudinal kualitas air pada setiap segmen. Parameter keluaran yang diekstraksi mencakup DO, pH, CBOD_f, COD, ISS, NH_4^+ , NO_3^- , dan PO_4^{3-} . Hasil Bab IV kemudian dianalisis sebagai perbandingan antara baseline, yaitu konfigurasi Bab III pada bulan yang sama, dan skenario April 2036, untuk mengidentifikasi arah dan besaran perubahan kualitas air, lokasi segmen kritis, serta keterkaitannya dengan perubahan kuantitas air (*FLOW_OUT*) dan perubahan tekanan beban difus berbasis LULC pada skenario yang sama. Evaluasi kelayakan kualitas air untuk irigasi dilakukan dengan kerangka yang sama seperti Bab III, yaitu mengacu pada PP 22 Tahun 2021.

4.4. Hasil dan Pembahasan

4.4.1. Dinamika Perubahan LULC dan Iklim pada Skenario 2036

4.4.1.1. Dinamika perubahan LULC baseline–2036

Peta LULC baseline tahun 2024 yang digunakan sebagai acuan pada Bab IV ditopang oleh akurasi klasifikasi yang tinggi. Pemetaan LULC multitemporal tahun 2012, 2018, dan 2024 disusun pada interval enam tahunan menggunakan algoritma *Maximum Likelihood Supervised Classification* (MLSC) dan dievaluasi secara konsisten dengan *plugin* AcATaMa menggunakan 30 titik validasi per kelas. Hasil penilaian menunjukkan *overall accuracy* (OA) sebesar 92,78% pada tahun 2012, 93,89% pada tahun 2018, dan 93,33% pada tahun 2024, dengan koefisien Kappa 0,91–0,92, yang menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat baik antara hasil klasifikasi dan data referensi (Tabel 12). Secara umum, nilai *user's accuracy* (UA) dan *producer's accuracy* (PA) cenderung tinggi pada kelas yang relatif homogen atau memiliki karakter spektral yang lebih tegas, seperti hutan, tubuh air, permukiman/lahan terbangun, dan pertanian lahan basah. Sebaliknya, nilai yang relatif lebih rendah pada kelas semak belukar dan pertanian lahan kering menunjukkan adanya potensi tumpang tindih spektral dan variasi fenologi yang lebih besar pada kelas-kelas tersebut (Phiri *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2024). Akurasi yang sedikit lebih rendah pada tahun 2012 secara teknis dapat dikaitkan dengan gangguan *scan-line corrector* (SLC-off) pada Landsat-7 ETM+ yang memengaruhi kualitas radiometrik citra (Adiyaman *et al.*, 2025). Sementara itu, pemetaan tahun 2024 yang memanfaatkan *Sentinel-2A MSI* berpotensi memberikan hasil yang lebih konsisten karena resolusi

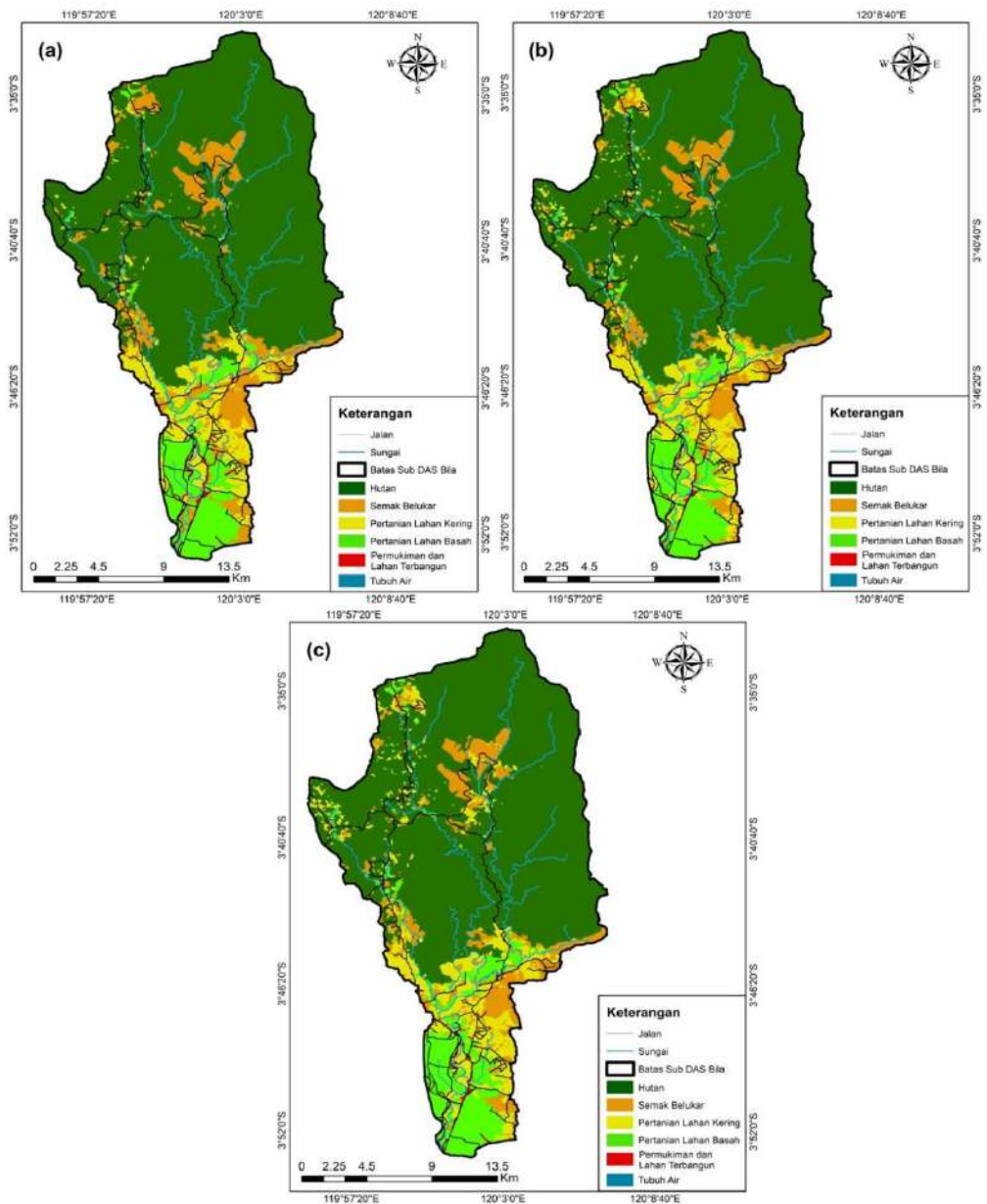
spasial yang lebih halus dan konfigurasi spektral yang lebih kaya, termasuk kanal *red-edge*, sehingga meningkatkan separabilitas kelas vegetasi dan mengurangi masalah piksel campuran pada lanskap mosaik pertanian (Chaves *et al.*, 2020). Secara metodologis, nilai Kappa yang konsisten tinggi menjadi indikator bahwa perubahan spasial yang terdeteksi lebih merefleksikan transformasi lahan yang nyata dibanding artefak klasifikasi (Pandey *et al.*, 2023). Dengan demikian, peta baseline LULC tahun 2024 dinilai cukup andal untuk digunakan sebagai acuan dalam penyusunan skenario perubahan lahan pada horizon 2036.

Tabel 12. Tingkat Akurasi Hasil Klasifikasi LULC tahun 2012, 2018, dan 2024

Kelas LULC	2012 UA (%)	2012 PA (%)	2018 UA (%)	2018 PA (%)	2024 UA (%)	2024 PA (%)
Hutan	86,67	92,86	90,00	96,43	90,00	96,43
Semak belukar	90,00	84,38	93,33	87,50	86,67	86,67
Pertanian lahan kering	96,67	85,29	96,67	85,29	96,67	85,29
Pertanian lahan basah	90,00	96,43	90,00	96,43	96,67	93,55
Permukiman/lahan terbangun	93,33	100,00	93,33	100,00	93,33	100,00
Tubuh air	100,00	100,00	100,00	100,00	96,67	100,00
Overall accuracy (%)	92,78		93,89		93,33	
Koefisien Kappa	0,91		0,92		0,92	

*Keterangan: UA = *user's accuracy*; PA = *producer's accuracy*; OA = *overall accuracy*.

Selama periode 2012–2024, komposisi LULC di Sub-DAS Bila menunjukkan kecenderungan pergeseran menuju lanskap yang semakin agro-dominan (Gambar 21; Tabel 13). Hutan tetap menjadi kelas dominan dengan proporsi lebih dari dua pertiga luas DAS, namun luasnya menurun dari 29.259,76 ha (69,81%) pada tahun 2012 menjadi 28.536,74 ha (68,08%) pada tahun 2024, atau kehilangan bersih 723,02 ha (–2,47%). Penurunan relatif terbesar terjadi pada kelas semak belukar yang berkurang 1.151,64 ha (–23,17%), dari 4.969,84 ha (11,86%) menjadi 3.818,20 ha (9,11%), yang menunjukkan bahwa vegetasi transisional ini menjadi sumber utama konversi menuju penggunaan lahan yang lebih intensif. Pada saat yang sama, lahan budidaya mengalami peningkatan, di mana pertanian lahan kering bertambah 1.038,49 ha (+28,07%) dari 3.699,80 ha (8,83%) menjadi 4.738,29 ha (11,30%), sedangkan pertanian lahan basah bertambah 688,92 ha (+20,06%) dari 3.433,50 ha (8,19%) menjadi 4.122,42 ha (9,84%). Permukiman/lahan terbangun juga meningkat 111,42 ha (+42,20%) dari 264,04 ha (0,63%) menjadi 375,46 ha (0,90%), sedangkan tubuh air meningkat tipis 35,83 ha (+12,44%) dari 287,92 ha (0,69%) menjadi 323,75 ha (0,77%). Pola ini menunjukkan bahwa perubahan lanskap dalam satu dekade terakhir terutama ditandai oleh penurunan vegetasi alami dan semialami yang berlangsung paralel dengan ekspansi lahan budidaya dan pertumbuhan area terbangun, sebagaimana banyak dilaporkan pada DAS tropis di Asia Tenggara (Hansen *et al.*, 2020; Mulyani *et al.*, 2022; Santoro *et al.*, 2023).



Gambar 21. Peta LULC Sub-DAS Bila tahun 2012 (a), 2018 (b), dan 2024 (c).

Secara spasial, perubahan tersebut cenderung terkonsentrasi pada zona yang lebih mudah diakses, terutama di sekitar jaringan jalan, permukiman, dan koridor sungai, sehingga area tepi hutan menjadi lebih rentan terhadap pembukaan lahan. Pola konversi berbasis aksesibilitas ini konsisten dengan temuan pada berbagai DAS tropis, di mana kedekatan terhadap jalan dan permukiman sering menjadi determinan penting perubahan penggunaan/tutupan lahan (Christiawan & Nguyen, 2024; Nugroho *et al.*, 2018). Hal ini menguatkan indikasi bahwa tekanan perubahan lahan di Sub-DAS Bila dikendalikan oleh kombinasi faktor aksesibilitas dan kebutuhan produksi, bukan oleh

perubahan yang bersifat acak. Implikasi ekologis dari transformasi menuju mosaik agro-permukiman ini penting karena umumnya diikuti oleh penurunan kapasitas regulasi hidrologi, peningkatan kerentanan erosi dan sedimentasi, serta penurunan konektivitas habitat (Gong *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2022; Sadhwani *et al.*, 2022; Tanaka *et al.*, 2021).

Tabel 13. Luas dan perubahan LULC Sub-DAS Bila periode 2012–2024

Kelas LULC	2012 Area (ha)	2012 (%)	2024 Area (ha)	2024 (%)	Perubahan (ha)	Perubahan (%)
Hutan	29.259,76	69,81	28.536,74	68,08	-723,02	-2,47
Semak belukar	4.969,84	11,86	3.818,20	9,11	-1.151,64	-23,17
Pertanian lahan kering	3.699,80	8,83	4.738,29	11,30	+1.038,49	+28,07
Pertanian lahan basah	3.433,50	8,19	4.122,42	9,84	+688,92	+20,06
Permukiman/lahan terbangun	264,04	0,63	375,46	0,90	+111,42	+42,20
Tubuh air	287,92	0,69	323,75	0,77	+35,83	+12,44
Total	41.914,86	100,00	41.914,86	100,00		

*Keterangan: perubahan 2012–2024 dinyatakan sebagai selisih luas, sedangkan perubahan relatif (%) dihitung terhadap luas pada tahun dasar, yaitu tahun 2012.

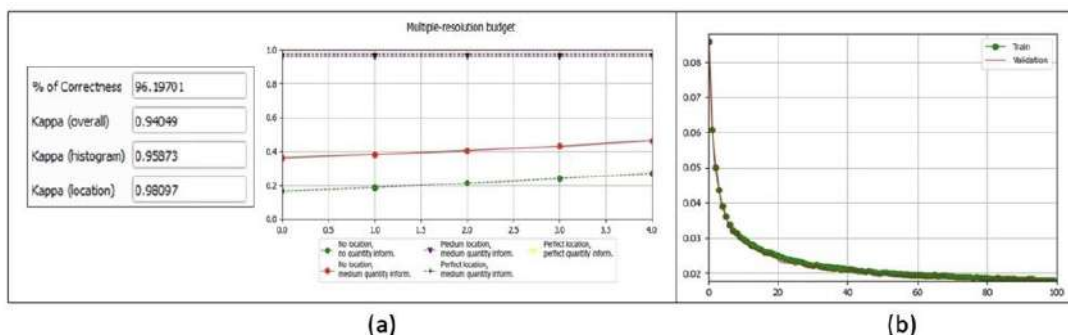


Gambar 22. Matriks korelasi *Pearson* antar-variabel pendorong spasial pada pemodelan LULC menggunakan MOLUSCE.

Untuk menyusun skenario LULC tahun 2036, pemodelan CA–ANN dioperasikan menggunakan lima variabel pendorong spasial yang merepresentasikan aksesibilitas dan kendali biofisik, yaitu jarak terhadap jalan (*DsTRoad*), permukiman (*DsTSettl*), sungai (*DsTRiver*), kemiringan lereng (*slope*), dan jarak terhadap fasilitas publik (*DsTPF*) (Gambar 22). Analisis korelasi *Pearson* menunjukkan hubungan positif yang kuat antara *DsTRoad* dan *DsTSettl* ($r = 0,872$), yang mengindikasikan bahwa dinamika perubahan penggunaan/tutupan lahan, baik berupa ekspansi budidaya maupun pertumbuhan lahan terbangun, cenderung terkonsentrasi pada zona dengan aksesibilitas tinggi. Korelasi sedang pada variabel lain menunjukkan bahwa faktor topografi dan hidrologi tetap berperan sebagai kendali sekunder yang koheren secara spasial, terutama melalui gradien dari kawasan hulu (*upland*) yang relatif lebih berhutan menuju dataran yang lebih

mudah diakses dan lebih intensif dibudidayakan. Pola aksesibilitas sebagai pendorong utama ini sejalan dengan berbagai studi pada DAS tropis, di mana kedekatan terhadap jalan dan permukiman merupakan determinan kuat konversi vegetasi menuju penggunaan/tutupan lahan produksi (Christiawan & Nguyen, 2024).

Kinerja proyeksi CA-ANN diverifikasi melalui simulasi ulang peta tahun 2024, dengan model belajar dari pasangan historis 2012–2018, kemudian dibandingkan dengan peta observasi tahun 2024. Hasil validasi menunjukkan performa yang sangat baik, dengan $K_{overall} = 0,94$, $K_{location} = 0,98$, $K_{histogram} = 0,96$, dan $OA = 96,19\%$ (Gambar 23). Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi model memadai untuk mereplikasi pola perubahan penggunaan/tutupan lahan yang kompleks dan nonlinier pada lanskap tropis (Abbas *et al.*, 2021; Blissag *et al.*, 2024). Selain itu, *Neural Network Learning Curve* (NNLC) memperlihatkan perbedaan yang minimal antara galat pelatihan dan galat validasi, yang menunjukkan proses pembelajaran yang stabil dan kemampuan generalisasi model yang baik (Din & Yamamoto, 2024). Berdasarkan hasil validasi tersebut, peta proyeksi tahun 2036 diperlakukan sebagai representasi spasial skenario *business-as-usual* yang layak untuk dianalisis lebih lanjut pada Bab IV.



Gambar 23. Hasil validasi model CA-ANN: (a) metrik validasi simulasi ulang peta 2024; (b) *Neural Network Learning Curve* (NNLC) untuk proyeksi 2036.

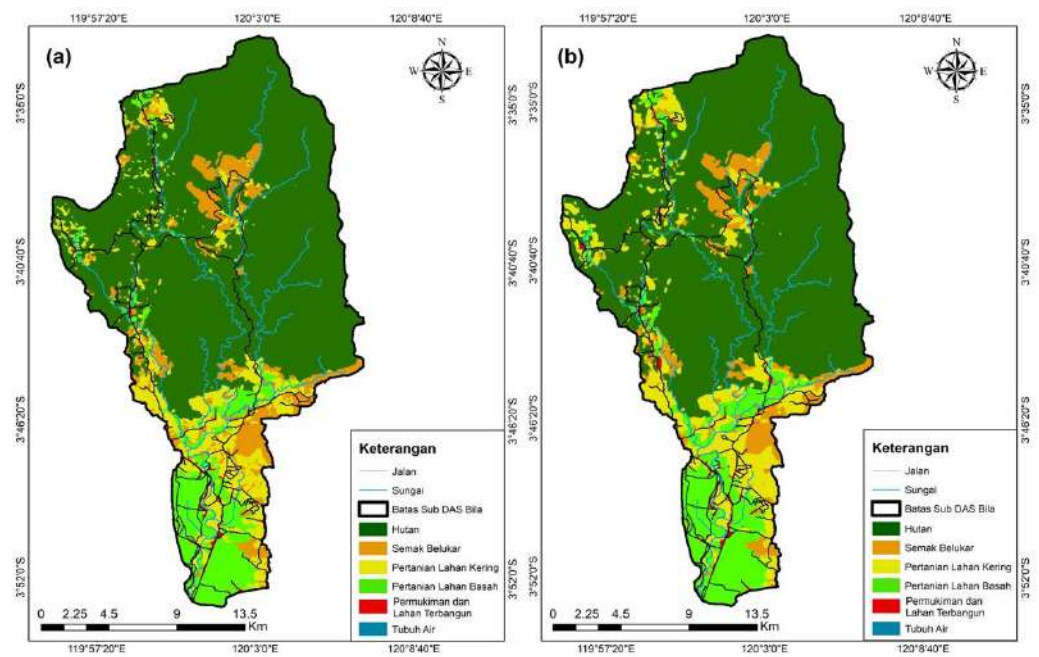
Secara kuantitatif, perubahan komposisi LULC dari baseline 2024 menuju skenario 2036 didominasi oleh penurunan tutupan vegetasi alami dan semialami serta peningkatan lahan budidaya (Tabel 14; Gambar 24). Luas hutan diproyeksikan menurun dari 28.536,74 ha menjadi 27.725,98 ha, atau berkurang 810,76 ha (−2,84%), dengan proporsi turun dari 68,08% menjadi 66,15%. Semak belukar menurun dari 3.818,20 ha menjadi 3.175,31 ha, atau berkurang 642,89 ha (−16,84%), dengan proporsi turun dari 9,11% menjadi 7,58%. Sebaliknya, pertanian lahan kering meningkat sebesar 682,87 ha (+14,41%) dari 4.738,29 ha menjadi 5.421,16 ha, sedangkan pertanian lahan basah meningkat sebesar 728,45 ha (+17,67%) dari 4.122,42 ha menjadi 4.850,87 ha. Permukiman/lahan terbangun meningkat sebesar 74,42 ha (+19,82%) dari 375,46 ha menjadi 449,88 ha. Tubuh air menurun kecil dari 323,75 ha menjadi 291,66 ha, atau berkurang 32,09 ha (−9,91%). Pola ini menegaskan bahwa pada horizon proyeksi, lanskap Sub-DAS Bila bergerak menuju mosaik yang semakin didominasi oleh aktivitas budidaya (agro-dominan), sejalan dengan kecenderungan umum pada DAS di Asia

Tenggara ketika ekspansi pertanian menjadi penggerak utama perubahan penggunaan/tutupan lahan (Hansen *et al.*, 2020; Santoro *et al.*, 2023).

Tabel 14. Luas LULC baseline 2024 dan proyeksi skenario 2036 pada Sub-DAS Bila.

Kelas LULC	2024 Area (ha)	2024 (%)	2036 Area (ha)	2036 (%)	Perubahan (ha)	Perubahan (%)
Hutan	28.536,74	68,08	27.725,98	66,15	-810,76	-2,84
Semak belukar	3.818,20	9,11	3.175,31	7,58	-642,89	-16,84
Pertanian lahan kering	4.738,29	11,30	5.421,16	12,93	+682,87	+14,41
Pertanian lahan basah	4.122,42	9,84	4.850,87	11,57	+728,45	+17,67
Permukiman/lahan terbangun	375,46	0,90	449,88	1,07	+74,42	+19,82
Tubuh air	323,75	0,77	291,66	0,70	-32,09	-9,91
Total	41.914,86	100,00	41.914,86	100,00		

*Keterangan: perubahan 2024–2036 dinyatakan sebagai selisih luas, sedangkan perubahan relatif (%) dihitung terhadap luas pada tahun dasar, yaitu tahun 2024.



Gambar 24. Peta LULC baseline 2024 (a) dan peta LULC proyeksi skenario 2036 (b) pada Sub-DAS Bila.

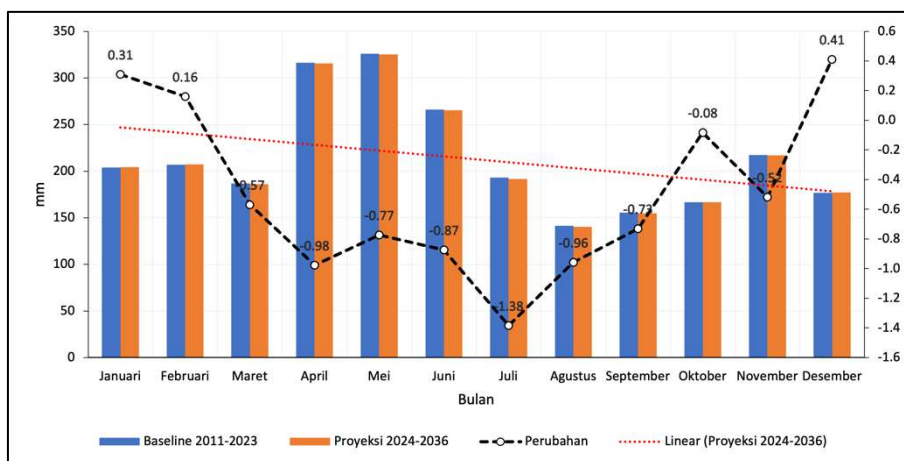
Temuan ini konsisten dengan Biswas *et al.* (2023) dan Mendoza-Ponce *et al.* (2021) yang menekankan adanya proses ganda pada DAS tropis yang sedang bertransformasi, yaitu konversi vegetasi yang berlangsung bersamaan dengan intensifikasi budidaya sebagai respons terhadap dinamika sosial-ekonomi dan kebutuhan produksi. Secara spasial, zona perubahan paling aktif terkonsentrasi pada bagian hulu dan tengah DAS, terutama pada area yang dekat dengan jaringan jalan dan koridor sungai, sehingga pola perubahan memperlihatkan karakter *accessibility-driven*

land conversion (Leta *et al.*, 2021; Putra *et al.*, 2025). Implikasi ekologis dari pola ini menimbulkan dampak substansial karena substitusi vegetasi oleh lanskap produksi umumnya diikuti oleh penurunan kapasitas regulasi hidrologi, stabilitas tanah, dan konektivitas biodiversitas (Gong *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2022). Dalam rantai pemodelan pada Bab IV, dinamika LULC 2024–2036 ini dipandang berpotensi memodifikasi respons hidrologi sekaligus meningkatkan tekanan beban difus dari lanskap budidaya dan permukiman/lahan terbangun, yang selanjutnya termanifestasi pada perubahan neraca air lahan sawah dan kualitas air irigasi pada skenario tahun 2036.

4.4.1.2. Perubahan karakter iklim SSP3–7.0 menuju 2036

Sinyal perubahan iklim pada Bab IV diturunkan dari skenario SSP3–7.0 (CMIP6) dan diterapkan menggunakan pendekatan *delta change* agar perbandingan baseline–skenario tetap konsisten dengan statistik iklim observasi setempat. Dengan pendekatan ini, yang dianalisis bukan nilai absolut keluaran model mentah, melainkan pergeseran statistik bulanan yang relevan bagi evaluasi neraca air dan operasi irigasi. Oleh karena itu, interpretasi difokuskan pada arah dan besaran perubahan iklim yang dapat memengaruhi ketersediaan air, kebutuhan irigasi, dan kondisi kualitas air pada horizon 2036.

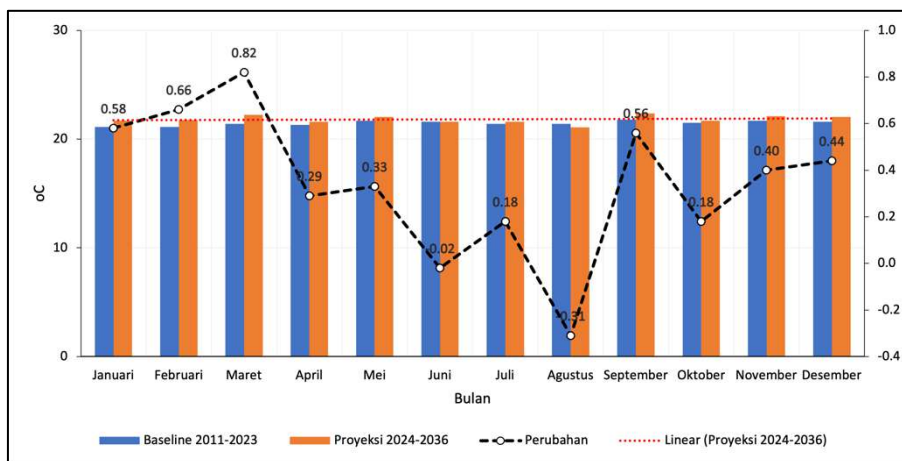
Presipitasi menunjukkan perubahan yang sangat kecil, dengan pola musiman yang relatif tetap bertahan (Gambar 25). Total presipitasi tahunan menurun tipis dari 2.556,76 mm/tahun pada baseline 2011–2023 menjadi 2.550,77 mm/tahun pada skenario 2036, atau berkurang 5,98 mm/tahun (–0,23%). Secara intra-musiman, puncak hujan tetap terjadi pada April–Mei dengan nilai lebih dari 315 mm/bulan, sedangkan periode relatif kering tetap berada pada Agustus–Oktober dengan kisaran sekitar 140–167 mm/bulan.



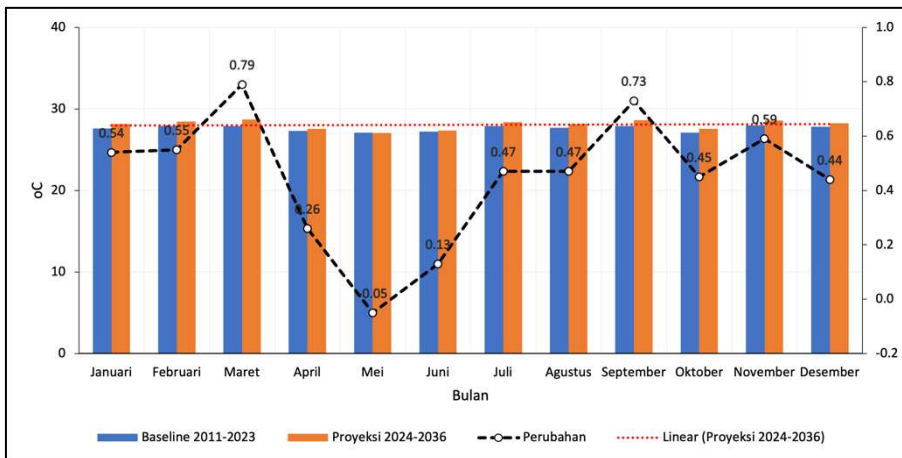
Gambar 25. Presipitasi (P) bulanan baseline (2011–2023) dan skenario horizon 2036 (CMIP6 SSP3–7.0; jendela 2031–2040) di Sub-DAS Bila, serta perubahan bulanan (ΔP).

Apabila ditinjau lebih rinci, perubahan bulanan didominasi oleh penurunan kecil pada Maret–November, dengan penurunan terbesar pada Juli (−1,39 mm/bulan) dan Agustus (−0,96 mm/bulan), sementara kenaikan kecil hanya terjadi pada Januari (+0,31 mm/bulan), Februari (+0,16 mm/bulan), dan Desember (+0,41 mm/bulan). Secara agregat musiman, presipitasi pada Oktober–Maret nyaris tidak berubah, dengan selisih sekitar −0,28 mm atau −0,02%, sedangkan pada April–September sedikit menurun, dengan selisih sekitar −5,70 mm atau −0,41%. Pola ini menunjukkan bahwa pada horizon dekat (2036), sinyal perubahan presipitasi di wilayah studi cenderung lemah, sehingga dinamika risiko ketersediaan air lebih sensitif terhadap komponen lain, seperti menguatnya *atmospheric evaporative demand* akibat pemanasan iklim dan modifikasi respons hidrologi akibat perubahan LULC (Karimzadeh *et al.*, 2025; Valencia *et al.*, 2024).

Berbeda dengan presipitasi, temperatur memperlihatkan sinyal pemanasan yang lebih konsisten (Gambar 26–27). Temperatur minimum (T_{min}) meningkat pada hampir semua bulan, dengan kenaikan terbesar terjadi pada Maret (+0,82 °C), Februari (+0,66 °C), Januari (+0,58 °C), dan September (+0,56 °C), meskipun terdapat pengecualian kecil pada Juni (−0,02 °C) dan Agustus (−0,31 °C). Secara rata-rata tahunan, T_{min} meningkat dari 21,47 °C menjadi 21,81 °C, atau bertambah sekitar 0,34 °C. Temperatur maksimum (T_{max}) juga meningkat relatif seragam, terutama pada Maret (+0,79 °C) dan September (+0,73 °C), dengan rata-rata tahunan naik dari 27,62 °C menjadi 28,06 °C, atau bertambah sekitar 0,45 °C. Pola ini sejalan dengan sintesis CMIP6 yang menunjukkan bahwa sinyal pemanasan umumnya lebih jelas dan lebih konsisten antar-model dibandingkan sinyal perubahan presipitasi pada horizon dekat hingga menengah, sementara presipitasi cenderung menunjukkan ketidakpastian spasial dan variabilitas yang lebih tinggi (Lee *et al.*, 2021).



Gambar 26. Temperatur minimum (T_{min}) bulanan baseline (2011–2023) dan skenario horizon 2036 (CMIP6 SSP3–7.0; jendela 2031–2040) di Sub-DAS Bila, serta perubahan bulanan (ΔT_{min}).



Gambar 27. Temperatur maksimum (T_{max}) bulanan baseline (2011–2023) dan skenario horizon 2036 (CMIP6 SSP3–7.0; jendela 2031–2040) di Sub-DAS Bila, serta perubahan bulanan (ΔT_{max}).

Dalam konteks neraca air, kenaikan temperatur ini memiliki implikasi kritis karena berpotensi meningkatkan permintaan evaporatif atmosfer (*atmospheric evaporative demand*) dan, pada kondisi tertentu, mendorong kenaikan evapotranspirasi, sehingga kebutuhan air irigasi dapat meningkat meskipun presipitasi tahunan tidak berubah secara berarti (Gulakhmadov *et al.*, 2025). Dari sudut pandang kualitas air, peningkatan suhu udara juga relevan karena dapat memengaruhi suhu air sungai melalui neraca panas, menurunkan kapasitas kejenuhan oksigen terlarut, serta mempercepat laju proses biogeokimia yang mengonsumsi oksigen (Johnson *et al.*, 2024). Dengan demikian, pada horizon 2036 sinyal iklim pada Sub-DAS Bila lebih tepat dimaknai sebagai penguat proses daripada pengubah total pasokan tahunan secara drastis. Presipitasi tahunan tetap relatif stabil, tetapi kenaikan T_{min} dan T_{max} menunjukkan bahwa tekanan iklim bergerak melalui penguatan *evaporative demand*, potensi peningkatan ET_o dan ET_c , serta perubahan kondisi termal yang dapat memengaruhi kualitas air sungai. Dalam kerangka Bab IV, iklim karena itu diposisikan sebagai penggerak yang memperbesar tekanan musiman, sedangkan perubahan LULC memodifikasi struktur lanskap dan tekanan beban difus. Kombinasi keduanya menjadi dasar utama untuk menafsirkan perubahan neraca air lahan sawah dan kualitas air irigasi pada horizon 2036.

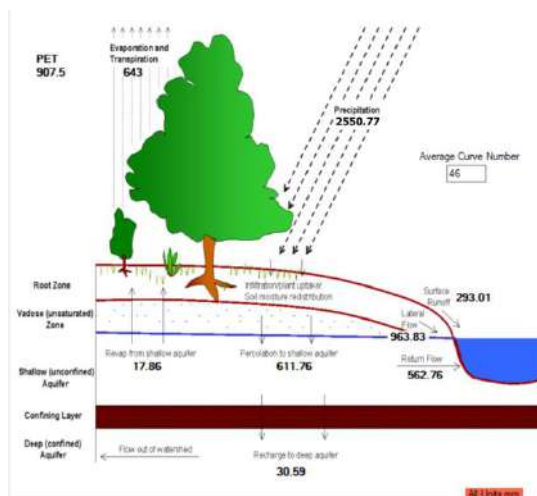
4.4.2. Proyeksi Neraca Air Lahan Sawah pada Skenario 2036 (SWAT–CROPWAT)

4.4.2.1. Respons hidrologi Sub-DAS Bila pada skenario 2036 (hasil SWAT)

Simulasi SWAT pada skenario horizon 2036 menunjukkan bahwa Sub-DAS Bila tetap berada pada rezim hidrologi lembap, dengan curah hujan tahunan sebesar 2.550,77 mm/tahun. Dari jumlah tersebut, total hasil air ($WYLD$) mencapai 1.849,85 mm/tahun, atau sekitar 72,52% dari presipitasi tahunan. Besarnya $WYLD$ ini menunjukkan bahwa porsi air yang menjadi *blue-water output*, yaitu air yang tersedia sebagai aliran sungai pada skala DAS, masih tetap tinggi. Dengan demikian, secara

kuantitatif kapasitas penyediaan air permukaan untuk pemanfaatan di wilayah hilir, termasuk untuk irigasi, masih tergolong kuat pada horizon proyeksi 2036 (Ershadfath *et al.*, 2024).

Komposisi pembentuk WYLD memperlihatkan dominasi proses bawah permukaan. Aliran lateral (Q_{lat}) sebesar 963,83 mm/tahun, atau 52,10% dari total WYLD, menjadi komponen utama, diikuti oleh aliran air tanah dangkal ($Q_{gw-shallow}$) sebesar 562,76 mm/tahun, atau 30,42%. Sementara itu, kontribusi limpasan permukaan (Q_{surf}) sebesar 293,01 mm/tahun, atau 15,84%, dan aliran air tanah dalam ($Q_{gw-deep}$) sebesar 30,26 mm/tahun, atau 1,64%, relatif lebih kecil (Gambar 28). Pola ini menegaskan bahwa sistem hidrologi Sub-DAS Bila pada skenario 2036 masih sangat ditopang oleh kontribusi aliran bawah permukaan dan pelepasan air tanah dangkal. Dominasi komponen ini menunjukkan bahwa kontinuitas aliran sungai tidak hanya bergantung pada limpasan cepat akibat hujan, tetapi juga pada mekanisme pelepasan simpanan air yang lebih lambat dan lebih stabil, yang berperan sebagai penyangga hidrologi pada periode transisi ketika curah hujan menurun dan kebutuhan air irigasi meningkat (Macalam *et al.*, 2025).



Gambar 28. Ringkasan komponen neraca air tahunan hasil simulasi SWAT pada skenario horizon 2036 di Sub-DAS Bila

Berdasarkan aspek kebutuhan atmosferik, volume evapotranspirasi aktual (ET) berada pada angka 643,00 mm/tahun dengan evapotranspirasi potensial (PET) sebesar 907,50 mm/tahun, yang membentuk rasio ET/PET sebesar 70,85%. Kinerja rasio ini menandakan bahwa *atmospheric evaporative demand* pada horizon 2036 tergolong intensif, namun kapasitas sistem masih memadai untuk menyuplai sebagian besar kebutuhan energi dan air ekosistem. Dalam pemenuhan irigasi padi, indikasi ini implikatif karena tren pemanasan horizon 2036 berpeluang mengaselerasi kebutuhan evaporatif (*evaporative demand*) yang berujung pada peningkatan nilai ET_o dan ET_c . Konsekuensinya, kebutuhan air irigasi berpotensi melonjak pada bulan-bulan spesifik meskipun variasi presipitasi tahunan tidak mengalami perubahan yang signifikan (Williams & Abatzoglou, 2025). Dengan demikian, karakterisasi respons hidrologi Sub-DAS Bila di bawah skenario 2036 bukan sekadar bertumpu pada kuantitas curah hujan

dan WYLD, melainkan pada pola hubungan antara bertahannya pasokan air tahunan dan amplifikasi cekaman atmosferik yang mampu mereduksi margin kecukupan air pada level intramusiman.

Secara keseluruhan, hasil simulasi SWAT menunjukkan bahwa pada horizon 2036 Sub-DAS Bila masih memiliki basis pasokan air yang kuat pada skala tahunan. Namun, dominasi aliran lateral dan air tanah dangkal sekaligus menunjukkan bahwa respons sistem sangat bergantung pada kestabilan proses infiltrasi, penyimpanan, dan pelepasan bawah permukaan. Dengan demikian, perubahan penggunaan/tutupan lahan yang mengurangi kapasitas regulasi hidrologi, bersamaan dengan sinyal pemanasan yang meningkatkan kebutuhan evaporatif, berpotensi tidak langsung menurunkan pasokan tahunan secara drastis, tetapi dapat mengubah distribusi temporal ketersediaan air yang sangat penting bagi sistem irigasi padi.

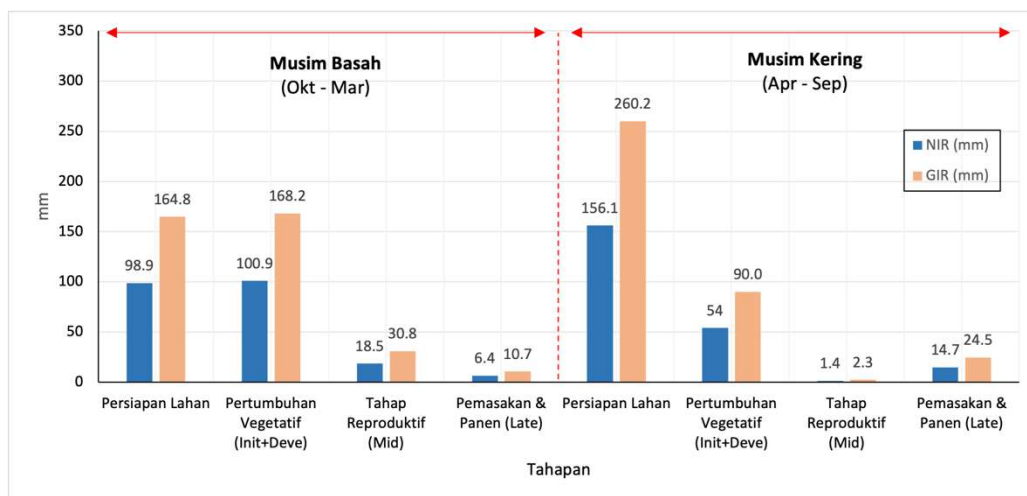
4.4.2.2. Kebutuhan irigasi padi pada skenario 2036 (hasil CROPWAT)

Hasil perhitungan CROPWAT menunjukkan bahwa total kebutuhan irigasi bersih (*Net Irrigation Requirement*, NIR) pada skenario 2036 mencapai 450,90 mm/tahun, sedangkan kebutuhan irigasi kotor (*Gross Irrigation Requirement*, GIR) mencapai 751,50 mm/tahun. Dalam penelitian ini, GIR dihitung dari NIR dengan mempertimbangkan efisiensi sistem irigasi sebesar $\eta = 0,60$, sehingga rasio $NIR/GIR = 0,60$ merefleksikan adanya kehilangan atau inefisiensi pada proses penyaluran dan aplikasi air di tingkat sistem, konsisten dengan asumsi yang digunakan pada Bab II. Dengan demikian, perubahan atau ketegangan neraca air pada Bab IV terutama ditentukan oleh kombinasi sinyal iklim yang memengaruhi NIR serta dinamika pasokan hidrologi yang tercermin pada WYLD, bukan oleh perubahan parameter efisiensi sistem.

Secara musiman, kebutuhan irigasi relatif seimbang antara dua musim tanam (Gambar 29). Pada musim hujan, yaitu Oktober sampai Maret, NIR tercatat sebesar 224,70 mm dengan GIR 374,50 mm. Sementara itu, pada musim kemarau, yaitu April sampai September, NIR sebesar 226,20 mm dengan GIR 377,00 mm. Kedekatan nilai kebutuhan antar-musim ini menunjukkan bahwa tekanan terhadap sistem irigasi pada horizon 2036 tidak semata ditentukan oleh perbedaan total hujan antar-musim, tetapi lebih dipengaruhi oleh distribusi kebutuhan air pada fase pertumbuhan tanaman dan keterpaduannya dengan pola pasokan air bulanan.

Meskipun total kebutuhan musiman relatif setara, distribusi kebutuhan antar-tahap pertumbuhan menunjukkan pola yang sangat terkonsentrasi. Pada musim kemarau, kebutuhan terbesar terjadi pada fase persiapan lahan (*land preparation*), dengan NIR sebesar 156,10 mm dan GIR sebesar 260,20 mm. Pada musim hujan, kebutuhan terbesar juga muncul pada fase *land preparation* dengan GIR 164,80 mm, diikuti oleh fase pertumbuhan vegetatif (*vegetative growth*) dengan GIR 168,20 mm. Pola ini menunjukkan bahwa tekanan kebutuhan air irigasi tidak tersebar merata sepanjang musim tanam, melainkan terkonsentrasi pada fase awal musim tanam, terutama saat persiapan lahan dan pertumbuhan vegetatif awal. Oleh karena itu, risiko defisit pada sistem irigasi tidak terutama muncul karena “total tahunan kurang”, melainkan karena ketidakselarasan waktu antara puncak kebutuhan air pada fase-fase kritis tersebut dan pola pasokan air bulanan yang tidak selalu mencapai nilai optimum pada periode yang sama. Pola temporal *mismatch* semacam ini juga dilaporkan dalam kajian Hou *et al.*

(2025), yang menunjukkan bahwa pasokan irigasi sering tidak berada pada fase yang sama dengan puncak kebutuhan air tanaman, sehingga defisit dapat tetap muncul secara musiman meskipun ketersediaan air agregat tahunan terlihat memadai. Dalam konteks Sub-DAS Bila, hasil CROPWAT menegaskan bahwa kebutuhan air irigasi pada horizon 2036 tetap sangat ditentukan oleh fase budidaya, terutama pada awal musim tanam, sehingga evaluasi kecukupan air perlu dilakukan pada skala intra-musiman, bukan hanya pada skala tahunan atau musiman agregat. Dengan demikian, hasil perhitungan CROPWAT menunjukkan bahwa pada skenario 2036 kebutuhan air irigasi padi tetap berada pada tingkat yang tinggi, dengan tekanan utama terkonsentrasi pada fase persiapan lahan dan pertumbuhan awal.



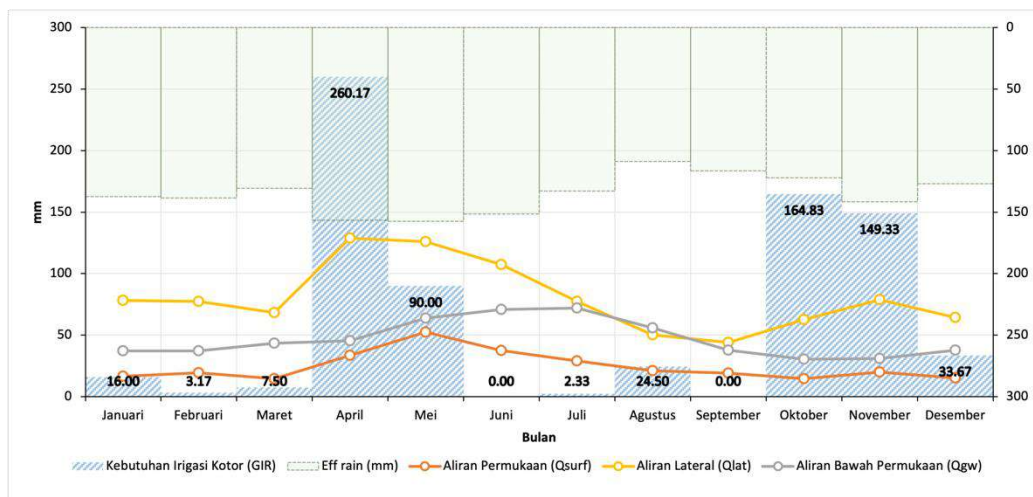
Gambar 29. Kebutuhan air irigasi padi per tahap pertumbuhan pada skenario horizon 2036 berdasarkan CROPWAT (*NIR* dan *GIR*).

4.4.2.3. Neraca air bulanan pasokan-kebutuhan dan periode kritis (*WYLD* vs *GIR*)

Perbandingan antara pasokan bulanan hasil simulasi SWAT, yang direpresentasikan oleh hasil air (*WYLD*), dan kebutuhan irigasi kotor hasil CROPWAT (*gross irrigation requirement, GIR*) menunjukkan bahwa secara agregat tahunan sistem masih berada pada kondisi surplus. Total *WYLD* sebesar 1.849,85 mm/tahun jauh lebih besar dibandingkan total *GIR* sebesar 751,50 mm/tahun, sehingga secara tahunan tersedia surplus sekitar 1.098,35 mm. Namun demikian, pembacaan pada skala bulanan memperlihatkan bahwa surplus tahunan tersebut tidak terdistribusi merata sepanjang tahun. Pada beberapa bulan tertentu, terutama ketika kebutuhan irigasi mencapai puncaknya, pasokan efektif air tetap tidak mampu menutup kebutuhan pada bulan yang sama. Kondisi ini menunjukkan bahwa masalah utama pada horizon 2036 bukan terletak pada kekurangan pasokan tahunan, melainkan pada ketidakselarasan waktu antara pasokan dan kebutuhan air irigasi.

Pada skenario 2036, defisit air terjadi pada tiga bulan, yaitu April, Oktober, dan November (Gambar 30). Pada bulan April, *WYLD* sebesar 210,09 mm lebih rendah daripada *GIR* sebesar 260,17 mm, sehingga terjadi defisit 50,08 mm, atau sekitar

19,26% dari kebutuhan bulan tersebut. Pada bulan Oktober, defisit menjadi lebih besar secara relatif, ketika *WYLD* sebesar 110,20 mm tidak mampu menutup *GIR* sebesar 164,83 mm, sehingga menghasilkan defisit 54,63 mm, atau sekitar 33,13% dari kebutuhan Oktober. Defisit berlanjut pada bulan November, meskipun dengan besaran yang lebih kecil, ketika *WYLD* sebesar 131,89 mm lebih rendah daripada *GIR* sebesar 149,33 mm, sehingga terjadi defisit 17,44 mm, atau sekitar 11,66% dari kebutuhan November. Akumulasi defisit tahunan yang berasal dari ketiga bulan negatif tersebut mencapai 122,12 mm, atau sekitar 16,25% dari total *GIR* tahunan. Dengan demikian, isu utama pada horizon 2036 adalah ketidakselarasan temporal antara pasokan dan kebutuhan (*timing mismatch*), yaitu ketika puncak kebutuhan air tidak berada pada fase yang sama dengan kapasitas pasokan efektif bulanan.



Gambar 30. Dinamika bulanan komponen pasokan air hasil SWAT dan kebutuhan irigasi kotor (*GIR*) hasil CROPWAT pada skenario horizon 2036 (SWAT-CROPWAT).

Secara hidrologis, defisit ini menunjukkan indikasi kritis karena tidak terjadi pada bulan dengan *WYLD* terendah (September), melainkan pada bulan-bulan ketika kebutuhan air irigasi (*GIR*) berada pada tingkat tertinggi. Bulan April merepresentasikan puncak kebutuhan akibat fase persiapan lahan (*land preparation*) pada awal musim tanam kemarau, ketika *GIR* mencapai 260,20 mm. Meskipun pasokan *WYLD* pada April tergolong relatif tinggi, yaitu 210,09 mm, nilainya tetap belum cukup untuk menutup lonjakan kebutuhan tersebut. Sementara itu, Oktober dan November merepresentasikan fase awal musim tanam hujan, ketika kebutuhan air kembali meningkat untuk persiapan lahan dan pertumbuhan awal, tetapi pasokan sungai masih berada pada tingkat sedang hingga rendah. Kondisi ini membuktikan bahwa ketersediaan air pada skala tahunan tidak otomatis menjamin terpenuhinya kebutuhan air pada jendela waktu budidaya yang paling sensitif.

Secara proses, pola ini konsisten dengan karakteristik sistem monsun, khususnya pada fase transisi musim. Pada awal musim hujan, peningkatan curah hujan tidak selalu langsung diikuti oleh peningkatan debit sungai yang memadai karena

respons aliran masih banyak dipengaruhi oleh pelepasan simpanan bawah permukaan, perkembangan konektivitas hidrologi antara tanah, air tanah, dan saluran (*soil-groundwater-channel*), serta waktu yang diperlukan untuk membangun kembali aliran yang efektif di sistem sungai (Bhagat *et al.*, 2021; Cui & Tian, 2025). Dengan demikian, pasokan air pada periode transisi dapat tetap berada pada tingkat sedang hingga rendah meskipun hujan mulai meningkat. Kondisi ini menjelaskan mengapa defisit justru muncul pada awal musim tanam, ketika kebutuhan air irigasi berada pada puncaknya, khususnya pada fase persiapan lahan dan awal pertumbuhan vegetatif.

Temuan ini menunjukkan bahwa pembacaan neraca air berbasis agregat tahunan saja tidak cukup untuk menjelaskan kerentanan sistem irigasi. Pada horizon 2036, tantangan pengelolaan irigasi terutama terkonsentrasi pada tiga bulan kritis, yaitu April, Oktober, dan November, karena ketiganya beririsan langsung dengan fase-fase budidaya yang menentukan keberhasilan musim tanam. Dengan demikian, strategi adaptasi tidak cukup diarahkan pada peningkatan pasokan tahunan secara umum, tetapi harus difokuskan pada penguatan reliabilitas pasokan dan penyesuaian pengelolaan air pada bulan-bulan kritis tersebut.

4.4.2.4. Keandalan pemenuhan irigasi: *IRI* dan *IDS*

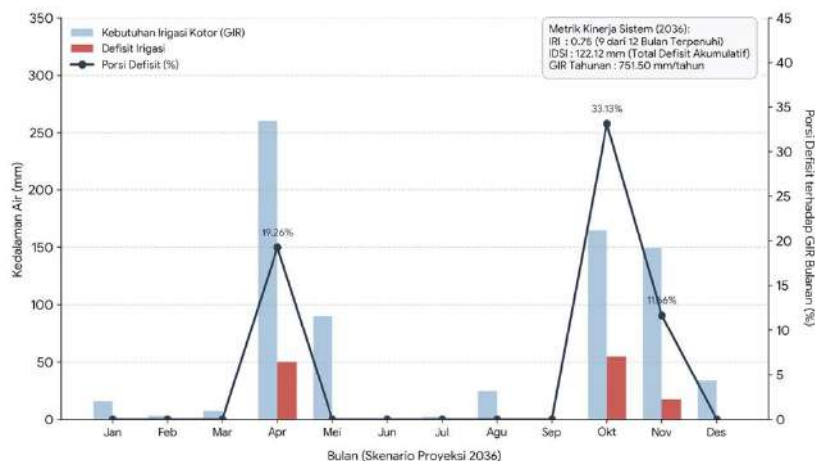
Evaluasi keandalan pemenuhan irigasi pada skenario 2036 dilakukan menggunakan dua indikator yang telah digunakan pada Bab II, yaitu *Irrigation Reliability Index (IRI)* untuk menangkap frekuensi terpenuhinya kebutuhan irigasi, serta *Irrigation Deficit Severity Index (IDS)* untuk menangkap tingkat keparahan defisit ketika kebutuhan tidak terpenuhi. Dengan kerangka ini, kinerja sistem irigasi tidak hanya dinilai dari ada atau tidaknya defisit, tetapi juga dari seberapa sering defisit terjadi dan seberapa besar defisit tersebut pada bulan-bulan yang memerlukan air irigasi.

Berdasarkan neraca air bulanan, *GIR* pada skenario 2036 muncul pada sepuluh bulan, yaitu Januari, Februari, Maret, April, Mei, Juli, Agustus, Oktober, November, dan Desember (Gambar 31). Dari bulan-bulan tersebut, pasokan *WYLD* mampu memenuhi kebutuhan irigasi ($WYLD \geq GIR$) pada tujuh bulan, sedangkan tiga bulan lainnya mengalami defisit ($WYLD < GIR$), yaitu April, Oktober, dan November. Dengan demikian, nilai *IRI* pada skenario 2036 adalah sekitar 0,75. Nilai ini menunjukkan bahwa secara operasional sistem mampu memenuhi kebutuhan irigasi pada sekitar 75% bulan yang memerlukan air, tetapi masih mengalami kegagalan layanan pada sekitar 25% bulan. Temuan ini menegaskan bahwa reliabilitas sistem pada horizon 2036 belum sepenuhnya stabil, karena kegagalan pemenuhan kebutuhan masih terkonsentrasi pada bulan-bulan yang bertepatan dengan fase budidaya yang penting.

Berbeda dengan *IRI* yang berbasis frekuensi, *IDS* menekankan akumulasi besarnya defisit pada bulan-bulan ketika kebutuhan tidak terpenuhi. Berdasarkan hasil neraca air bulanan, *IDS* pada skenario 2036 mencapai 122,12 mm, yang setara dengan sekitar 16,25% dari total kebutuhan irigasi kotor tahunan ($GIR = 751,50$ mm/tahun). Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun defisit hanya terjadi pada sedikit bulan, besarnya tetap signifikan secara operasional karena terkonsentrasi pada periode yang sensitif bagi sistem budidaya padi.

Secara lebih rinci, defisit terbesar terjadi pada bulan Oktober, yaitu sebesar 54,63 mm, yang setara dengan sekitar 33,13% dari *GIR* Oktober sebesar 164,83 mm.

Defisit berikutnya terjadi pada bulan April sebesar 50,08 mm, atau sekitar 19,26% dari *GIR* April sebesar 260,17 mm. Sementara itu, bulan November mengalami defisit sebesar 17,44 mm, atau sekitar 11,66% dari *GIR* bulan tersebut yang mencapai 149,33 mm. Pola ini menunjukkan bahwa risiko utama pengelolaan irigasi pada sistem monsun tidak hanya ditentukan oleh rendahnya ketersediaan air pada musim kemarau, melainkan lebih dipengaruhi oleh ketidakselarasan waktu antara puncak kebutuhan irigasi dan dinamika pasokan bulanan pada periode transisi musim. April merepresentasikan puncak kebutuhan pada fase persiapan lahan musim kemarau, sedangkan Oktober dan November mencerminkan kebutuhan tinggi pada awal musim tanam hujan ketika persiapan lahan dan pertumbuhan awal memerlukan pasokan air yang besar, sementara debit sungai belum sepenuhnya pulih. Kondisi ini sejalan dengan temuan Ahmad *et al.* (2023) dan Hou *et al.* (2025), yang menunjukkan bahwa *mismatch spasio-temporal* antara puncak pasokan dan puncak kebutuhan irigasi dapat tetap terjadi meskipun ketersediaan air agregat terlihat memadai. Lebih lanjut, temuan ini menegaskan bahwa dalam banyak kasus, puncak pasokan muncul lebih awal atau berada pada fase yang berbeda dari puncak kebutuhan air tanaman, sehingga defisit justru muncul pada jendela waktu budidaya yang paling menentukan. Dalam konteks Sub-DAS Bila, hasil ini menunjukkan bahwa kerentanan sistem irigasi pada horizon 2036 terutama bersifat intra-musiman dan terkonsentrasi, bukan menyebar merata sepanjang tahun.



Gambar 31. Distribusi bulanan kebutuhan irigasi kotor (*GIR*), defisit air, dan metrik kinerja sistem (*IRI* dan *IDSI*) pada skenario proyeksi 2036 di Sub-DAS Bila.

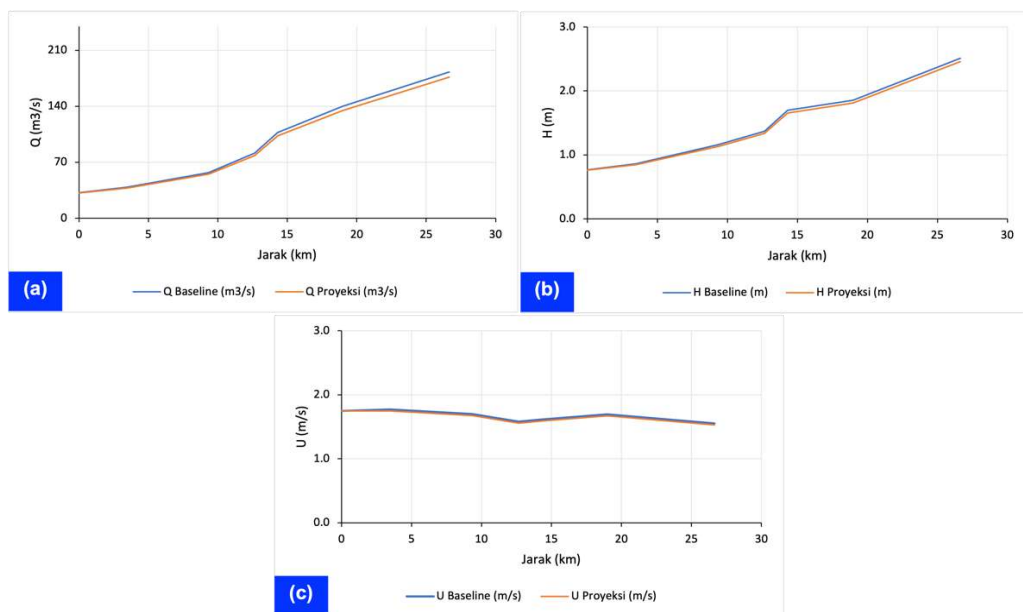
Implikasi manajerial dari kombinasi *IRI* dan *IDSI* pada skenario 2036 menegaskan bahwa strategi adaptasi perlu diarahkan pada peningkatan reliabilitas operasional pada bulan-bulan kritis, bukan pada peningkatan pasokan tahunan secara umum. Prioritas utama wajib difokuskan pada mitigasi defisit periode Oktober–November guna menjamin keberhasilan awal musim tanam hujan, sementara prioritas berikutnya diarahkan pada penguatan pasokan atau peningkatan efisiensi operasional pada bulan April untuk mereduksi risiko kegagalan fase persiapan lahan musim kemarau. Dengan demikian, indikator *IRI* dan *IDSI* tidak sekadar menggambarkan kinerja pemenuhan

irigasi, melainkan juga mampu memetakan jendela waktu adaptasi yang paling strategis untuk mendukung stabilitas produksi padi pada horizon proyeksi 2036.

4.4.3. Proyeksi Kualitas Air Irigasi pada Skenario 2036 (QUAL2Kw)

4.4.3.1. Perubahan kondisi hidrolika sungai pada skenario 2036

Keluaran modul hidrolika QUAL2Kw menunjukkan bahwa pada horizon 2036 terjadi pelemahan debit sepanjang ruas sungai, namun dengan besaran yang relatif moderat. Pada segmen hilir (*downstream river*), debit (Q) menurun dari 182,71 m³/s pada kondisi baseline menjadi 176,57 m³/s pada skenario 2036, atau berkurang 6,14 m³/s yang setara dengan sekitar 3,36% (Gambar 32a). Penurunan yang konsisten juga terjadi pada komponen aliran lateral yang ditransfer ke sungai (E'), dari 91,35 m³/s menjadi 88,28 m³/s, atau menurun sekitar 3,36%. Pola ini menunjukkan bahwa pada horizon proyeksi kapasitas pengenceran (*dilution capacity*) sungai cenderung melemah. Dalam sistem sungai, penurunan debit meskipun tidak besar tetap penting karena dapat mengurangi kemampuan sungai untuk mengencerkan masukan beban, sehingga sensitivitas konsentrasi kualitas air terhadap tekanan pencemar cenderung meningkat, terutama pada segmen tengah hingga hilir (Sepp *et al.*, 2025).



Gambar 32. Perbandingan keluaran hidrolika QUAL2Kw antara kondisi baseline dan skenario 2036 sepanjang ruas sungai: (a) debit aliran (Q), (b) kedalaman aliran (H), dan (c) kecepatan aliran (U).

Selain debit, perbandingan profil kedalaman aliran (H) dan kecepatan aliran (U) antara kondisi baseline dan skenario 2036 juga menunjukkan penurunan yang tipis namun konsisten. Pada segmen hilir, kedalaman aliran menurun dari 2,51 m menjadi 2,46 m, atau sekitar 1,99% (Gambar 32b), sedangkan kecepatan aliran menurun dari

1,55 m/s menjadi 1,53 m/s, atau sekitar 1,29% (Gambar 32c). Secara analitis, penurunan H dan U ini terutama mencerminkan respons hidrolika terhadap debit yang sedikit lebih rendah pada geometri sungai yang diasumsikan konstan dalam pemodelan. Dengan demikian, perubahan tersebut tidak menunjukkan terjadinya pergeseran rezim aliran yang drastis, melainkan menandakan bahwa kemampuan transpor dan pencampuran massa air mengalami pelemahan ringan. Dalam sistem kualitas air sungai, perubahan minor pada karakteristik hidrodinamika ini tetap memberikan implikasi tinggi karena dapat memodulasi intensitas pencampuran (*mixing*), waktu tempuh, dan sensitivitas DO terhadap beban pencemar, terutama pada segmen yang secara longitudinal telah menerima akumulasi tekanan kualitas air (Shen *et al.*, 2024).

Koefisien reaerasi (ka_{20}) menunjukkan peningkatan minor pada setiap segmen. Pada segmen hilir, nilai ka_{20} meningkat dari 1,68 hari⁻¹ menjadi 1,71 hari⁻¹ (sekitar 1,79%), sedangkan pada Segmen 1 meningkat dari 11,40 hari⁻¹ menjadi 11,62 hari⁻¹. Secara fisik, perubahan minor ini konsisten dengan sensitivitas formulasi reaerasi terhadap kombinasi parameter hidrolika, terutama kedalaman dan kecepatan aliran. Namun, peningkatan ka_{20} yang marginal tersebut tidak secara otomatis menjamin perbaikan kondisi DO, karena konsentrasi DO ditentukan oleh kesetimbangan antara mekanisme pasokan oksigen dan proses deoksigenasi. Sementara reaerasi atmosfer bertindak sebagai mekanisme pemasok oksigen, proses oksidasi bahan organik, nitrifikasi, respirasi, dan dekomposisi kompartemen biotik tetap menjadi komponen utama yang mereduksi konsentrasi oksigen terlarut (Piatka *et al.*, 2021). Selain itu, perubahan suhu juga memodulasi kedua komponen kesetimbangan tersebut melalui variasi kelarutan oksigen dan akselerasi laju reaksi biogeokimia, sehingga DO dapat tetap menurun atau tidak mengalami perubahan yang signifikan meskipun nilai ka_{20} meningkat secara marginal (Yavuz, 2025).

Dengan demikian, variasi kondisi hidrolika pada skenario 2036 menunjukkan bahwa sistem sungai tidak mengalami perubahan karakteristik transpor yang drastis, namun tetap memperlihatkan penurunan moderat pada kapasitas aliran dan pengenceran. Dinamika ini memberikan indikasi kuat bahwa kualitas air pada horizon 2036 tidak hanya dipengaruhi atau ditentukan oleh fluktuasi beban pencemar, melainkan oleh interaksi kompleks antara beban tersebut dengan kapasitas sungai dalam melakukan transpor, pencampuran, dan asimilasi limbah. Oleh karena itu, karakteristik hidrolika ini menjadi landasan krusial dalam menginterpretasikan dinamika kualitas air pada pembahasan selanjutnya, khususnya mengenai mekanisme penurunan debit yang relatif kecil namun mampu memicu penguatan degradasi kualitas air pada segmen tengah–hilir.

4.4.3.2. Proyeksi kualitas air sungai pada skenario 2036

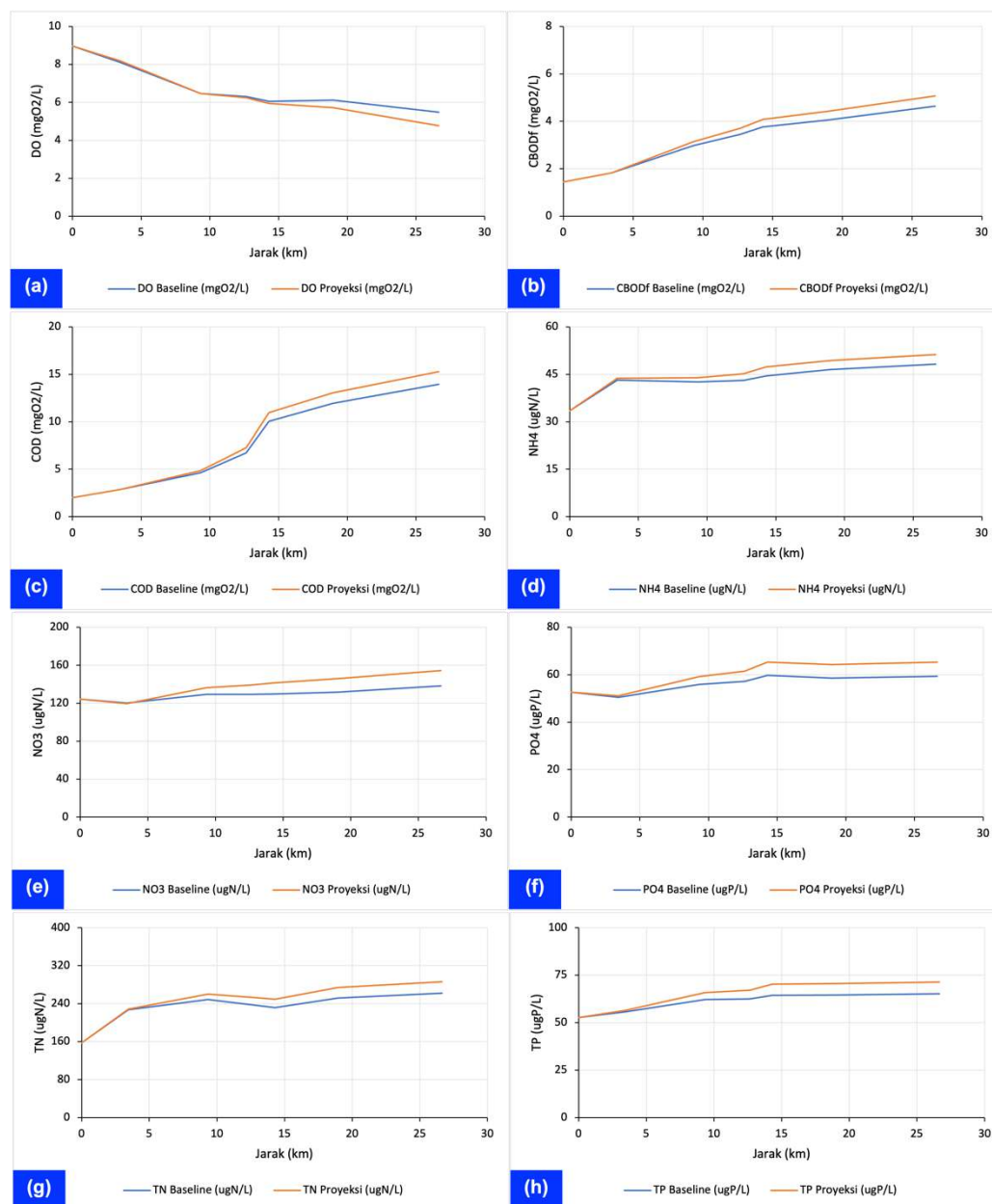
Proyeksi kualitas air pada skenario 2036 menunjukkan bahwa gradien degradasi longitudinal yang teridentifikasi pada kondisi baseline tetap bertahan dengan intensitas yang lebih tinggi pada segmen tengah–hilir. Pada kondisi baseline, konsentrasi DO menurun secara konsisten dari 8,96 mg/L di segmen hulu (*headwater*) menjadi 5,48 mg/L di segmen hilir (Gambar 33a). Tren spasial ini sejalan dengan peningkatan beban organik dan padatan tersuspensi ke arah hilir yang memicu peningkatan konsumsi oksigen dan menurunkan kualitas air pada bagian bawah sistem sungai (Zhang *et al.*, 2025). Pada

skenario 2036, karakteristik hulu berada pada kondisi identik dengan nilai DO sebesar 8,96 mg/L, hal ini konsisten dengan asumsi bahwa tidak terdapat masukan difus serta bertahannya kondisi batas kualitas air di hulu. Namun, seiring pergerakan aliran ke segmen-segmen berikutnya, profil DO menunjukkan penurunan yang lebih tajam. Pada segmen hilir, nilai DO tereduksi menjadi 4,77 mg/L, mencerminkan penurunan sebesar 0,71 mg/L (atau sekitar 12,96%) dibandingkan kondisi baseline (Gambar 33a). Hasil pemodelan ini menegaskan bahwa meskipun variasi hidrolika bersifat moderat, sensitivitas respons DO di bagian hilir meningkat secara signifikan akibat akumulasi tekanan beban polutan dan proses deoksigenasi di sepanjang alur sungai.

Dinamika konsentrasi DO menunjukkan respons yang berbanding terbalik dengan peningkatan indikator beban organik karbon. Konsentrasi CBOD_f pada segmen hilir meningkat dari 4,64 mg/L pada kondisi baseline menjadi 5,07 mg/L pada skenario 2036, atau naik 0,43 mg/L sekitar 9,27% (Gambar 33b). Kenaikan serupa juga terlihat pada konsentrasi COD, dari 13,95 mg/L menjadi 15,27 mg/L, atau bertambah 1,32 mg/L sekitar 9,46% (Gambar 33c). Secara mekanistik, kombinasi peningkatan CBOD_f dan COD ini mencerminkan penguatan tekanan bahan organik yang meningkatkan kebutuhan oksigen untuk proses oksidasi dan dekomposisi. Oleh karena itu, meskipun kapasitas reaerasi pada beberapa segmen meningkat secara marginal, laju konsumsi oksigen tetap menjadi proses yang lebih dominan di bagian hilir. Selain itu, kenaikan suhu air dari 23°C pada kondisi baseline menjadi 24°C pada skenario proyeksi berpotensi mempercepat laju reaksi biogeokimia sekaligus menurunkan kelarutan oksigen, sehingga memperbesar kecenderungan penurunan DO pada segmen yang telah mengalami akumulasi beban organik (Johnson *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025). Dengan demikian, degradasi kualitas air pada skenario 2036 bukan merupakan konsekuensi langsung dari variasi hidrolika yang drastis, melainkan manifestasi dari akumulasi beban organik dan cekaman termal yang mereduksi ambang batas aman (*margin of safety*) DO pada wilayah hilir.

Komponen nitrogen dan fosfor juga menunjukkan kenaikan yang konsisten menuju hilir pada skenario 2036. Pada segmen hilir, konsentrasi NO₃⁻ meningkat dari 138,22 µgN/L menjadi 154,27 µgN/L, atau bertambah 16,05 µgN/L sekitar 11,61% (Gambar 33e). Konsentrasi NH₄⁺ meningkat dari 48,22 µgN/L menjadi 51,25 µgN/L, atau naik 3,03 µgN/L sekitar 6,28% (Gambar 33d). Total nitrogen (TN) meningkat dari 261,82 µgN/L menjadi 286,35 µgN/L, atau bertambah 24,53 µgN/L sekitar 9,37% (Gambar 33g). Pada sisi fosfor, PO₄³⁻ meningkat dari 59,35 µgP/L menjadi 65,25 µgP/L, atau naik 5,90 µgP/L sekitar 9,94% (Gambar 33f), sedangkan total fosfor (TP) meningkat dari 65,15 µgP/L menjadi 71,45 µgP/L, atau bertambah 6,30 µgP/L sekitar 9,67% (Gambar 33h). Peningkatan NO₃⁻, NH₄⁺, TN, dan fosfor anorganik ini konsisten dengan perubahan komposisi penggunaan/tutupan lahan yang menunjukkan bertambahnya proporsi pertanian dan permukiman pada beberapa sub-DAS kontributor, sehingga tekanan beban nutrisi difus yang masuk ke sungai menjadi lebih besar. Kenaikan nutrisi yang berlangsung paralel dengan meningkatnya CBOD_f dan COD serta menurunnya DO mengindikasikan bahwa transformasi nitrogen, terutama nitrifikasi, berpotensi ikut memperbesar kebutuhan oksigen dan memperkecil *margin of safety* DO pada segmen hilir (Yu *et al.*, 2024). Dalam konteks irigasi, perubahan ini menunjukkan bahwa risiko degradasi kualitas air pada masa depan tidak hanya berkaitan dengan lokasi, tetapi juga

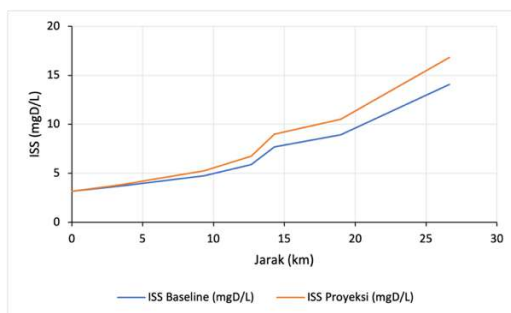
dengan penguatan proses biogeokimia ketika tekanan penggunaan/tutupan lahan meningkat dan kapasitas pengenceran sungai melemah (Zhang *et al.*, 2025).



Gambar 33. Perbandingan hasil simulasi kualitas air QUAL2Kw antara kondisi baseline dan skenario 2036 sepanjang ruas sungai: (a) DO, (b) CBOD_f, (c) COD, (d) NH₄⁺, (e) NO₃⁻, (f) PO₄³⁻, (g) TN, dan (h) TP.

Konsentrasi ISS pada skenario 2036 menunjukkan peningkatan yang moderat di bagian hilir. Pada segmen akhir, ISS meningkat dari 14,07 mg/L pada baseline menjadi 16,82 mg/L pada skenario, atau bertambah 2,75 mg/L sekitar 19,55% (Gambar 34).

Kenaikan ini konsisten dengan perubahan komposisi penggunaan/tutupan lahan dan dinamika limpasan serta erosi yang berpotensi memperbesar kontribusi sedimen tersuspensi yang terbawa aliran. Dalam sistem sungai, peningkatan padatan tersuspensi tidak hanya berimplikasi pada tekanan fisik berupa sedimentasi, tetapi juga dapat memperkuat tekanan kualitas air secara keseluruhan karena partikel tersuspensi sering berperan sebagai pembawa sebagian fraksi polutan terikat partikel (Niu *et al.*, 2025). Oleh karena itu, kenaikan ISS pada skenario 2036 mempertegas bahwa degradasi kualitas air menuju hilir bukan hanya berkaitan dengan peningkatan tekanan organik dan nutrisi, tetapi juga dengan peningkatan risiko fisik bagi sistem irigasi.



Gambar 34. Perbandingan hasil simulasi ISS antara kondisi baseline dan skenario 2036 sepanjang ruas sungai.

Secara keseluruhan, proyeksi QUAL2Kw menuju 2036 menunjukkan bahwa kualitas air sungai mengalami degradasi bertahap menuju hilir dengan sinyal yang lebih kuat dibanding baseline. Hal ini terutama ditandai oleh penurunan DO hilir dari 5,48 menjadi 4,77 mg/L serta peningkatan indikator beban organik (CBOD_f dan COD), nutrisi (NO_3^- , NH_4^+ , TN, PO_4^{3-} , dan TP), dan padatan tersuspensi (ISS). Pada saat yang sama, perubahan hidrolika sungai relatif kecil, dengan penurunan debit hanya sekitar tiga persen dan peningkatan reaerasi (ka_{20}) yang bersifat marginal. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada horizon 2036 isu utama kualitas air irigasi Sub-DAS Bila lebih ditentukan oleh peningkatan tekanan beban difus yang terakumulasi sepanjang aliran serta sensitivitas DO pada segmen hilir dibandingkan oleh perubahan debit sungai semata. Dalam interpretasi ini, penskalaan beban difus berbasis perubahan LULC diperlakukan sebagai *first-order approximation* yang defensif untuk menjaga *traceability* antara perubahan lanskap dan perubahan tekanan kualitas air. Dengan demikian, hasil proyeksi dibaca sebagai arah perubahan yang menjelaskan secara proses, bukan sebagai klaim estimasi absolut seluruh sumber pencemar di lapangan.

4.4.3.3. Kelayakan mutu air untuk irigasi dan segmen prioritas mitigasi (PP 22/2021)

Evaluasi kelayakan mutu air pada horizon 2036 dilakukan mengacu pada PP 22 Tahun 2021 Lampiran VI, dengan peruntukan untuk mengairi pertanian sehingga Kelas 4 diposisikan sebagai ambang minimum kelayakan. Untuk membaca pergeseran mutu dan *margin of safety* secara lebih informatif, hasil proyeksi juga disandingkan dengan ambang Kelas 2, sebagaimana kerangka interpretasi pada Bab III. Konsistensi

pendekatan dijaga dengan mempertahankan penggunaan proksi secara hati-hati, yaitu CBOD_f sebagai representasi konservatif tekanan beban organik karbon dan ISS sebagai proksi interpretatif terhadap padatan tersuspensi dalam konteks risiko fisik pada jaringan irigasi. Keduanya tidak digunakan sebagai substitusi formal dalam penetapan kelas mutu regulatif, melainkan untuk memperkuat pembacaan operasional terhadap risiko masa depan.

Secara regulatif, hasil simulasi menunjukkan bahwa mutu air pada skenario 2036 tetap layak untuk irigasi karena seluruh parameter kunci masih memenuhi ambang minimum Kelas 4, dan sebagian besar parameter utama masih berada pada kisaran yang setara dengan Kelas 2 atau lebih baik. Nilai pH stabil pada kisaran 7,10–7,36, sehingga tetap berada dalam rentang baku mutu seluruh kelas, yaitu 6–9. Dari sisi padatan, ISS berada pada rentang 3,18–16,82 mg/L, jauh lebih rendah dibanding ambang TSS Kelas 2 sebesar 50 mg/L maupun ambang Kelas 4 sebesar 400 mg/L. Indikator organik berbasis COD juga masih berada pada zona aman, yaitu 2,00–15,27 mg/L, sehingga masih memenuhi Kelas 2 (≤ 25 mg/L) dan jauh di bawah ambang Kelas 4 (≤ 80 mg/L) (Tabel 15). Dengan demikian, jika ditinjau dari perspektif kepatuhan baku mutu, tidak terdapat indikasi bahwa air pada skenario 2036 menjadi tidak layak untuk mengairi pertanian.

Meskipun demikian, temuan yang paling penting pada horizon 2036 adalah penipisan *margin of safety* pada DO, terutama di segmen tengah–hilir. Nilai DO minimum turun menjadi 4,77 mg/L, sehingga masih memenuhi Kelas 2 (≥ 4 mg/L) dan jauh di atas ambang minimum Kelas 4 (≥ 1 mg/L), tetapi tidak lagi memenuhi Kelas 1 (≥ 6 mg/L). Kondisi ini menunjukkan bahwa secara regulatif mutu air masih aman untuk irigasi, tetapi kapasitas penyangga sistem terhadap tambahan tekanan pencemar menjadi semakin terbatas. Oleh karena itu, DO pada skenario 2036 perlu diperlakukan sebagai indikator *early warning* utama, bukan karena telah melampaui baku mutu, tetapi karena berada pada posisi yang lebih rentan terhadap penurunan lebih lanjut apabila terjadi kombinasi debit rendah, peningkatan beban organik, atau pemanasan yang lebih kuat. Temuan ini sejalan dengan studi Zhang *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa kejadian *low*-DO pada sungai yang tertekan aktivitas antropogenik umumnya dipicu oleh dominannya konsumsi oksigen akibat beban pencemar dan proses biogeokimia, sehingga segmen hilir cenderung menjadi zona paling rentan ketika margin DO menipis.

Komponen nitrogen dan fosfor pada skenario 2036 secara regulatif tidak menjadi pembatas kelayakan irigasi, tetapi tetap penting sebagai indikator tekanan difus dan potensi penguatan proses konsumsi oksigen. Konsentrasi NO_3^- , NH_4^+ , TN, PO_4^{3-} , dan TP meningkat secara konsisten menuju hilir, yang menunjukkan bahwa perubahan komposisi penggunaan/tutupan lahan dan meningkatnya aktivitas budidaya serta permukiman pada sub-DAS kontributor berpotensi memperbesar masukan nutrisi non-titik ke sungai (Caldwell *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2024). Dalam penelitian ini, nutrisi tidak diposisikan sebagai parameter pembatas utama mutu air irigasi, tetapi sebagai bagian dari sinyal tekanan kualitas air yang dapat memperkuat proses biogeokimia dan memperbesar sensitivitas sistem terhadap penurunan DO pada segmen-segmen bawah.

Dari aspek fisik, peningkatan ISS pada segmen hilir hingga 16,82 mg/L, meskipun masih jauh di bawah ambang regulatif, tetap relevan bagi operasi irigasi karena berpotensi meningkatkan risiko sedimentasi, pendangkalan saluran, dan

kebutuhan operasi–pemeliharaan (O&M) jaringan. Dengan demikian, ISS pada skenario 2036 lebih tepat dibaca sebagai indikator *early warning* operasional, bukan sebagai pembatas mutu air secara regulatif. Kenaikan ISS juga penting karena padatan tersuspensi sering berperan sebagai pembawa (*carrier*) fraksi polutan terikat partikel, sehingga peningkatannya dapat memperkuat tekanan kualitas air secara keseluruhan meskipun debit sungai tidak berubah drastis (Niu *et al.*, 2025). Dalam hal ini, ISS melengkapi pembacaan terhadap DO dan COD dengan menunjukkan bahwa risiko masa depan pada sistem irigasi tidak hanya bersifat kimiawi, tetapi juga fisik.

Berdasarkan sintesis tersebut, segmen prioritas mitigasi pada horizon 2036 tetap terkonsentrasi pada segmen tengah–hilir karena menunjukkan kerentanan ganda. Secara kimiawi, segmen ini ditandai oleh DO minimum 4,77 mg/L yang masih memenuhi baku mutu, tetapi menunjukkan penipisan *margin of safety*. Secara fisik, segmen yang sama ditandai oleh peningkatan ISS hingga 16,82 mg/L, yang berpotensi memperbesar beban operasi–pemeliharaan jaringan irigasi, terutama pada kondisi hidrolika yang melemah. Dengan demikian, penentuan prioritas pengelolaan pada skenario 2036 bukan sekadar bertumpu pada indikator pelampauan baku mutu, melainkan pada penilaian segmen yang memperlihatkan laju degradasi tertinggi dan batas aman (*margin of safety*) yang paling rapuh. Pendekatan ini memfasilitasi langkah intervensi dini yang terarah pada bagian sistem yang paling rentan sebelum memicu degradasi mutu ekologis yang lebih parah pada masa mendatang.

Tabel 15. Ringkasan kelas mutu air berdasarkan hasil simulasi QUAL2Kw pada *snapshot* April skenario 2036 (PP 22/2021 Lampiran VI)

Parameter (simulasi)	Rentang hulu–hilir (2036)	Ambang Kelas 1	Ambang Kelas 2	Kelas yang dicapai (worst-case)
pH (–)	7,10–7,36	6–9	6–9	Kelas 1
ISS (proksi TSS), mg/L	3,18–16,82	≤40	≤50	Kelas 1
DO (minimum), mg/L	min 4,77	≥6	≥4	Kelas 2
COD, mg/L	2,00–15,27	≤10	≤25	Kelas 2

Catatan: Interpretasi *worst-case* ditentukan oleh segmen dengan kondisi paling kritis pada ruas kajian. DO minimum berada pada Kelas 2 dan diperlakukan sebagai *early warning* utama karena margin keselamatan menipis pada segmen tengah–hilir. ISS dibaca sebagai indikator *early warning* operasional karena berkaitan dengan risiko sedimentasi dan beban operasi–pemeliharaan jaringan irigasi. Dalam pembahasan Bab IV, ISS digunakan sebagai proksi interpretatif terhadap TSS, bukan sebagai substitusi formal untuk penetapan kelas mutu regulatif.

Secara keseluruhan, hasil proyeksi menunjukkan bahwa meskipun karakteristik mutu air Sungai Bila pada horizon 2036 secara nominal masih layak untuk irigasi, stabilitas ekologis pada segmen tengah hingga hilir berada dalam kondisi yang semakin rentan. Oleh karena itu, strategi pengelolaan masa depan tidak lagi dapat bertumpu pada pemantauan parsial di alur utama sungai, melainkan harus diintegrasikan dengan perlindungan aktif batas aman (*margin of safety*) sistem. Implementasi pendekatan ini

memerlukan pengendalian terarah terhadap sumber polusi difus, khususnya fluks organik, nutrisi, dan padatan tersuspensi pada skala sub-DAS kontributor yang mengendalikan dinamika segmen-segmen prioritas tersebut.

4.5. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Skenario horizon 2036 menunjukkan bahwa sinyal perubahan iklim di Sub-DAS Bila lebih didominasi oleh peningkatan temperatur daripada perubahan presipitasi tahunan yang besar. Total presipitasi tahunan relatif stabil, yaitu sekitar 2.550,78 mm/tahun, atau hanya berubah sekitar $-0,23\%$ dibanding baseline, sedangkan temperatur meningkat dengan ΔT_{min} sekitar $+0,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan ΔT_{max} sekitar $+0,45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada saat yang sama, perubahan LULC dari baseline 2024 menuju skenario 2036 menunjukkan penurunan vegetasi alami dan semialami, yang ditandai oleh berkurangnya hutan sebesar 810,76 ha ($-2,84\%$) dan semak belukar sebesar 642,89 ha ($-16,84\%$), yang berlangsung paralel dengan peningkatan pertanian lahan kering sebesar 682,87 ha ($+14,41\%$), pertanian lahan basah sebesar 728,45 ha ($+17,67\%$), dan permukiman/lahan terbangun sebesar 74,42 ha ($+19,82\%$). Kombinasi penguatan suhu dan perubahan lanskap ini menunjukkan bahwa tekanan masa depan lebih terkait dengan peningkatan *evaporative demand*, perubahan respons hidrologi, dan penguatan beban difus dibandingkan oleh perubahan presipitasi tahunan yang besar.
2. Secara kuantitas, pasokan air tahunan pada skenario 2036 tetap berada pada kondisi surplus, tetapi kerentanan intra-musiman muncul akibat ketidakselarasan waktu antara pasokan dan kebutuhan irigasi. Simulasi SWAT menunjukkan *water yield* sebesar 1.849,85 mm/tahun, yang jauh lebih besar daripada kebutuhan irigasi kotor hasil CROPWAT sebesar 751,50 mm/tahun. Meskipun demikian, defisit tetap terjadi pada tiga bulan kritis, yaitu April, Oktober, dan November, ketika puncak kebutuhan irigasi bertepatan dengan pasokan efektif bulanan yang belum memadai. Temuan ini menegaskan bahwa tantangan utama pengelolaan irigasi pada horizon 2036 bukan terletak pada kekurangan pasokan air tahunan, melainkan pada *timing mismatch* antara ketersediaan air dan kebutuhan air pada fase-fase budidaya yang sensitif.
3. Keandalan irigasi pada skenario 2036 berada pada tingkat moderat, dengan defisit yang terkonsentrasi pada bulan-bulan yang menentukan bagi operasi irigasi padi. Nilai *IRI* sekitar 0,75 menunjukkan bahwa kebutuhan irigasi terpenuhi pada sekitar 75% bulan yang memerlukan irigasi. Sementara itu, nilai *IDS* mencapai 122,12 mm, atau sekitar 16,25% dari total GIR tahunan, yang menunjukkan bahwa meskipun defisit hanya terjadi pada sedikit bulan, besarnya tetap signifikan secara operasional karena berimpit dengan fase persiapan lahan dan awal pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, strategi adaptasi pada masa depan perlu difokuskan pada penguatan reliabilitas sistem pada bulan-bulan kritis, terutama Oktober–November dan April, bukan semata-mata pada peningkatan pasokan air tahunan secara umum.
4. Secara kualitas, mutu air Sungai Bila pada skenario 2036 masih layak untuk irigasi berdasarkan PP 22 Tahun 2021, tetapi segmen tengah–hilir menunjukkan penurunan *margin of safety* dan menjadi prioritas mitigasi. Parameter pH berada pada kisaran

7,10–7,36 dan ISS berada pada kisaran 3,18–16,82 mg/L, yang keduanya masih setara dengan Kelas 1. Sementara itu, COD berada pada rentang 2,00–15,27 mg/L dan DO minimum turun hingga 4,77 mg/L, sehingga secara *worst-case* ruas kajian berada pada kondisi setara Kelas 2. Dalam penelitian ini, DO perlu diperlakukan sebagai indikator *early warning* utama karena margin keselamatannya menipis pada segmen tengah–hilir, sedangkan ISS berfungsi sebagai indikator *early warning* operasional karena peningkatannya berpotensi memperbesar risiko sedimentasi dan menambah beban operasi–pemeliharaan jaringan irigasi. Temuan ini menunjukkan bahwa status layak secara regulatif tidak identik dengan aman secara operasional, sehingga pengendalian beban difus, terutama beban organik, nutrien, dan padatan tersuspensi pada segmen prioritas, menjadi penting untuk menjaga stabilitas kualitas air pada horizon 2036.

4.6. Daftar Pustaka

- Abbas, Z., Yang, G., Zhong, Y., & Zhao, Y. (2021). Spatiotemporal Change Analysis and Future Scenario of LULC Using the CA-ANN Approach: A Case Study of the Greater Bay Area, China. *Land* 2021, Vol. 10, Page 584, 10(6), 584. <https://doi.org/10.3390/LAND10060584>
- Abdullah, Hardianty H, R., Boceng, A., & Asra, R. (2022). Flood Vulnerability Projection in Rice Land Based on The HadCM3 Climate Model in The Bila Watershed Province Of South Sulawesi. *Jurnal Galung Tropika*, 11(2), 143–152. <https://doi.org/10.31850/jgt.v11i2.898>
- Adiyaman, H., Emre Varul, Y., Bakirman, T., & Bayram, B. (2025). Stripe Error Correction for Landsat-7 Using Deep Learning. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 93(1), 51–63. <https://doi.org/10.1007/S41064-024-00306-X>
- Ahmad, Q. ul A., Moors, E., Biemans, H., Shaheen, N., Masih, I., & ur Rahman Hashmi, M. Z. (2023). Climate-induced shifts in irrigation water demand and supply during sensitive crop growth phases in South Asia. *Climatic Change*, 176(11), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S10584-023-03629-7>
- Asra, R., Mappiasse, M. F., & Nurnawati, A. A. (2020). The Application of CA-Markov Model for Prediction of Land Use Change in Sub-Watershed Bila Year 2036. *AGROVITAL : Jurnal Ilmu Pertanian*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.35329/agrovital.v5i1.630>
- Babamiri, O., Vanaei, A., Guo, X., Wu, P., Richter, A., & Ng, K. T. W. (2020). Numerical Simulation of Water Quality and Self-Purification in a Mountainous River Using QUAL2KW. *Journal of Environmental Informatics*, 37(1), 26–35. <https://doi.org/10.3808/jei.202000435>
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2014). *Klasifikasi Penutup Lahan - SNI 7645 1 2014 - 1*. Badan Standardisasi Nasional.
- Bai, X., Zhao, W., Liu, H., Zhang, Y., Yang, Q., Liu, J., & Chang, X. (2023). Effects of precipitation changes and land-use alteration on streamflow: A comparative analysis from two adjacent catchments in the Qilian Mountains, arid northwestern China. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1097049. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1097049>
- Baig, M. F., Mustafa, M. R. U., Baig, I., Takaijudin, H. B., & Zeshan, M. T. (2022). Assessment of Land Use Land Cover Changes and Future Predictions Using CA-ANN Simulation for Selangor, Malaysia. *Water* 2022, Vol. 14, Page 402, 14(3), 402. <https://doi.org/10.3390/W14030402>

- Barkey, R., Nursaputra, M., Mappiase, M. F., Achmad, M., Solle, M., & Dassir, M. (2019). Climate change impacts related flood hazard to communities around Bantimurung Bulusaraung National Park, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 235, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/235/1/012022>
- Bhagat, H., Ghosh, P., & Nagesh Kumar, D. (2021). Estimation of seasonal base flow contribution to a tropical river using stable isotope analysis. *Journal of Hydrology*, 601, 126661. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126661>
- Biswas, J., Jobaer, M. A., Haque, S. F., Islam Shozib, M. S., & Limon, Z. A. (2023). Mapping and monitoring land use land cover dynamics employing Google Earth Engine and machine learning algorithms on Chattogram, Bangladesh. *Heliyon*, 9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21245>
- Blissag, B., Yebdri, D., & Kessar, C. (2024). Spatiotemporal change analysis of LULC using remote sensing and CA-ANN approach in the Hodna basin, NE of Algeria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 133, 103535. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2023.103535>
- Bo, Y., Wang, X., van Groenigen, K. J., Linquist, B. A., Müller, C., Li, T., Yang, J., Jägermeyr, J., Qin, Y., & Zhou, F. (2024). Improved alternate wetting and drying irrigation increases global water productivity. *Nature Food* 2024 5:12, 5(12), 1005–1013. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01081-z>
- Borah, D. K., & Bera, M. (2004). Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Applications. *Transactions of the ASAE*, 47(3), 789–803. <https://doi.org/10.13031/2013.16110>
- Caldwell, P. V., Martin, K. L., Vose, J. M., Baker, J. S., Warziniack, T. W., Costanza, J. K., Frey, G. E., Nehra, A., & Mihiar, C. M. (2023). Forested watersheds provide the highest water quality among all land cover types, but the benefit of this ecosystem service depends on landscape context. *Science of The Total Environment*, 882, 163550. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163550>
- Chaves, M. E. D., Picoli, M. C. A., Sanches, I. D., Chaves, M. E. D., Picoli, M. C. A., & Sanches, I. D. (2020). Recent Applications of Landsat 8/OLI and Sentinel-2/MSI for Land Use and Land Cover Mapping: A Systematic Review. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, 12(18). <https://doi.org/10.3390/RS12183062>
- Christiawan, P. I., & Nguyen, T. P. L. (2024). Peri-Urbanization in Populous Developing Asian Countries: A Systematic Review. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(3), 949. <https://doi.org/10.18280/IJSDP.190313>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64). <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Cui, Z., & Tian, F. (2025). Delayed stormflow generation in a semi-humid forested watershed controlled by soil water storage and groundwater dynamics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(10), 2275–2291. <https://doi.org/10.5194/HESS-29-2275-2025>
- Din, S. U., & Yamamoto, K. (2024). Urban Spatial Dynamics and Geo-informatics Prediction of Karachi from 1990–2050 Using Remote Sensing and CA-ANN Simulation. *Earth Systems and Environment*, 8(3), 849–868. <https://doi.org/10.1007/S41748-024-00439-4>
- El Moussaoui, E. H., Moumni, A., Khabba, S., Amazirh, A., Er-Raki, S., Chehbouni, A., & Lahrouni, A. (2025). A comparative methodological approach for argan forest classification using Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(2), 210. <https://doi.org/10.1007/S10661-025-13649-8>

- Ershadfath, F., Shahnazari, A., Sarjaz, M. R., Andaryani, S., Trolle, D., & Olesen, J. E. (2024). Blue and green water availability under climate change in arid and semi-arid regions. *Ecological Informatics*, 82, 102743. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2024.102743>
- Eva, E. A., Marzen, L. J., Lamba, J., Ahsanullah, S. M., & Mitra, C. (2024). Projection of land use and land cover changes based on land change modeler and integrating both land use land cover and climate change on the hydrological response of Big Creek Lake Watershed, South Alabama. *Journal of Environmental Management*, 370, 122923. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.122923>
- Fernandez, N., & Camacho, L. A. (2023). Water Quality Modeling in Headwater Catchments: Comprehensive Data Assessment, Model Development and Simulation of Scenarios. *Water (Switzerland)*, 15(5), 868. <https://doi.org/10.3390/W15050868/S1>
- Gharaibeh, A., Shaamala, A., Obeidat, R., & Al-Kofahi, S. (2020). Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. *Heliyon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05092>
- Ghorbani, Z., Amanipoor, H., & Battaleb-Looie, S. (2022). Water quality simulation of Dez River in Iran using QUAL2KW model. *Geocarto International*, 37(4), 1126–1138. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1762763>
- Gong, J., Du, H., Sun, Y., & Zhan, Y. (2023). Simulation and prediction of land use in urban agglomerations based on the PLUS model: a case study of the Pearl River Delta, China. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1306187. <https://doi.org/10.3389/FENV.2023.1306187>
- Grafton, R. Q., Fanaian, S., Horne, J., Katic, P., Nguyen, N. M., Ringler, C., Robin, L., Talbot-Jones, J., Wheeler, S. A., Wyrwoll, P. R., Avarado, F., Biswas, A. K., Borgomeo, E., Brouwer, R., Coombes, P., Costanza, R., Hope, R., Kompas, T., Kubiszewski, I., ... Williams, J. (2024). Rethinking responses to the world's water crises. *Nature Sustainability* 2024 8:1, 8(1), 11–21. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01470-z>
- Gulakhmadov, A., Chen, X., Gulakhmadov, N., Rizwan, M., Gulakhmadov, M., Nadeem, M. U., Rakhimova, M., & Liu, T. (2025). Modeling of historical and future changes in temperature and precipitation in the Panj River Basin in Central Asia under the CMIP5 RCP and CMIP6 SSP scenarios. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 3037-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86366-4>
- Hansen, M. C., Wang, L., Song, X. P., Tyukavina, A., Turubanova, S., Potapov, P. V., & Stehman, S. V. (2020). The fate of tropical forest fragments. *Science Advances*, 6(11), 8574–8585. <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAX8574>
- Hariadi, M. H., Sutanto, S. J., Schrier, G. van der, Supit, I., Ratri, D. N., Steeneveld, G.-J., Sopaheluwakan, A., & Tank, A. K. (2026). Unravelling the impact of changing rainy seasons on rice production in Southeast Asia: a climate change high-resolution perspective. *Climatic Change* 2026 179:4, 179(4), 60-. <https://doi.org/10.1007/S10584-026-04136-1>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC4D4F>
- Hou, Y., Wang, S., Song, S., Chen, P., & Wu, X. (2025). Crop irrigation water requirements mismatch the actual water allocation in the anthropogenic-regulated Yellow River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 61, 102715. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2025.102715>

- Hu, Y., Lu, Y. H., Edmonds, J., Liu, C., Zhang, Q., & Zheng, C. (2021). Irrigation alters source-composition characteristics of groundwater dissolved organic matter in a large arid river basin, Northwestern China. *Science of The Total Environment*, 767, 144372. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144372>
- Hussain, K., Mehmood, K., Yujun, S., Badshah, T., Anees, S. A., Shahzad, F., Nooruddin, Ali, J., & Bilal, M. (2025). Analysing LULC transformations using remote sensing data: insights from a multilayer perceptron neural network approach. *Annals of GIS*. <https://doi.org/10.1080/19475683.2024.2343399>
- Insan, S., & Kuntiyawichai, K. (2022). Assessment of Agricultural Water Sufficiency under Climate and Land Use Changes in the Lam Takong River Basin. *Water*, 14(18), 2794. <https://doi.org/10.3390/w14182794>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. . Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Johnes, P. J. (1996). Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. *Journal of Hydrology*, 183(3–4), 323–349. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6)
- Johnson, J. M., Becker, M., Dossou-Yovo, E. R., & Saito, K. (2024). Enhancing rice yields, water productivity, and profitability through alternate wetting and drying technology in farmers' fields in the dry climatic zones of West Africa. *Agricultural Water Management*, 304, 109096. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109096>
- Johnson, M. F., Albertson, L. K., Algar, A. C., Dugdale, S. J., Edwards, P., England, J., Gibbins, C., Kazama, S., Komori, D., MacColl, A. D. C., Scholl, E. A., Wilby, R. L., de Oliveira Roque, F., & Wood, P. J. (2024). Rising water temperature in rivers: Ecological impacts and future resilience. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 11(4), e1724. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1724>
- Kamaraj, M., & Rangarajan, S. (2022). Predicting the future land use and land cover changes for Bhavani basin, Tamil Nadu, India, using QGIS MOLUSCE plugin. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86337–86348. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-17904-6>
- Karimzadeh, S., Ahmadi, A., Baldocchi, D., & Fisher, J. B. (2025). Climate change has increased global evaporative demand except in South Asia. *Communications Earth & Environment* 2025 6:1, 6(1), 1009-. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02959-x>
- Kartal, V. (2024). Machine learning-based streamflow forecasting using CMIP6 scenarios: Assessing performance and improving hydrological projections and climate change. *Hydrological Processes*, 38(6), e15204. <https://doi.org/10.1002/HYP.15204>
- Kayitesi, N. M., Guzha, A. C., & Mariethoz, G. (2022). Impacts of land use land cover change and climate change on river hydro-morphology- a review of research studies in tropical regions. *Journal of Hydrology*, 615, 128702. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128702>
- Kodoatie, R. J., & Sjarief, R. (2010). *Tata Ruang Air* (S. Nurasih & A. Sadewa, Eds.; 1st ed.). C.V ANDI OFFSET (Penerbit ANDI).
- Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J. C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Niaye, O., Panickal,

- S., Zhou, T., & Christensen, H. M. (2021). *Future global climate: scenario-based projections and near-term information*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 553–672). Cambridge University Press.
- Leta, M. K., Demissie, T. A., & Tränckner, J. (2021). Modeling and Prediction of Land Use Land Cover Change Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) in Nashe Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 3740, 13(7), 3740. <https://doi.org/10.3390/SU13073740>
- Lin, F., Chen, X., Yao, H., & Lin, F. (2022). SWAT model-based quantification of the impact of land-use change on forest-regulated water flow. *CATENA*, 211, 105975. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105975>
- Liu, Y., Xu, W., Hong, Z., Wang, L., Ou, G., & Lu, N. (2022). Assessment of Spatial-Temporal Changes of Landscape Ecological Risk in Xishuangbanna, China from 1990 to 2019. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 10645, 14(17), 10645. <https://doi.org/10.3390/SU141710645>
- Lukas, P., Melesse, A. M., & Kenea, T. T. (2023). Prediction of Future Land Use/Land Cover Changes Using a Coupled CA-ANN Model in the Upper Omo–Gibe River Basin, Ethiopia. *Remote Sensing*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/RS15041148>
- Macalam, F. J., Wang, K., Onodera, S. I., Saito, M., Nagano, Y., Yamazaki, M., & Nang, Y. W. (2025). Hydrological Modeling of the Chikugo River Basin Using SWAT: Insights into Water Balance and Seasonal Variability. *Sustainability* (Switzerland), 17(15), 7027. <https://doi.org/10.3390/SU17157027/S1>
- Menapace, A., Dhawan, P., Dalla Torre, D., Kaffas, K., Crespi, A., Larcher, M., Righetti, M., & Cannon, A. J. (2025). Review of bias correction methods for climate model outputs in hydrology. *Journal of Hydrology*, 660, 133213. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2025.133213>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R. O., Nava, L. F., Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Martínez-Meyer, E., Carabias, J., Larralde-Corona, A. H., Barrios, M., & Pardo-Villegas, P. D. (2021). Impacts of land management and climate change in a developing and socioenvironmental challenging transboundary region. *Journal of Environmental Management*, 300, 113748. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113748>
- Mishra, O., Khatiwada, N., Joshi, D., Gharti, S., & Khatri, B. (2024). Prediction of Land Use Land Cover Change Using a Coupled CA-ANN modeling in Dhanusha district of Nepal. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-5301403/V1>
- Mohamad Noor, S. S., Saad, N. A., Mohd Akhir, M. F., & Abd Rahim, M. S. (2025). QUAL2K water quality model: A comprehensive review of its applications, and limitations. *Environmental Modelling & Software*, 184, 106284. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2024.106284>
- Muhammad, R., Zhang, W., Abbas, Z., Guo, F., & Gwiazdzinski, L. (2022). Spatiotemporal Change Analysis and Prediction of Future Land Use and Land Cover Changes Using QGIS MOLUSCE Plugin and Remote Sensing Big Data: A Case Study of Linyi, China. *Land* 2022, Vol. 11, Page 419, 11(3), 419. <https://doi.org/10.3390/LAND11030419>
- Mulyani, A., Mulyanto, B., Barus, B., Panuju, D. R., & Husnain. (2022). Geospatial Analysis of Abandoned Lands Based on Agroecosystems: The Distribution and Land Suitability for Agricultural Land Development in Indonesia. *Land* 2022, Vol. 11, Page 2071, 11(11), 2071. <https://doi.org/10.3390/LAND11112071>
- Niu, L., Gärtner, A. A. E., König, M., Krauss, M., Spahr, S., & Escher, B. I. (2025). Role of Suspended Particulate Matter for the Transport and Risks of Organic Micropollutant Mixtures in Rivers: A Comparison between Baseflow and High

- Discharge Conditions. *Environmental Science & Technology*, 59(10), 4857–4867. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.4C13378>
- Nugroho, H. Y. S. H., van der Veen, A., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2018). Expansion of traditional land-use and deforestation: a case study of an adat forest in the Kandilo Subwatershed, East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Forestry Research*, 29(2), 495–513. <https://doi.org/10.1007/S11676-017-0449-9>
- Pandey, S., Kumari, N., & Al Nawajish, S. (2023). Land Use Land Cover (LULC) and Surface Water Quality Assessment in and around Selected Dams of Jharkhand using Water Quality Index (WQI) and Geographic Information System (GIS). *Journal of the Geological Society of India*, 99(2), 205–218. <https://doi.org/10.1007/S12594-023-2288-Y>
- Pedretti, D., Camera, C. A. S., Libera, N. D., Pasini, S., Gelmini, Y., & Braidot, A. (2025). High-Resolution Flow and Nutrient Modeling Under Climate Change in the Flat, Urbanized and Intensively Cultivated Adige River Lowland Basin (Italy) Using SWAT. *Hydrology* 2025, Vol. 12, 12(9). <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY12090239>
- Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21(3), 419–425. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2005.07.002>
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 2291, 12(14), 2291. <https://doi.org/10.3390/RS12142291>
- Piatka, D. R., Wild, R., Hartmann, J., Kaule, R., Kaule, L., Gilfedder, B., Peiffer, S., Geist, J., Beierkuhnlein, C., & Barth, J. A. C. (2021). Transfer and transformations of oxygen in rivers as catchment reflectors of continental landscapes: A review. *Earth-Science Reviews*, 220, 103729. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2021.103729>
- Putra, A. N., Nita, I., Wicaksono, K. S., Prasetya, N. R., Sugiarto, M. T., Hidayat, F., Alim, Z., Sartono, S. E., Sasangka, P. G., Kusuma, T. R., Abbasi, B., Gessert, A., Ismail, M. H., & Khokthong, W. (2025). Potential erosion and sedimentation based on land use change by using cellular automata-artificial neural network. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1), 2461058. <https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2461058>
- Robotham, J., Old, G., Rameshwaran, P., Sear, D., Gasca-Tucker, D., Bishop, J., Old, J., & McKnight, D. (2021). Sediment and Nutrient Retention in Ponds on an Agricultural Stream: Evaluating Effectiveness for Diffuse Pollution Mitigation. *Water* 2021, Vol. 13, 13(12). <https://doi.org/10.3390/W13121640>
- Sadhvani, K., Eldho, T. I., Jha, M. K., & Karmakar, S. (2022). Effects of Dynamic Land Use/Land Cover Change on Flow and Sediment Yield in a Monsoon-Dominated Tropical Watershed. *Water* 2022, Vol. 14, Page 3666, 14(22), 3666. <https://doi.org/10.3390/W14223666>
- Santoro, A., Piras, F., & Yu, Q. (2023). Spatial analysis of deforestation in Indonesia in the period 1950–2017 and the role of protected areas. *Biodiversity and Conservation*, 1–27. <https://doi.org/10.1007/S10531-023-02679-8>
- Sazawa, K., Komiyama, T., Tsuchida, T., Taguchi, R., Nakashima, F., Ohta, T., Nishio, M., Yamazaki, Y., & Kuramitz, H. (2023). Effects of paddy irrigation-drainage system on water quality and productivity of small rivers in the Himi region of Toyama, Central Japan. *Journal of Environmental Management*, 342, 118305. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118305>

- Sepp, M., Abbasi, M., Döll, P., Freixa, A., Marcé, R., & Sabater, S. (2025). Impacts of climate change on the dilution capacity of perennial and non-perennial European rivers. *Water Research*, 287, 124499. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2025.124499>
- Shadmehri Toosi, A., Batelaan, O., Shanafield, M., & Guan, H. (2025). Land Use-Land Cover and Hydrological Modeling: A Review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 12(2), e70013. <https://doi.org/10.1002/WAT2.70013>
- Shrestha, S., Kazama, F., Newham, L. T. H., Babel, M. S., Clemente, R. S., Ishidaira, H., Nishida, K., & Sakamoto, Y. (2008). Catchment scale modelling of point source and non-point source pollution loads using pollutant export coefficients determined from long-term in-stream monitoring data. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2(3), 134–147. <https://doi.org/10.1016/J.JHER.2008.05.002>
- Skilodimou, D., García, S., Veintimilla, A., Uddin, S., Mahalder, B., & Mahalder, D. (2023). Assessment of Land Use Land Cover Changes and Future Predictions Using CA-ANN Simulation for Gazipur City Corporation, Bangladesh. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 12329, 15(16), 12329. <https://doi.org/10.3390/SU151612329>
- Staddal, I., Haridjaja, O., & Hidayat, Y. (2016). The Analysis of Streamflow on Bila Watershed, South Sulawesi. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(2), 117–130. <https://doi.org/10.32679/jsda.v12i2.56>
- Sujarwo, M. W., Hakim, F. L., & Indarto, I. (2023). Using Landsat to track land use and land cover (LULC) change from 1970 to 2020 in Mayang watershed, East Jawa. 060002. <https://doi.org/10.1063/5.0117111>
- Tanaka, Y., Minggat, E., & Roseli, W. (2021). The impact of tropical land-use change on downstream riverine and estuarine water properties and biogeochemical cycles: a review. *Ecological Processes* 2021 10:1, 10(1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/S13717-021-00315-3>
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., Van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K., Hurtt, G., Kriegler, E., Meehl, G., Moss, R., ... Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253–293. <https://doi.org/10.5194/ESD-12-253-2021>
- Toosi, N. B., Soffianian, A. R., Fakheran, S., Pourmanafi, S., Ginzler, C., & Waser, L. T. (2020). Land Cover Classification in Mangrove Ecosystems Based on VHR Satellite Data and Machine Learning—An Upscaling Approach. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 2684, 12(17), 2684. <https://doi.org/10.3390/RS12172684>
- Valencia, S., Villegas, J. C., Hoyos, N., Duque-Villegas, M., & Salazar, J. F. (2024). Streamflow response to land use/land cover change in the tropical Andes using multiple SWAT model variants. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101888. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2024.101888>
- Vranešević, M., Meseldžija, M., Grabić, J., Zemunac, R., & Boukalova, Z. (2025). Irrigation water quality in a framework of sustainable development goal 6: a review of challenges impacts policy alignments. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1580338. <https://doi.org/10.3389/FAGRO.2025.1580338/>
- Wagner, P. D., Kumar, S., & Fohrer, N. (2023). Integrated modeling of global change impacts on land and water resources. *Science of The Total Environment*, 892, 164673. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.164673>
- Wang, W., Chen, L., & Shen, Z. (2020). Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution. *Science of*

- The Total Environment*, 747, 141164.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141164>
- Wang, X., Wu, L., Luo, Y., Liu, Y., & Wang, R. (2025). Integrated export instream coefficient model for accurate nonpoint source pollution estimation and management in the Yellow River Basin. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 26302-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99552-1>
- Williams, E. L., & Abatzoglou, J. T. (2025). Climate Change Increases Evaporative and Crop Irrigation Demand in North America. *Earth's Future*, 13(7), e2025EF005931. <https://doi.org/10.1029/2025EF005931>
- Williams, M. R., Penn, C. J., & King, K. W. (2025). Hydrologic pathways and nutrient loading in the headwaters of the Western Lake Erie Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102275. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2025.102275>
- Xu, P., Tsendbazar, N. E., Herold, M., de Bruin, S., Koopmans, M., Birch, T., Carter, S., Fritz, S., Lesiv, M., Mazur, E., Pickens, A., Potapov, P., Stolle, F., Tyukavina, A., Van De Kerchove, R., & Zanaga, D. (2024). Comparative validation of recent 10 m-resolution global land cover maps. *Remote Sensing of Environment*, 311, 114316. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2024.114316>
- Xu, Q., Wang, Q., Liu, J., & Liang, H. (2021). Simulation of Land-Use Changes Using the Partitioned ANN-CA Model and Considering the Influence of Land-Use Change Frequency. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2021, Vol. 10, Page 346, 10(5), 346. <https://doi.org/10.3390/IJGI10050346>
- Yalcin, E. (2023). A CMIP6 multi-model ensemble-based analysis of potential climate change impacts on irrigation water demand and supply using SWAT and CROPWAT models: a case study of Akmeşe Dam, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology* 2023 155:1, 155(1), 679–699. <https://doi.org/10.1007/S00704-023-04657-0>
- Yavuz, V. S. (2025). Impact of temperature and flow rate on oxygen dynamics and water quality in major Turkish rivers. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 22830-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06433-8>
- Yu, S., Meng, C., Li, Y., Liu, H., Xia, Y., & Wu, J. (2024). The phosphorus export coefficients variability of specific land-use and the threshold response relationship with watershed characteristics in a subtropical hilly region. *Science of The Total Environment*, 957, 177635. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.177635>
- Zeng, Y., Liu, D., Guo, S., Xiong, L., Liu, P., Chen, J., Chen, H., Yin, J., Wu, Z., & Zhou, W. (2024). Assessment of the impacts of water resources allocation on the reliability, resilience and vulnerability of the water–energy–food–society (WEFS) nexus system. *Agricultural Water Management*, 295, 108780. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.108780>
- Zhang, H., Liu, J., Li, T., Zhang, S., Lin, Z., Jia, Z., Gong, W., & Zhang, G. (2025). Evaluating impacts of hydrology and pollution loadings on low dissolved oxygen in an urbanized tidal river network using modeling and monitoring. *Journal of Hydrology*, 661, 133630. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2025.133630>
- Zhang, L., Endreny, T. A., & Stephan, E. A. (2023). Stochastic export coefficient model to predict annual variation in phosphorus loading from diffuse runoff. *Journal of Hydrology*, 620, 129447. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129447>
- Zhu, K., Zhang, Y., Tian, X., Guan, D., Zhang, S., He, Y., & Zhou, L. (2024). Evolutionary Trend Analysis of Agricultural Non-Point Source Pollution Load in Chongqing Based on Land Use Simulation. *Agronomy* 2024, Vol. 14, 14(4). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14040737>

BAB V

MODEL PENGELOLAAN SUMBER DAYA AIR SUB-DAS BILA UNTUK MENDUKUNG KEBERLANJUTAN KETAHANAN PANGAN NASIONAL

5.1. Abstrak

Ketahanan pangan berbasis padi di wilayah tropis bermusim sangat dipengaruhi oleh keandalan layanan irigasi pada skala intra-musiman, karena defisit singkat yang berimplikasi dengan fase pertumbuhan sensitif dapat menurunkan hasil secara tajam dan meningkatkan volatilitas produksi. Penelitian ini mengembangkan model sistem dinamik berbasis *PowerSim* untuk mengevaluasi kebijakan pengelolaan sumber daya air irigasi pada skala Sub-DAS Bila, Sulawesi Selatan. Model disimulasikan secara bulanan untuk seluruh horizon 2011–2036, dengan periode 2011–2023 merepresentasikan baseline dan periode 2024–2036 merepresentasikan fase evaluasi kebijakan. Input utama meliputi pasokan air bulanan berbasis hasil air (*WYLD*) dari SWAT (*WYLD_mm*), kebutuhan irigasi bersih bulanan dari CROPWAT (*Demand_Net_mm*), serta luas sawah (*Area_ha*) dari analisis LULC. Parameter agronomi dan ekonomi ditetapkan dengan *Yield_potential* sebesar 8,00 ton/ha/musim dan harga gabah Rp 4.500,00/kg. Kualitas air tetap diakui sebagai konteks sistem dalam *linked modeling chain*, tetapi tidak diaktifkan sebagai pembatas kuantitatif pada eksperimen ini karena pada kondisi yang dianalisis air masih layak untuk irigasi. Skenario yang diuji meliputi S0 (baseline), S1 (peningkatan efisiensi penyaluran/*Conveyance_eff*), S2 (pengurangan kebutuhan efektif/*Demand_reduction*), S3 (peningkatan akses dan alokasi efektif/*alpha*), serta S4 (paket terpadu). Kinerja dievaluasi menggunakan defisit bulanan dan kumulatif, indeks stres air (*WSI*), reliabilitas bulanan (*Rel_m*), rasio pemenuhan kebutuhan (*FR*), hasil aktual (*Yield_actual*), produksi padi, proksi pendapatan usaha tani (*Farm_revenue*), serta indeks operasi dan pemeliharaan (*OM_index*). Pada skenario dasar S0 sepanjang horizon simulasi 2011–2036, reliabilitas rata-rata sebesar 0,63 dengan 115 bulan defisit. *WSI* rata-rata tercatat 0,21 dengan nilai maksimum 0,98, defisit kumulatif mencapai 6.680,63 mm, dan *FR* rata-rata sebesar 0,79. Paket terpadu S4 memberikan perbaikan paling konsisten, dengan reliabilitas meningkat menjadi 0,76 dan jumlah bulan defisit turun menjadi 75. Defisit kumulatif menurun 45,26% menjadi 3.656,73 mm, sedangkan *WSI* rata-rata turun dari 0,21 menjadi 0,13, disertai peningkatan *FR* rata-rata menjadi 0,88. Dampaknya, *Yield_actual* rata-rata meningkat dari 6,99 menjadi 7,40 ton/ha/musim. Produksi kumulatif meningkat 5,87% menjadi 9.159.649,69 ton dan proksi pendapatan usaha tani meningkat 5,87% menjadi Rp 41.218.423.617.239,00. Namun, peningkatan kinerja tersebut memerlukan dukungan pengelolaan yang lebih tinggi, yang tercermin pada *OM_index* sebesar 130,00. Hasil penelitian menegaskan bahwa strategi terpadu yang menggabungkan perbaikan pasokan efektif, pengendalian permintaan, dan penguatan tata kelola merupakan opsi kebijakan yang paling andal untuk meningkatkan keandalan layanan irigasi dan mendukung keberlanjutan ketahanan pangan berbasis padi di Sub-DAS Bila.

Kata kunci: Adaptasi irigasi, ketahanan pangan, *PowerSim*, sistem dinamik, Sub-DAS Bila

5.2. Pendahuluan

Ketahanan pangan berbasis padi di wilayah tropis bermusim sangat ditentukan oleh kemampuan sistem irigasi dalam menjaga pemenuhan kebutuhan air pada skala intra-musiman, dan tidak ditentukan secara mutlak oleh besarnya ketersediaan air tahunan. Pada rezim monsun, variabilitas hujan, suhu, dan radiasi selama musim tanam dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman, kestabilan produktivitas, serta realisasi produksi melalui perubahan hasil per satuan luas dan keputusan tanam di tingkat lapangan (Bowden *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2025; Zulkafli *et al.*, 2021). Berdasarkan kerentanan tersebut, persoalan pengelolaan air irigasi bukan hanya apakah total air tersedia mencukupi dalam satu tahun, tetapi apakah air dapat disalurkan secara tepat waktu pada fase-fase pertumbuhan yang sensitif terhadap cekaman air. Oleh karena itu, pengelolaan irigasi yang relevan untuk stabilisasi produksi padi harus diarahkan pada pengurangan ketidakselarasan waktu antara pasokan dan kebutuhan air melalui operasi dan distribusi yang adaptif, bukan sekadar pada peningkatan volume pasokan tahunan (Xue *et al.*, 2025).

Kerentanan ini menjadi semakin kritis karena secara fisiologis tanaman padi memiliki fase pertumbuhan yang sangat peka terhadap defisit air, terutama pada fase reproduktif. Cekaman air pada fase tersebut dapat mengganggu pembentukan organ reproduktif, menurunkan viabilitas polen, menghambat proses pembungaan, serta meningkatkan kemandulan bulir, yang pada akhirnya menurunkan keberhasilan pembentukan dan pengisian gabah (Ishimaru *et al.*, 2022; Liberatore *et al.*, 2025). Konsekuensinya, defisit yang relatif singkat sekalipun dapat menghasilkan penalti hasil yang besar apabila terjadi pada jendela waktu yang sensitif, sehingga risiko produksi tidak selalu berbanding lurus dengan besarnya defisit tahunan secara agregat (Khan *et al.*, 2025). Dengan demikian, strategi pengelolaan irigasi yang efektif harus mampu meminimalkan peluang terjadinya defisit pada fase-fase kritis melalui pengaturan distribusi air, ketepatan waktu pelayanan, dan respons operasi yang lebih adaptif terhadap dinamika pasokan dan permintaan (Li *et al.*, 2025).

Apabila kerentanan utama sistem irigasi terletak pada frekuensi, waktu kejadian, dan besaran defisit, maka evaluasi pengelolaan air perlu menggunakan ukuran kinerja yang tidak hanya menyatakan “cukup” atau “tidak cukup”, tetapi juga mampu menangkap peluang kegagalan dan konsekuensinya. Dalam kajian sumber daya air, kerangka *reliability–resilience–vulnerability* telah banyak digunakan untuk menilai seberapa sering sistem gagal memenuhi target (*reliability*), seberapa cepat sistem pulih (*resilience/resiliency*), dan seberapa besar dampak ketika kegagalan terjadi (*vulnerability*) (Behboudian & Kerachian, 2021; Golmohammadi *et al.*, 2021). Di sisi lain, pada level jaringan irigasi, penilaian kinerja layanan juga berkembang melalui indikator kecukupan, pemerataan, efisiensi distribusi, dan keandalan pelayanan yang menghubungkan perilaku operasi jaringan dengan tingkat pemenuhan kebutuhan air di tingkat pengguna (Benavides *et al.*, 2021; Chukalla *et al.*, 2022; Kaghazchi *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2025). Integrasi kedua perspektif tersebut menjadi penting karena pengelolaan air irigasi yang baik bukan hanya soal ketersediaan sumber air, tetapi juga tentang kemampuan sistem distribusi dan tata kelola untuk memastikan air sampai pada tempat dan waktu yang tepat.

Kebutuhan akan pendekatan seperti ini sangat relevan bagi Sub-DAS Bila, Provinsi Sulawesi Selatan, yang berperan sebagai penyangga utama layanan air untuk sistem produksi padi di wilayah hilir. Dalam sistem irigasi yang kompleks, tantangan kunci sering berupa ketidaksesuaian spasio-temporal antara kebutuhan tanaman dan pasokan atau alokasi aktual, misalnya puncak pasokan terjadi lebih awal daripada puncak kebutuhan, atau surplus di hulu tidak tertranslasi menjadi pemenuhan kebutuhan di hilir (Hou *et al.*, 2025). Pada saat yang sama, karakter hidrologi Sub-DAS Bila yang dipengaruhi oleh dinamika curah hujan musiman, perubahan penggunaan/tutupan lahan, dan keterhubungan dengan sistem hilir menjadikan layanan irigasi sangat peka terhadap variasi distribusi pasokan air dari waktu ke waktu (Abdullah *et al.*, 2022; Asra *et al.*, 2020; Staddal *et al.*, 2016). Dalam sistem seperti ini, surplus air pada skala agregat tidak otomatis menjamin terpenuhinya kebutuhan di lapangan, karena efektivitas layanan tetap dimediasi oleh efisiensi penyaluran, aturan distribusi, kapasitas operasi, dan kepatuhan kelembagaan. Dengan kata lain, tantangan pengelolaan di Sub-DAS Bila harus dibaca sebagai persoalan pasokan, permintaan, dan tata kelola yang saling berinteraksi.

Meskipun pemodelan hidrologi dan estimasi kebutuhan air tanaman telah banyak digunakan untuk menganalisis sistem irigasi, banyak kajian masih menempatkan pasokan dan kebutuhan sebagai dua komponen yang terpisah, atau berhenti pada evaluasi indikator teknis tanpa menelusuri implikasinya secara konsisten terhadap hasil padi, produksi, dan manfaat ekonomi. Kondisi ini membatasi kemampuan analisis untuk menjawab pertanyaan kebijakan yang lebih operasional, misalnya intervensi mana yang paling efektif menurunkan defisit pada bulan-bulan kritis, bagaimana perbaikan layanan diterjemahkan menjadi penurunan stres air tanaman, dan sejauh mana perbaikan tersebut berdampak pada produksi padi serta proksi manfaat ekonomi. Dalam konteks ini, pendekatan *system dynamics* (SD) menawarkan keunggulan karena mampu merepresentasikan hubungan umpan balik antara pasokan, kebutuhan, operasi jaringan, keputusan pengelolaan, dan luaran produksi di bawah kondisi yang dinamis dan tidak pasti (Armenia *et al.*, 2023; Mashaly *et al.*, 2024). Studi-studi terkini menunjukkan bahwa kombinasi kebijakan, seperti peningkatan efisiensi penyaluran, pengelolaan permintaan, dan penyesuaian tata kelola distribusi, cenderung menghasilkan perbaikan yang lebih kuat dan lebih stabil dibanding intervensi tunggal (Ashkevari *et al.*, 2025; Eslamifar *et al.*, 2024; Mashaly *et al.*, 2024).

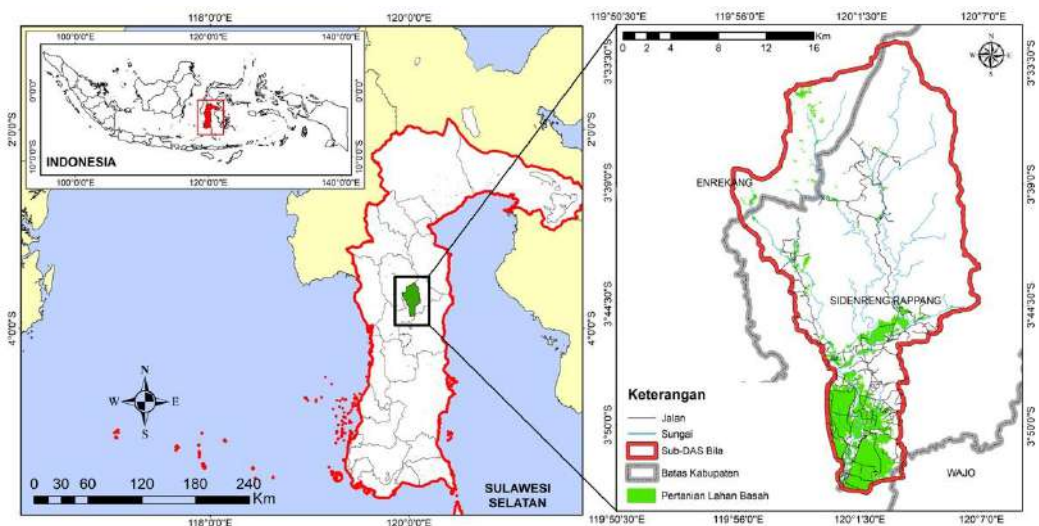
Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini mengembangkan model sistem dinamik berbasis *PowerSim* untuk mengevaluasi kebijakan pengelolaan sumber daya air irigasi di Sub-DAS Bila secara terintegrasi. Model dibangun dengan menghubungkan pasokan air bulanan hasil SWAT, kebutuhan irigasi bersih bulanan hasil CROPWAT, luas sawah hasil analisis LULC, indikator kinerja layanan irigasi, respons stres air tanaman, serta luaran produksi dan proksi ekonomi ke dalam satu kerangka analitis yang konsisten. Dengan pendekatan ini, Bab V tidak hanya menilai kondisi layanan air, tetapi juga mensimulasikan bagaimana intervensi pada sisi pasokan efektif, pengendalian permintaan, dan penguatan akses serta alokasi air dapat mengubah reliabilitas layanan, menurunkan defisit, meningkatkan hasil aktual, dan pada akhirnya mendukung keberlanjutan ketahanan pangan berbasis padi. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi lintas dimensi biofisik, kelembagaan, dan ekonomi ke dalam evaluasi skenario

kebijakan, sehingga hasilnya dapat digunakan sebagai dasar yang lebih operasional untuk merumuskan strategi pengelolaan sumber daya air yang andal, adaptif, dan berorientasi pada ketahanan pangan di Sub-DAS Bila.

5.3. Metode Penelitian

5.3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Sub-DAS Bila, Provinsi Sulawesi Selatan, yang secara administratif mencakup wilayah Kabupaten Enrekang, Sidenreng Rappang, dan Wajo. Secara geografis, Sub-DAS Bila terletak pada kisaran koordinat $119^{\circ}55'00''$ – $120^{\circ}10'00''$ BT dan $3^{\circ}33'20''$ – $3^{\circ}53'20''$ LS, dengan luas wilayah sekitar $\pm 41.914,86$ ha. Wilayah ini merupakan bagian penting dari sistem hidrologi DAS Bila yang berfungsi sebagai penyangga utama pasokan air bagi sistem irigasi lahan sawah di bagian hilir. Batas Sub-DAS dan jaringan sungai utama ditetapkan melalui delineasi berbasis DEM untuk memperoleh batas tangkapan, jaringan aliran, dan titik outlet sebagai representasi keluaran hidrologi sistem. Pada Bab V, area layanan pertanian direpresentasikan melalui luas lahan sawah (*Area_ha*) hasil analisis LULC, sehingga model dapat menautkan kinerja layanan air irigasi dengan *outcome* produksi padi pada skala pengelolaan Sub-DAS (Gambar 35).



Gambar 35. Lokasi penelitian Sub-DAS Bila, Provinsi Sulawesi Selatan.

Waktu penelitian mencakup dua bagian, yaitu waktu pelaksanaan kegiatan penelitian dan periode simulasi model. Pengumpulan data, verifikasi lapangan, dan penyiapan informasi pendukung dilaksanakan pada Agustus–Oktober 2024 di wilayah Sub-DAS Bila. Selanjutnya, pengolahan data, penyusunan struktur model, serta simulasi sistem dinamik dilakukan pada November–Desember 2024 di Laboratorium Agroeinformatika, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Periode simulasi model ditetapkan untuk menjaga konsistensi dengan baseline dan horizon proyeksi pada bab-bab sebelumnya. Model sistem dinamik dijalankan pada

periode 2011–2036 dengan *timestep* bulanan, di mana periode 2011–2023 merepresentasikan fase baseline historis, sedangkan periode 2024–2036 merepresentasikan fase evaluasi kebijakan. Penggunaan satu horizon simulasi yang kontinu dimaksudkan agar respons sistem terhadap perubahan kebijakan dapat dibaca secara utuh dari kondisi awal hingga periode proyeksi, sekaligus menjaga keterlacakan terhadap input pasokan air, kebutuhan irigasi, dan luas sawah yang berasal dari bab-bab sebelumnya.

Dalam penelitian ini, kalender tanam diseragamkan menjadi dua musim tanam utama, yaitu MT1 pada Oktober–Maret dan MT2 pada April–Agustus, sedangkan September diperlakukan sebagai masa bera. Penetapan ini digunakan secara konsisten untuk seluruh evaluasi musiman pada Bab V, termasuk pembacaan hasil, produksi, dan stabilitas produksi. Dengan demikian, interpretasi perilaku sistem tidak mengikuti pembagian semester kalender Januari–Juni dan Juli–Desember, tetapi mengikuti tahun tanam yang relevan secara operasional bagi sistem irigasi dan budidaya padi di wilayah studi.

Untuk menjaga konsistensi analitis, evaluasi musiman hanya dihitung dari musim tanam yang lengkap, yaitu MT1 Oktober–Maret dan MT2 April–Agustus. Sementara itu, evaluasi tahunan dihitung berdasarkan tahun tanam Oktober–September, bukan tahun kalender Januari–Desember. Dengan pendekatan ini, indikator stabilitas produksi lebih mencerminkan perilaku sistem tanam–irigasi yang sebenarnya, karena fase persiapan lahan, pertumbuhan, dan panen tetap berada dalam satu unit analisis yang utuh.

5.3.2. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan penelitian berupa deret waktu keluaran model dan data pendukung yang diintegrasikan ke dalam model sistem dinamik untuk membangun rantai pasokan–kebutuhan–kinerja layanan–respons tanaman–*outcome* produksi dan ekonomi. Bahan yang digunakan meliputi:

- a. **Data ketersediaan air (*supply*) berbasis SWAT.** Data ketersediaan air direpresentasikan menggunakan hasil air bulanan atau water yield ($WYLD_{mm}$; mm/bulan) yang dirouting hingga outlet Sub-DAS dan diperlakukan sebagai proksi pasokan air yang tersedia untuk mendukung layanan irigasi. $WYLD_{mm}$ merepresentasikan kontribusi efektif dari limpasan permukaan (Q_{surf}), aliran lateral (Q_{lat}), dan aliran dasar atau air tanah (Q_{gw}) terhadap aliran sungai, sehingga secara operasional dapat digunakan sebagai indikator pasokan potensial sistem (Bailey *et al.*, 2025; Pang *et al.*, 2020). Deret waktu $WYLD_{mm}$ untuk baseline mengacu pada hasil simulasi Bab II periode 2011–2023, sedangkan struktur periode proyeksi mengikuti kerangka analisis Bab IV untuk horizon 2024–2036.
- b. **Data kebutuhan irigasi (*demand*) berbasis CROPWAT.** Permintaan air irigasi direpresentasikan sebagai kebutuhan irigasi bersih bulanan ($Demand_{Net_{mm}}$; mm/bulan) yang diperoleh dari hasil simulasi CROPWAT. Data ini diperlakukan sebagai kebutuhan dasar sistem, sedangkan intervensi kebijakan pada sisi permintaan dimodelkan melalui parameter *Demand_reduction* (0–1) yang menurunkan kebutuhan efektif air. Dengan demikian, model tidak mengubah dasar agronominya, tetapi mengevaluasi bagaimana strategi pengelolaan permintaan dapat menekan tekanan kebutuhan pada bulan-bulan kritis.

- c. **Data penggunaan/tutupan lahan (LULC) dan luas sawah (Area_ha).** Luas sawah (*Area_ha*; ha) diturunkan dari analisis LULC sebagai variabel yang menghubungkan hasil per satuan luas dengan produksi padi total. Dalam Bab V, *Area_ha* digunakan sebagai parameter representatif untuk mengonversi hasil (*Yield_actual*; ton/ha/musim) menjadi produksi (*Rice_production*; ton/musim). Untuk menjaga keterbandingan antar-skenario kebijakan, *Area_ha* diperlakukan tetap selama eksperimen simulasi, sehingga perbedaan *output* produksi terutama merefleksikan perubahan kinerja layanan irigasi dan bukan perubahan luas sawah. Penetapan nilai *Area_ha* dilakukan berdasarkan informasi spasial LULC yang konsisten dengan analisis pada Bab IV.
- d. **Data agronomi dan ekonomi.** Parameter agronomi utama adalah *Yield_potential*, yaitu hasil potensial tanpa cekaman air, yang pada Bab V ditetapkan sebesar 8,00 ton/ha/musim. Parameter ekonomi menggunakan harga gabah sebagai konstanta untuk menghitung proksi manfaat ekonomi, yang ditetapkan sebesar Rp 4.500,00/kg. Kedua parameter ini dipertahankan konstan antar-skenario agar perbedaan hasil dapat diatribusikan secara langsung pada perubahan kinerja layanan irigasi, bukan pada variasi harga atau asumsi agronomi lain.
- e. **Data kualitas air sebagai dasar asumsi sistem.** Data kualitas air dari Bab III dan Bab IV digunakan sebagai dasar konteks sistem untuk menegaskan bahwa mutu air tetap merupakan bagian dari *linked modeling chain* penelitian ini. Hasil analisis sebelumnya menunjukkan bahwa kualitas air pada kondisi baseline maupun pada skenario proyeksi masih layak untuk irigasi secara regulatif, walaupun pada segmen tertentu margin keselamatannya mulai menipis. Oleh karena itu, pada Bab V kualitas air tetap diakui sebagai konteks biofisik penting sistem, tetapi tidak diaktifkan sebagai pembatas kuantitatif dalam eksperimen inti kebijakan. Dengan demikian, fokus simulasi kebijakan diarahkan pada mekanisme yang secara langsung menentukan kinerja layanan irigasi, yaitu pasokan efektif, kebutuhan efektif, dan tata kelola distribusi, tanpa memutus keterlacakan terhadap dimensi kualitas air yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

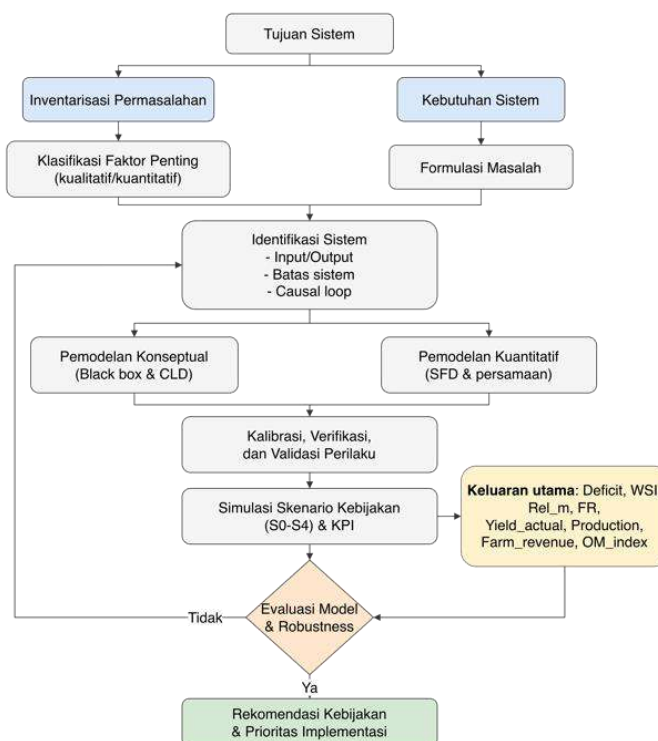
Alat analisis yang digunakan adalah *PowerSim Studio 10* untuk membangun dan menjalankan model sistem dinamik. Pengolahan data, penyusunan tabel input, rekapitulasi keluaran, dan perhitungan indikator kinerja skenario dilakukan menggunakan *Microsoft Excel*. Seluruh input diselaraskan pada skala waktu bulanan untuk menjaga konsistensi pemadanan antara pasokan dan kebutuhan, termasuk penyeragaman satuan, rentang waktu simulasi, dan format data agar kompatibel dengan lingkungan *PowerSim*.

5.3.3. Pengembangan Model Sistem Dinamik

Pengembangan model sistem dinamik dilakukan untuk membangun kerangka evaluasi kebijakan pengelolaan sumber daya air irigasi pada skala Sub-DAS Bila secara terintegrasi (Gambar 36). Model disusun untuk menautkan dinamika pasokan dan kebutuhan air bulanan dengan indikator kinerja layanan irigasi, respons stres air tanaman, serta implikasinya terhadap hasil padi, produksi, dan proksi manfaat ekonomi. Dengan kerangka ini, evaluasi kebijakan tidak berhenti pada pertanyaan apakah air tersedia, tetapi diperluas pada bagaimana air yang tersedia diterjemahkan menjadi

layanan irigasi yang andal, bagaimana layanan tersebut memengaruhi stres air tanaman, dan bagaimana perubahan stres air selanjutnya memengaruhi *outcome* produksi dan ekonomi.

Secara metodologis, penyusunan model dilakukan secara bertahap melalui empat level representasi, yaitu tujuan sistem (*goal-seeking system*), peta sistem dan batas sistem dalam bentuk *black box*, model kausal dalam bentuk *causal loop diagram* (CLD), dan model kuantitatif dalam bentuk *stock and flow diagram* (SFD) yang diimplementasikan dalam *PowerSim*. Pendekatan bertahap ini untuk memastikan bahwa struktur model tidak hanya konsisten secara matematis, tetapi juga logis secara konseptual dan relevan secara kebijakan (Metic *et al.*, 2024; Naugle *et al.*, 2024).

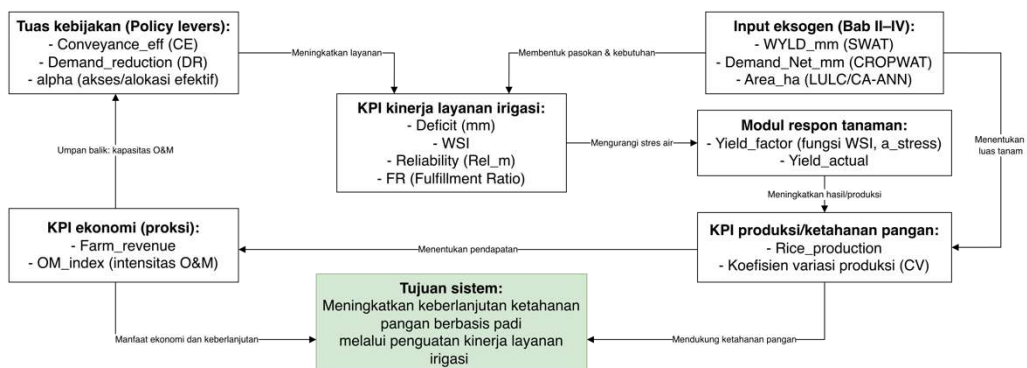


Gambar 36. Tahapan pemodelan sistem dinamik

5.3.3.1. Tujuan sistem dan indikator keberhasilan (*Goal-seeking system*)

Model dirancang sebagai sistem berorientasi tujuan (*goal-seeking system*) (Hristov *et al.*, 2024; Naugle *et al.*, 2024), yaitu meningkatkan keberlanjutan ketahanan pangan berbasis padi melalui penguatan kinerja layanan irigasi pada skala intra-musiman (Gambar 37). Secara operasional, tujuan sistem adalah meningkatkan pemenuhan kebutuhan air irigasi secara andal pada bulan-bulan yang relevan bagi musim tanam, sehingga stres air tanaman dapat ditekan dan produktivitas padi menjadi lebih stabil. Penekanan pada skala intramusiman dipilih karena pada sistem monsun, risiko produksi sering kali ditentukan oleh kegagalan layanan yang berulang pada jendela waktu tertentu, bukan sekadar oleh kecukupan air tahunan..

Untuk menerjemahkan tujuan tersebut ke dalam kerangka evaluasi yang terukur, indikator keberhasilan disusun secara berjenjang sesuai rantai proses dalam model. Pada tingkat kinerja layanan irigasi, indikator utama meliputi *Deficit*, *Water Stress Index* (WSI), reliabilitas bulanan (*Rel_m*), dan *fulfillment ratio* (FR). Pada tingkat respons tanaman, indikator difokuskan pada *Yield_actual* sebagai hasil aktual yang dipengaruhi oleh stres air. Pada tingkat *outcome*, indikator yang digunakan meliputi *Rice_production* dan koefisien variasi (CV) produksi sebagai proksi stabilitas ketahanan pangan, serta *Farm_revenue* sebagai proksi manfaat ekonomi. Selain itu, *OM_index* dimasukkan sebagai indikator pendukung untuk merepresentasikan intensitas kebutuhan operasi dan pemeliharaan pada setiap skenario kebijakan. Dengan susunan tersebut, tujuan sistem tidak hanya diterjemahkan sebagai peningkatan layanan air, tetapi sebagai perbaikan terintegrasi dari layanan, hasil, produksi, stabilitas, dan manfaat ekonomi.



Gambar 37. Tujuan sistem dan kerangka indikator keberhasilan (KPI) model pengelolaan sumber daya air Sub-DAS Bila.

5.3.3.2. Peta sistem dan batas sistem (*black box*)

Setelah tujuan sistem ditetapkan, langkah berikutnya adalah menyusun peta sistem dan batas sistem dalam bentuk *black box*. Pada penelitian ini, *black box* digunakan untuk menetapkan secara eksplisit komponen yang diperlakukan sebagai faktor eksternal, domain intervensi kebijakan, proses inti yang dimodelkan, serta keluaran yang dievaluasi. Dengan demikian, fungsi *black box* bukan sekadar mendeskripsikan gambar, tetapi membangun batas analitis model agar ruang lingkup simulasi tetap jelas, terukur, dan sesuai dengan tujuan penelitian (Amorocho-Daza *et al.*, 2025; Iwanaga *et al.*, 2021).

Dalam peta sistem ini, faktor eksternal yang tidak dikendalikan secara langsung ditempatkan sebagai input tidak terkendali (*drivers/forcing*). Kelompok ini meliputi iklim, perubahan penggunaan/tutupan lahan dan kondisi DAS, tekanan demografis dan ekonomi yang memengaruhi kebutuhan air, serta variabilitas hidrologi musiman dan intra-musiman. Komponen-komponen tersebut dimasukkan karena berpengaruh terhadap perilaku sistem irigasi, tetapi tidak dimanipulasi secara langsung dalam eksperimen kebijakan penelitian ini. Dengan kata lain, model tidak bertujuan mengendalikan iklim atau perubahan lanskap, melainkan mengevaluasi bagaimana

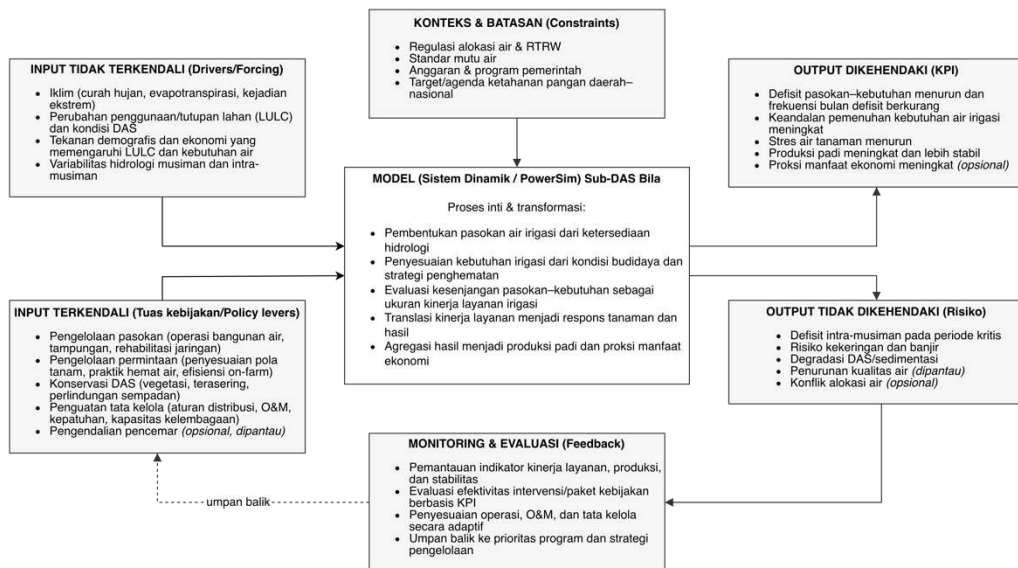
sistem irigasi merespons kondisi eksternal tersebut melalui kebijakan pengelolaan yang lebih operasional.

Black box juga menetapkan *input* terkendali sebagai domain intervensi kebijakan. Pada level konseptual, domain ini digambarkan secara lebih luas, yaitu pengelolaan pasokan, pengelolaan permintaan, konservasi DAS, penguatan tata kelola, dan pengendalian pencemar. Namun, pada tahap kuantifikasi tidak seluruh domain konseptual tersebut diaktifkan sebagai tuas kebijakan inti. Untuk menjaga fokus penelitian pada evaluasi layanan irigasi yang paling operasional dan kompatibel dengan struktur data yang tersedia, domain intervensi tersebut direduksi menjadi tiga tuas kebijakan utama, yaitu *Conveyance_eff* sebagai representasi efisiensi penyaluran, *Demand_reduction* sebagai representasi pengelolaan permintaan, dan *alpha* sebagai representasi akses atau alokasi efektif yang mencerminkan kapasitas operasi, aturan distribusi, koordinasi, serta kepatuhan kelembagaan. Dengan demikian, *black box* berfungsi sebagai tahap penyaringan konseptual, sedangkan tiga tuas kebijakan pada model kuantitatif merupakan hasil reduksi metodologis berdasarkan relevansi, keterukuran, dan keterlacakan.

Selain membedakan input tidak terkendali dan input terkendali, *black box* juga menetapkan konteks dan batasan sistem (*constraints*), yaitu regulasi alokasi air dan RTRW, standar mutu air, anggaran dan program pemerintah, serta target ketahanan pangan daerah hingga nasional. Unsur-unsur ini tidak dimodelkan sebagai variabel keputusan yang berubah setiap bulan, tetapi diperlakukan sebagai kerangka pembatas yang menentukan ruang kebijakan yang realistis.

Keluaran sistem dibedakan menjadi *output* dikehendaki dan *output* tidak dikehendaki. *Output* dikehendaki mencerminkan sasaran kebijakan, yaitu menurunnya defisit pasokan–kebutuhan, meningkatnya keandalan pemenuhan kebutuhan irigasi, menurunnya stres air tanaman, meningkatnya produksi padi, dan membaiknya manfaat ekonomi. Sebaliknya, *output* tidak dikehendaki diposisikan sebagai risiko sistem, seperti defisit intra-musiman pada periode kritis, risiko kekeringan dan banjir, degradasi DAS atau sedimentasi, serta penurunan kualitas air dan potensi konflik alokasi.

Dalam peta sistem ini, monitoring dan evaluasi ditempatkan sebagai mekanisme umpan balik. Posisi tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi tidak berhenti pada penilaian kinerja, tetapi digunakan untuk mendukung penyesuaian operasi, penguatan O&M, dan penyempurnaan kebijakan secara adaptif. Dengan demikian, *black box* pada penelitian ini berfungsi sebagai perangkat metodologis untuk menetapkan batas sistem, mengklasifikasikan komponen model, dan menjelaskan transisi dari sistem konseptual ke model kausal dan model kuantitatif (Gambar 38). Perlu ditegaskan pula bahwa kualitas air tetap dipertahankan dalam *black box* sebagai bagian dari konteks dan risiko sistem, karena hasil Bab III dan Bab IV menunjukkan bahwa mutu air masih layak untuk irigasi, walaupun pada beberapa segmen margin keselamatannya mulai menipis. Oleh sebab itu, pada Bab V kualitas air tidak diaktifkan sebagai pembatas kuantitatif dalam eksperimen skenario inti, tetapi tetap diakui dalam batas sistem sebagai faktor yang dipantau dan dapat diintegrasikan pada pengembangan model lanjutan.



Gambar 38. Diagram *black box* model sistem dinamik pengelolaan sumber daya air Sub-DAS Bila.

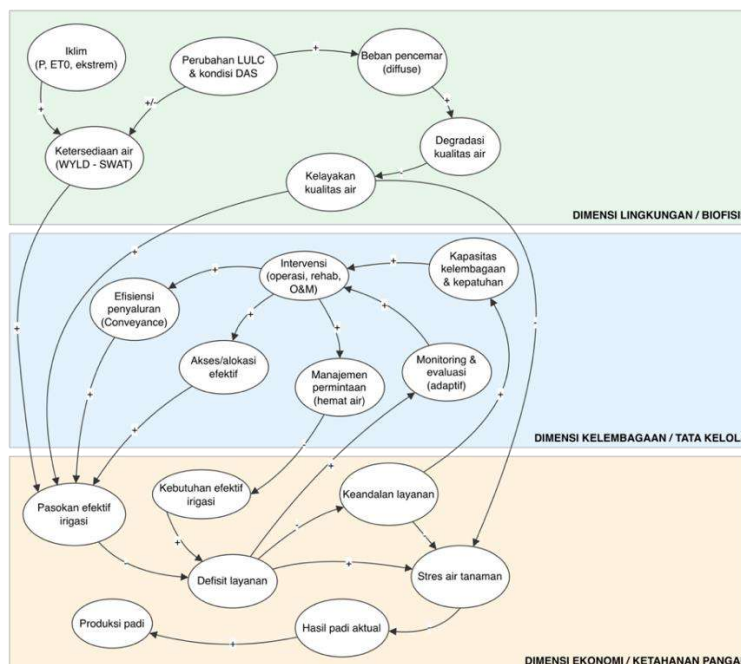
5.3.3.3. Penyusunan model kausal (*causal loop diagram*/CLD)

Setelah batas sistem ditetapkan melalui *black box*, hubungan sebab-akibat antar-komponen disusun dalam bentuk *causal loop diagram*. Penyusunan CLD bertujuan memastikan bahwa perilaku model memiliki dasar logika proses yang konsisten sebelum diterjemahkan ke dalam persamaan kuantitatif (Giordano *et al.*, 2025). CLD pada penelitian ini disusun dalam tiga dimensi utama, yaitu dimensi lingkungan atau biofisik, dimensi kelembagaan atau tata kelola, dan dimensi ekonomi atau ketahanan pangan (Gambar 39).

Pada dimensi lingkungan atau biofisik, iklim serta perubahan penggunaan/tutupan lahan dan kondisi DAS memengaruhi ketersediaan air, sekaligus memengaruhi beban pencemar difus dan degradasi kualitas air. Pada dimensi kelembagaan atau tata kelola, intervensi operasi, rehabilitasi, dan O&M ditempatkan sebagai simpul kebijakan yang memengaruhi efisiensi penyaluran, akses atau alokasi efektif, dan manajemen permintaan. Pada dimensi ekonomi atau ketahanan pangan, pasokan efektif irigasi dan kebutuhan efektif irigasi membentuk defisit layanan. Besarnya defisit kemudian memengaruhi keandalan layanan dan stres air tanaman. Stres air tanaman selanjutnya menurunkan hasil padi aktual, sedangkan hasil aktual menentukan produksi padi sebagai *outcome* utama sistem.

Secara konseptual, CLD memperlihatkan dua logika besar. Pertama, terdapat jalur perbaikan layanan, yaitu ketika intervensi pengelolaan meningkatkan efisiensi penyaluran, memperbaiki akses atau alokasi, dan menurunkan kebutuhan efektif, maka peluang terpenuhinya kebutuhan air meningkat, sehingga defisit dan stres air menurun. Kedua, terdapat jalur risiko, yaitu ketika tekanan biofisik meningkat atau tata kelola distribusi melemah, maka defisit layanan cenderung meningkat dan *outcome* produksi menjadi lebih rentan. Secara metodologis, CLD juga berfungsi sebagai jembatan antara

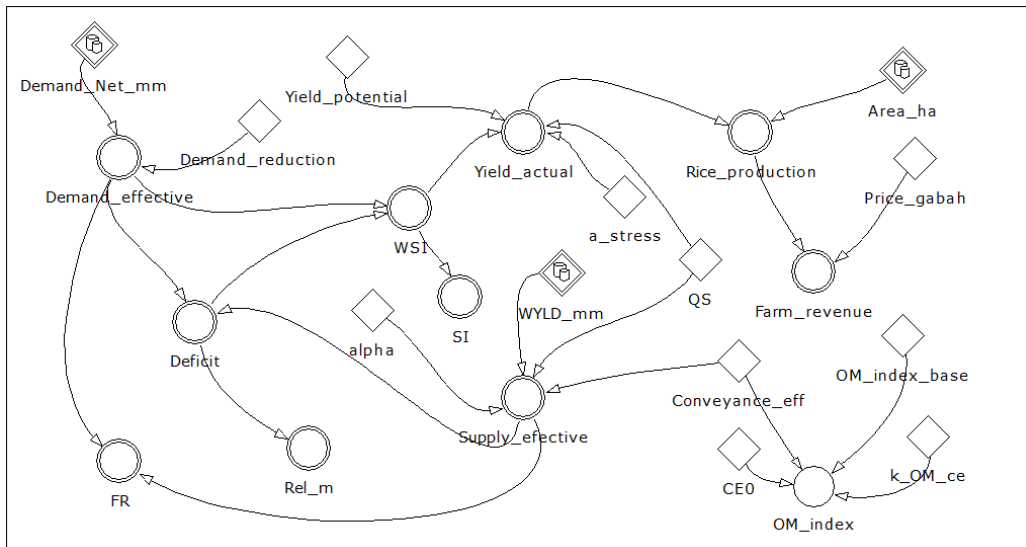
black box dan model kuantitatif. Variabel dan hubungan yang muncul pada CLD menjadi dasar bagi pemilihan variabel eksogen, variabel endogen, dan parameter pada SFD. Namun, tidak semua simpul pada CLD harus diterjemahkan menjadi variabel simulasi inti. Beberapa unsur tetap dipertahankan pada level kausal sebagai penjelas konteks, sedangkan unsur yang langsung relevan dengan tujuan evaluasi kebijakan diaktifkan dalam model kuantitatif. Dengan demikian, CLD tidak sekadar menggambarkan hubungan antar-variabel, tetapi menegaskan bahwa persoalan pengelolaan air di Sub-DAS Bila bersifat lintas dimensi dan tidak dapat dijelaskan hanya dari satu sisi sistem.



Gambar 39. *Causal Loop Diagram* (CLD) tiga dimensi untuk model pengelolaan sumber daya air Sub-DAS Bila.

5.3.3.4. Translasi CLD menjadi model kuantitatif (SFD)

CLD yang telah disusun selanjutnya diterjemahkan menjadi *stock and flow diagram* untuk memperoleh model kuantitatif yang dapat disimulasikan (Gambar 40). Translasi dilakukan dengan menurunkan variabel konseptual menjadi variabel operasional, menetapkan satuan, serta menyusun hubungan matematis yang mewakili aliran informasi dan perhitungan indikator kinerja (Nahar, 2024; Naugle *et al.*, 2024; Rajah & Kopainsky, 2025). Model kuantitatif penelitian ini difokuskan pada rantai pasokan–kebutuhan–kinerja layanan–respons tanaman–produksi–ekonomi, sementara beberapa unsur konseptual lain, seperti kualitas air, konservasi DAS, dan tekanan demografis, dipertahankan sebagai konteks eksogen atau risiko yang tidak diskennariokan secara eksplisit pada eksperimen inti.



Gambar 40. Stock and Flow Diagram (SFD) model sistem dinamik pengelolaan sumber daya air Sub-DAS Bila pada PowerSim Studio 10.

Struktur model dibagi ke dalam enam submodel, yaitu submodel pasokan, submodel kebutuhan, submodel kinerja layanan, submodel respons tanaman dan produksi, submodel ekonomi, serta submodel dukungan pengelolaan. Pemisahan ini dimaksudkan untuk menjaga keterbacaan model, memudahkan verifikasi persamaan, dan memastikan bahwa tiap komponen tetap terhubung secara logis dalam rantai pemodelan.

- a. **Submodel pasokan (supply).** Submodel pasokan membentuk pasokan efektif air irigasi dari *water yield* bulanan hasil SWAT yang telah disesuaikan oleh efisiensi penyaluran dan faktor akses/alokasi efektif. Secara matematis, pasokan efektif pada bulan ke-*t* dirumuskan sebagai:

$$Supply_effective(t) = WYLD_mm(t) \times Conveyance_eff \times \alpha$$

dengan *Supply_effective(t)* adalah pasokan efektif air irigasi pada bulan ke-*t* dalam mm/bulan, *WYLD_mm(t)* adalah *water yield* bulanan hasil SWAT, *Conveyance_eff* adalah efisiensi penyaluran air, dan *alpha* adalah faktor akses/alokasi efektif yang merepresentasikan kapasitas operasi, aturan distribusi, koordinasi, dan kepatuhan kelembagaan. Formulasi ini menunjukkan bahwa air yang secara hidrologis tersedia belum seluruhnya menjadi layanan efektif, karena masih dipengaruhi oleh kehilangan penyaluran dan efektivitas distribusi.

- b. **Submodel kebutuhan (demand).** Submodel kebutuhan membentuk kebutuhan efektif dari kebutuhan irigasi bersih bulanan hasil CROPWAT yang disesuaikan dengan fraksi pengurangan kebutuhan melalui intervensi pengelolaan permintaan. Hubungan ini dirumuskan sebagai:

$$Demand_effective(t) = Demand_Net_mm(t) \times (1 - Demand_reduction)$$

dengan $Demand_effective(t)$ adalah kebutuhan efektif air irigasi pada bulan ke- t , $Demand_Net_mm(t)$ adalah kebutuhan irigasi bersih bulanan, dan $Demand_reduction$ adalah fraksi pengurangan kebutuhan akibat strategi *demand management*. Formulasi ini merepresentasikan bahwa kebutuhan air aktual yang harus dipenuhi sistem dapat ditekan melalui praktik hemat air, penyesuaian pengelolaan lahan, atau strategi budidaya yang lebih efisien.

- c. **Submodel kinerja layanan.** Submodel kinerja layanan dibangun untuk menangkap kesenjangan antara pasokan efektif dan kebutuhan efektif, serta menerjemahkannya menjadi indikator layanan utama. Defisit air pada bulan ke- t dihitung sebagai:

$$Deficit(t) = \max[0, Demand_effective(t) - Supply_effective(t)]$$

dengan $Deficit(t)$ dinyatakan dalam mm/bulan. Bentuk ini memastikan bahwa defisit tidak bernilai negatif ketika pasokan melebihi kebutuhan.

Rasio pemenuhan kebutuhan atau *fulfillment ratio* (FR) dihitung sebagai proporsi kebutuhan efektif yang berhasil dipenuhi sistem pada bulan ke- t . Untuk menghindari pembagian dengan nol pada bulan tanpa kebutuhan irigasi, digunakan formulasi sebagai berikut:

$$FR(t) = \begin{cases} 1, & \text{jika } Demand_effective(t) = 0 \\ \min\left(1, \frac{Supply_effective(t)}{Demand_effective(t)}\right), & \text{jika } Demand_effective(t) > 0 \end{cases}$$

dengan $FR(t)$ dibatasi pada rentang 0 sampai 1. Pada bulan ketika tidak ada kebutuhan irigasi, $FR(t)$ ditetapkan 1 karena sistem tidak berada dalam kondisi gagal melayani.

Reliabilitas bulanan (Rel_m) dinyatakan sebagai indikator biner yang menunjukkan apakah kebutuhan air pada bulan tertentu terpenuhi sepenuhnya atau tidak. Secara matematis:

$$Rel_m(t) = \begin{cases} 1, & Deficit(t) = 0 \\ 0, & Deficit(t) > 0 \end{cases}$$

dengan $Rel_m(t)=1$ menunjukkan bulan tanpa defisit, dan $Rel_m(t)=0$ menunjukkan bulan mengalami defisit. Rata-rata Rel_m sepanjang horizon simulasi selanjutnya digunakan sebagai ukuran reliabilitas kejadian pemenuhan kebutuhan irigasi.

Indeks stres air atau *water stress index* (WSI) dihitung sebagai defisit relatif terhadap kebutuhan efektif, sehingga mencerminkan tingkat tekanan layanan yang dialami tanaman pada bulan ke- t . Untuk menjaga konsistensi logis pada bulan tanpa kebutuhan irigasi, digunakan bentuk:

$$WSI(t) = \begin{cases} 0, & \text{jika } Demand_effective(t) = 0 \\ \frac{Deficit(t)}{Demand_effective(t)}, & \text{jika } Demand_effective(t) > 0 \end{cases}$$

dengan $WSI(t)$ dibatasi pada rentang 0 sampai 1. Nilai mendekati 0 menunjukkan tekanan air rendah, sedangkan nilai mendekati 1 menunjukkan kondisi stres air yang sangat berat.

- d. **Submodel respons tanaman dan produksi.** Submodel ini menghubungkan kinerja layanan bulanan dengan hasil padi musiman. Karena hasil padi tidak ditentukan oleh satu bulan tunggal, tetapi oleh akumulasi tekanan air selama musim tanam, maka WSI bulanan terlebih dahulu diagregasi menjadi WSI musiman. Untuk musim tanam ke-s, nilai rata-rata stres air dinyatakan sebagai:

$$\overline{WSI}(s) = \frac{1}{n(s)} \sum_{t=1}^{n(s)} WSI(t)$$

dengan $\overline{WSI}(s)$ adalah rata-rata indeks stres air pada musim tanam ke-s, dan $n(s)$ adalah jumlah bulan dalam musim tanam tersebut. Dalam penelitian ini, musim tanam direpresentasikan sebagai MT1 (Oktober–Maret) dan MT2 (April–Agustus), sedangkan September diperlakukan sebagai masa bera.

Hasil aktual padi pada musim tanam ke-s kemudian dihitung sebagai fungsi dari hasil potensial dan penalti proporsional akibat stres air, yaitu:

$$Yield_actual(s) = \max[0, Yield_potential(s) \times (1 - a_stress \times \overline{WSI}(s))]$$

dengan $Yield_actual(s)$ adalah hasil aktual musim tanam ke-s dalam ton/ha/musim, $Yield_potential$ adalah hasil potensial tanpa cekaman air, dan a_stress adalah parameter sensitivitas hasil terhadap stres air. Bentuk ini menunjukkan bahwa semakin tinggi stres air musiman, semakin besar proporsi penalti terhadap hasil potensial. Fungsi $\max[0, \dots]$ digunakan untuk memastikan bahwa hasil aktual tidak bernilai negatif secara matematis. Dalam model ini, $Yield_potential$ ditetapkan sebesar 8,00 ton/ha/musim.

Produksi padi musiman dihitung dari hasil aktual dan luas sawah, yaitu:

$$Rice_production(s) = Yield_actual(s) \times Area_ha$$

dengan $Rice_production(s)$ adalah produksi padi musim tanam ke-s dalam ton/musim dan $Area_ha$ adalah luas sawah dalam hektar. Dengan struktur ini, perubahan layanan irigasi diterjemahkan secara langsung menjadi perubahan hasil per hektar, lalu terakumulasi menjadi perubahan produksi pada skala sistem.

- e. **Submodel ekonomi.** Submodel ekonomi dibangun untuk merepresentasikan manfaat ekonomi secara sederhana dalam bentuk proksi pendapatan usaha tani ($Farm_revenue$). Karena produksi dinyatakan dalam ton dan harga gabah dinyatakan

dalam rupiah per kilogram, maka digunakan faktor konversi 1000 dari ton ke kilogram. Persamaannya adalah:

$$Farm_revenue(s) = Rice_production(s) \times 1000 \times Price_gabah$$

dengan $Farm_revenue(s)$ adalah proksi pendapatan musim tanam ke- s dalam rupiah dan $Price_gabah$ adalah harga gabah dalam Rp/kg. Dalam penelitian ini, $Price_gabah$ ditetapkan sebesar Rp 4.500,00/kg. Nilai ini diperlakukan sebagai harga konstan, sehingga perubahan $Farm_revenue$ sepenuhnya merefleksikan perubahan produksi, bukan dinamika harga pasar.

- f. **Submodel dukungan pengelolaan.** Submodel dukungan pengelolaan direpresentasikan oleh OM_index sebagai proksi intensitas operasi dan pemeliharaan, bukan sebagai biaya riil moneter. Nilai dasar 100 merepresentasikan intensitas O&M pada kondisi eksisting. Pada S1, OM_index dinaikkan menjadi 120, yang mencerminkan kebutuhan peningkatan intensitas O&M sebesar 20% untuk mendukung perbaikan efisiensi penyaluran melalui rehabilitasi jaringan, pengurangan kehilangan air, dan penguatan operasi distribusi. Pada S4, OM_index dinaikkan menjadi 130, yang mencerminkan kebutuhan peningkatan intensitas O&M sebesar 30% karena paket terpadu tidak hanya memerlukan dukungan teknis seperti pada S1, tetapi juga tambahan intensitas pengelolaan untuk koordinasi, monitoring, penegakan aturan distribusi, dan penguatan tata kelola (Basukala *et al.*, 2024). Sebaliknya, pada S2 dan S3, OM_index dipertahankan pada 100 karena intervensi difokuskan pada pengelolaan permintaan dan penguatan akses atau alokasi efektif tanpa diasumsikan memerlukan peningkatan intensitas O&M fisik jaringan dalam model inti.

Definisi, satuan, sumber data, dan kategori variabel kunci model dirangkum pada Tabel 16 untuk memastikan konsistensi operasional dan keterlacakan antar-skenario.

Tabel 16. Variabel kunci model sistem dinamik pengelolaan SDA Sub-DAS Bila

Kelompok	Variabel (nama di model)	Satuan	Sumber data	Definisi operasional singkat
Input eksogen	$WYLD_mm(t)$	mm/bulan	SWAT (Bab II dan IV)	<i>Water yield</i> bulanan sebagai proksi pasokan air potensial pada skala Sub-DAS, yang merepresentasikan kontribusi efektif Q_{surf} , Q_{lat} , dan Q_{gw} terhadap aliran sungai (Bailey <i>et al.</i> , 2025; Pang <i>et al.</i> , 2020).
Input eksogen	$Demand_Net_mm(t)$	mm/bulan	CROPWAT (Bab II dan IV)	Kebutuhan irigasi bersih bulanan (<i>net irrigation requirement</i>) sebagai kebutuhan dasar air irigasi tanaman.
Input eksogen	$Area_ha$	ha	LULC/CA-ANN (Bab IV)	Luas sawah yang digunakan untuk mengonversi hasil per satuan luas menjadi produksi padi pada skala sistem.
Input eksogen	$Price_gabah$	Rp/kg	Data lapangan	Harga gabah yang digunakan sebagai

				konstanta untuk menghitung proksi pendapatan usaha tani. Dalam penelitian ini ditetapkan sebesar Rp 4.500,00/kg.
Tuas kebijakan	<i>Conveyance_eff</i>	0–1	Literatur efisiensi penyaluran	Efisiensi penyaluran air irigasi, yang merepresentasikan proporsi air yang berhasil disalurkan setelah memperhitungkan kehilangan dalam jaringan (Sumanasekara <i>et al.</i> , 2025).
Tuas kebijakan	<i>Demand_reduction</i>	0–1	Literatur hemat air/AWD	Fraksi pengurangan kebutuhan efektif melalui strategi pengelolaan permintaan, seperti praktik hemat air dan penyesuaian pengelolaan budidaya (Gao <i>et al.</i> , 2024).
Tuas kebijakan	<i>alpha</i>	0–1	Literatur tata kelola/WUA	Faktor akses/alokasi efektif yang merepresentasikan kapasitas operasi, aturan distribusi, koordinasi, dan kepatuhan kelembagaan dalam pelayanan irigasi (Wang & Wu, 2018).
Variabel antara	<i>Supply_effective(t)</i>	mm/bulan	Turunan model	Pasokan efektif air irigasi pada bulan ke- (t) , dihitung dari <i>WYLD_mm(t)</i> yang disesuaikan oleh <i>Conveyance_eff</i> dan <i>alpha</i> .
Variabel antara	<i>Demand_effective(t)</i>	mm/bulan	Turunan model	Kebutuhan efektif air irigasi pada bulan ke- (t) , dihitung dari <i>Demand_Net_mm(t)</i> yang disesuaikan oleh <i>Demand_reduction</i> .
Kinerja layanan	<i>Deficit(t)</i>	mm/bulan	Turunan model	Kekurangan pasokan terhadap kebutuhan efektif pada bulan ke- (t) , dibatasi tidak bernilai negatif.
Kinerja layanan	<i>FR(t)</i>	0–1	Turunan model	<i>Fulfillment ratio</i> bulanan, yaitu rasio pemenuhan kebutuhan efektif oleh pasokan efektif pada bulan ke- (t) .
Kinerja layanan	<i>Rel_m(t)</i>	0/1	Turunan model	Reliabilitas bulanan, bernilai 1 jika kebutuhan efektif terpenuhi tanpa defisit dan 0 jika terjadi defisit.
Kinerja layanan	<i>WSI(t)</i>	0–1	Turunan model	<i>Water Stress Index</i> bulanan, yaitu defisit relatif terhadap kebutuhan efektif pada bulan ke- (t) .
Respons tanaman	$\overline{WSI}(s)$	0–1	Turunan model	Rata-rata indeks stres air pada musim tanam ke- (s) , yang diperoleh dari agregasi <i>WSI(t)</i> selama satu musim tanam.
Respons tanaman	<i>Yield_potential(s)</i>	ton/ha/musim	Data lapangan	Hasil potensial padi tanpa cekaman air. Dalam

Respons tanaman	<i>a_stress</i>	–	Literatur dan kalibrasi/eksplorasi	penelitian ini ditetapkan sebesar 8,00 ton/ha/musim. Parameter sensitivitas hasil terhadap stres air yang mengendalikan besarnya penalti hasil akibat cekaman air musiman (He <i>et al.</i> , 2022).
Outcome	<i>Yield_actual(s)</i>	ton/ha/musim	Turunan model	Hasil aktual padi pada musim tanam ke-(s) sebagai fungsi dari <i>Yield_potential</i> dan penalti stres air musiman (Steduto <i>et al.</i> , 2012).
Outcome	<i>Rice_production(s)</i>	ton/musim	Turunan model	Produksi padi pada musim tanam ke-(s), dihitung dari <i>Yield_actual(s)</i> dikalikan <i>Area_ha</i> .
Ekonomi (proksi)	<i>Farm_revenue(s)</i>	Rp/musim	Turunan model	Proksi pendapatan usaha tani pada musim tanam ke-(s), dihitung dari <i>Rice_production(s)</i> dikalikan <i>Price_gabah</i> .
Dukungan pengelolaan (proksi)	OM_index	indeks (basis = 100)	Turunan model	Proksi intensitas O&M relatif terhadap baseline, bukan biaya riil. Nilai 100 merepresentasikan intensitas eksisting; 120 pada S1 menunjukkan peningkatan 20% untuk mendukung perbaikan efisiensi penyaluran; dan 130 pada S4 menunjukkan peningkatan 30% untuk menopang paket terpadu. S2 dan S3 tetap 100 (Basukala <i>et al.</i> , 2024).

5.3.4. Kalibrasi, Verifikasi, dan Validasi Model

Penjaminan mutu model pada penelitian ini dilakukan melalui tiga tahapan yang saling melengkapi, yaitu validasi bertingkat, verifikasi model, dan validasi perilaku. Pendekatan ini dipilih karena model sistem dinamik pada penelitian ini bukan merupakan model proses hidrologi atau agronomi yang dikalibrasi ulang secara independen, melainkan model sintesis kebijakan yang mengintegrasikan keluaran model-model proses yang telah dibangun sebelumnya ke dalam satu kerangka evaluasi skenario. Oleh karena itu, fokus utama penjaminan mutu pada Bab V terletak pada keterlacakan dan kelayakan *input*, konsistensi logika struktural, kebenaran satuan dan persamaan, serta kewajaran pola respons model terhadap perubahan kebijakan.

5.3.4.1. Validasi bertingkat (*hierarchical validation*)

Validasi bertingkat dilakukan dengan menempatkan model sistem dinamik di atas fondasi *input* yang telah melalui proses evaluasi pada tahapan analisis sebelumnya. Dalam kerangka ini, seri pasokan air bulanan *WYLD_mm* berasal dari model SWAT yang telah dikalibrasi dan divalidasi terhadap data observasi debit atau neraca air. Pada periode kalibrasi 2011–2018 dan validasi 2019–2023, kinerja SWAT menunjukkan *NSE*

masing-masing sebesar 0,77 dan 0,76, R^2 sebesar 0,80 dan 0,77, serta P_{bias} sebesar -2,12% dan -0,89%, yang menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan representasi hidrologi yang memadai dan kesalahan sistematis yang rendah untuk mendukung analisis sumber daya air (Abuhay *et al.*, 2023; Demir & Muratoglu, 2025; Moriassi *et al.*, 2015).

Di sisi kebutuhan, seri *Demand_Net_mm* diperoleh dari hasil perhitungan CROPWAT dengan parameter agronomi, kalender tanam, dan asumsi efisiensi yang telah ditetapkan secara konsisten dalam penelitian ini. Sementara itu, variabel *Area_ha* diturunkan dari analisis penggunaan/tutupan lahan untuk menghubungkan kinerja layanan air dengan *outcome* produksi padi pada skala sistem. Pendekatan validasi bertingkat ini penting untuk menegaskan bahwa Bab V tidak membangun ulang model pasokan dan kebutuhan dari awal, melainkan mensintesis hasil-hasil tersebut ke dalam model kebijakan yang berorientasi pada evaluasi skenario. Oleh sebab itu, validitas penelitian terutama ditentukan oleh konsistensi integrasi antarkomponen, bukan oleh kalibrasi ulang seluruh rantai pemodelan pada satu platform tunggal.

5.3.4.2. Verifikasi model (*model verification*)

Verifikasi model dilakukan untuk memastikan bahwa struktur persamaan, alur informasi, batas matematis, dan hubungan antarkomponen telah terdefinisi dengan benar sebelum simulasi skenario dijalankan (Mashaly *et al.*, 2024; Rafew & Rafizul, 2021; Sun *et al.*, 2025). Verifikasi mencakup tiga aspek, yaitu:

- a) **Uji unit dan konsistensi dimensi.** Pengujian dilakukan agar seluruh variabel dinyatakan dalam satuan yang seragam dan kompatibel pada tiap submodel. Variabel air dinyatakan dalam mm/bulan, luas lahan dalam ha, hasil dalam ton/ha/musim, produksi dalam ton/musim, pendapatan dalam rupiah per musim, sedangkan variabel indeks atau rasio dinyatakan tak berdimensi. Konsistensi satuan ini penting agar hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh kesalahan transformasi atau pencampuran skala waktu.
- b) **Uji batas (*boundary/constraint tests*).** Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa model tidak menghasilkan nilai yang bertentangan dengan makna fisik maupun manajerial variabel. Dalam hal ini, $Deficit(t)$ dibatasi agar selalu bernilai sama dengan atau lebih besar dari nol, $FR(t)$ dibatasi pada rentang 0 sampai 1, $WSI(t)$ dibatasi pada rentang 0 sampai 1, $Rice_production(s)$ tidak boleh bernilai negatif, dan $Farm_revenue(s)$ juga tidak boleh bernilai negatif. Selain itu, pada bulan ketika $Demand_effective(t) = 0$, model menetapkan $Deficit(t) = 0$, $WSI(t) = 0$, dan $FR(t) = 1$, sehingga perilaku model tetap logis pada periode tanpa kebutuhan irigasi.
- c) **Uji perilaku.** Pemeriksaan logika perhitungan dilakukan untuk memastikan bahwa hubungan antarvariabel berjalan sesuai rancangan konseptual model. Dalam struktur ini, peningkatan *Conveyance_eff* atau α meningkatkan $Supply_effective(t)$, sedangkan peningkatan *Demand_reduction* menurunkan $Demand_effective(t)$. Selanjutnya, peningkatan $Supply_effective(t)$ atau penurunan $Demand_effective(t)$ menurunkan $Deficit(t)$ dan $WSI(t)$, serta meningkatkan $FR(t)$ dan $Rel_m(t)$. Hubungan-hubungan ini diverifikasi melalui uji sensitivitas internal sederhana sebelum eksperimen skenario dijalankan.

5.3.4.3. Validasi perilaku (*behavioral validation*)

Validasi perilaku dilakukan untuk menilai apakah *output* model menunjukkan pola yang masuk akal dan konsisten dengan karakter sistem irigasi monsun tropis pada skala Sub-DAS, serta apakah arah respons model terhadap intervensi kebijakan sesuai dengan logika teoritis dan operasional. Pada tahap ini, yang dinilai bukan hanya besar kecilnya *output*, tetapi juga apakah pola temporal dan arah perubahan yang dihasilkan model sejalan dengan perilaku sistem nyata (Mashaly *et al.*, 2024; Naugle *et al.*, 2024). Validasi perilaku mencakup dua aspek, yaitu:

- a) **Konsistensi pola musiman**, yaitu apakah model mampu merepresentasikan kemungkinan munculnya defisit dan peningkatan stres air pada bulan-bulan ketika kebutuhan efektif tinggi atau ketika pasokan efektif melemah, serta menunjukkan perbaikan pada periode yang relatif surplus. Karena model dijalankan pada *timestep* bulanan dan hasil diinterpretasikan secara musiman, kewajaran pola intra-musiman menjadi aspek penting dalam validasi perilaku.
- b) **Konsistensi respons kebijakan**, yaitu apakah model memberikan arah perubahan yang logis ketika tuas kebijakan diaktifkan. Dalam hal ini, peningkatan *Conveyance_eff* dan *alpha* harus menurunkan tekanan layanan melalui penurunan defisit dan peningkatan reliabilitas, sedangkan peningkatan *Demand_reduction* harus menurunkan kebutuhan efektif dan menekan besaran stres air. Paket terpadu juga diharapkan memberikan perbaikan yang lebih besar dibanding intervensi tunggal karena bekerja secara simultan pada sisi pasokan, permintaan, dan tata kelola distribusi. Model dinilai layak secara perilaku apabila seluruh respons tersebut muncul secara konsisten dan tidak menghasilkan perilaku yang bertentangan dengan logika sistem.

5.3.5. Perumusan Skenario dan Desain Eksperimen Simulasi

Eksperimen simulasi pada penelitian ini dirancang untuk membandingkan efektivitas berbagai opsi kebijakan dalam meningkatkan kinerja layanan irigasi dan memperkuat *outcome* ketahanan pangan pada skala Sub-DAS Bila. Model dijalankan pada periode 2011–2036 dengan *timestep* bulanan. Dalam kerangka ini, periode 2011–2023 diperlakukan sebagai fase baseline historis, sedangkan periode 2024–2036 diperlakukan sebagai fase evaluasi kebijakan. Pemisahan ini penting agar hasil simulasi dapat dibaca secara jelas sebagai transisi dari kondisi dasar menuju respons sistem terhadap intervensi kebijakan.

Untuk menjaga keterbandingan antar-skenario, seluruh simulasi menggunakan seri input eksogen yang sama, yaitu *WYLD_mm*, *Demand_Net_mm*, *Area_ha*, dan *Price_gabah*. Dengan demikian, perbedaan *output* antar-skenario sepenuhnya ditentukan oleh perubahan parameter kebijakan yang diintervensi, yaitu *Conveyance_eff*, *Demand_reduction*, *alpha*, dan *OM_index*. Dalam penelitian ini, ringkasan KPI utama tetap disajikan untuk keseluruhan horizon simulasi 2011–2036 agar perilaku sistem dapat dibaca secara utuh dari kondisi awal hingga fase proyeksi. Namun, secara substantif interpretasi kebijakan diarahkan terutama pada periode 2024–2036 sebagai fase evaluasi kebijakan.

5.3.5.1. Definisi skenario

Skenario disusun untuk menguji empat bentuk intervensi kebijakan terhadap kondisi baseline (S0), yaitu peningkatan efisiensi penyaluran (S1), pengurangan kebutuhan efektif (S2), peningkatan akses atau alokasi efektif (S3), dan kombinasi ketiganya dalam satu paket terpadu (S4) (Tabel 17). Penyusunan ini mengikuti prinsip eksperimen kebijakan bertahap, yaitu dimulai dari skenario satu faktor untuk mengidentifikasi kontribusi relatif masing-masing tuas kebijakan, kemudian dilanjutkan dengan skenario paket untuk menilai kemungkinan efek sinergi antar-intervensi.

Dalam penelitian ini, kualitas air tidak dijadikan sebagai variabel skenario inti. Pertimbangannya bukan karena kualitas air diabaikan, melainkan karena hasil *linked modeling chain* pada Bab III dan Bab IV menunjukkan bahwa mutu air pada kondisi baseline maupun skenario 2036 masih berada pada kisaran layak untuk irigasi, meskipun margin keselamatan pada beberapa segmen mulai menipis. Oleh karena itu, pada Bab V ini kualitas air dipertahankan sebagai konteks sistem dan faktor risiko yang harus dipantau, tetapi tidak diaktifkan sebagai pembatas kuantitatif dalam eksperimen inti. Dengan demikian, fokus eksperimen diarahkan pada mekanisme yang secara langsung menentukan kinerja layanan, yaitu pasokan efektif, kebutuhan efektif, dan tata kelola distribusi.

Tabel 17. Skenario simulasi kebijakan pengelolaan air Sub-DAS Bila

Kode	Nama skenario	Tuas kebijakan yang diubah	Makna kebijakan dalam konteks pengelolaan
S0	Baseline	Tidak ada perubahan	Kondisi eksisting sistem sebagai pembanding
S1	Peningkatan efisiensi penyaluran	<i>Conveyance_eff</i> dinaikkan	Rehabilitasi jaringan, penguatan O&M, dan perbaikan distribusi
S2	Pengurangan kebutuhan efektif	<i>Demand_reduction</i> dinaikkan	Praktik hemat air, penyesuaian pengelolaan kebutuhan, dan demand management
S3	Peningkatan akses dan alokasi efektif	<i>alpha</i> dinaikkan	Penguatan tata kelola, kepatuhan, dan kapasitas kelembagaan layanan irigasi
S4	Paket terpadu	Kombinasi S1, S2, dan S3	Intervensi terpadu untuk menangkap efek sinergi antar tuas kebijakan

Secara operasional, S1, S2, dan S3 diperlakukan sebagai eksperimen satu faktor, sehingga masing-masing skenario memperlihatkan pengaruh dominan satu jalur intervensi terhadap kinerja sistem. Sementara itu, S4 diperlakukan sebagai eksperimen paket terpadu untuk menilai sejauh mana kombinasi perbaikan pasokan efektif, pengelolaan permintaan, dan penguatan akses/alokasi dapat menghasilkan perbaikan yang lebih besar dan lebih stabil dibanding kebijakan tunggal.

5.3.5.2. Indikator kinerja dan metode perbandingan

Kinerja skenario dievaluasi menggunakan indikator yang mewakili dimensi layanan irigasi, respons tanaman, *outcome* produksi, stabilitas ketahanan pangan, manfaat ekonomi, dan kebutuhan dukungan pengelolaan. Pada dimensi layanan, indikator utama meliputi *Deficit*, *WSI*, *Rel_m*, dan *FR*. Pada dimensi respons tanaman dan produksi, indikator yang digunakan adalah *Yield_actual* dan *Rice_production*. Pada dimensi ekonomi digunakan *Farm_revenue* sebagai proksi manfaat ekonomi, sedangkan pada dimensi dukungan pengelolaan digunakan *OM_index* sebagai proksi intensitas operasi dan pemeliharaan yang diperlukan untuk menopang tiap skenario.

Untuk menilai stabilitas produksi, digunakan koefisien variasi (*coefficient of variation*, *CV*) baik pada skala tahunan maupun musiman. *CV* dihitung sebagai:

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100$$

dengan *SD* adalah simpangan baku produksi dan $\bar{x}$ adalah rata-rata produksi pada skala waktu yang dianalisis. Dalam penelitian ini, koefisien variasi produksi dihitung dengan dua dasar agregasi. Pertama, *CV* tahunan dihitung berdasarkan tahun tanam Oktober–September agar satu siklus tanam dan operasi irigasi terbaca dalam satu unit tahunan yang utuh. Kedua, *CV* musiman dihitung berdasarkan musim tanam lengkap, yaitu MT1 Oktober–Maret dan MT2 April–Agustus, sedangkan bulan September tidak dimasukkan ke dalam agregasi produksi musiman karena diperlakukan sebagai masa bera. Karena simulasi dimulai pada Januari 2011 dan berakhir pada Desember 2036, maka perhitungan indikator stabilitas hanya menggunakan unit musim dan tahun tanam yang lengkap. *CV* yang lebih rendah menunjukkan produksi yang lebih stabil, sedangkan *CV* yang lebih tinggi menunjukkan variabilitas produksi yang lebih besar antar-musim atau antar-tahun.

5.4. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi model sistem dinamik pengelolaan sumber daya air Sub-DAS Bila dianalisis untuk kondisi baseline (*S0*) dan empat skenario kebijakan (*S1–S4*). Pembahasan difokuskan pada rantai keterkaitan yang telah dibangun dalam struktur model, yaitu bagaimana perubahan pasokan efektif dan kebutuhan efektif membentuk defisit dan indikator kinerja layanan, bagaimana indikator layanan tersebut diteruskan menjadi stres air tanaman dan penalti hasil, serta bagaimana perubahan hasil dan produksi selanjutnya memengaruhi stabilitas pasokan pangan dan proksi manfaat ekonomi. Dengan kerangka ini, perbandingan antar-skenario tidak hanya menilai besar kecilnya perubahan kinerja, tetapi juga menjelaskan mekanisme penyebabnya melalui intervensi pada sisi pasokan, permintaan, dan tata kelola distribusi.

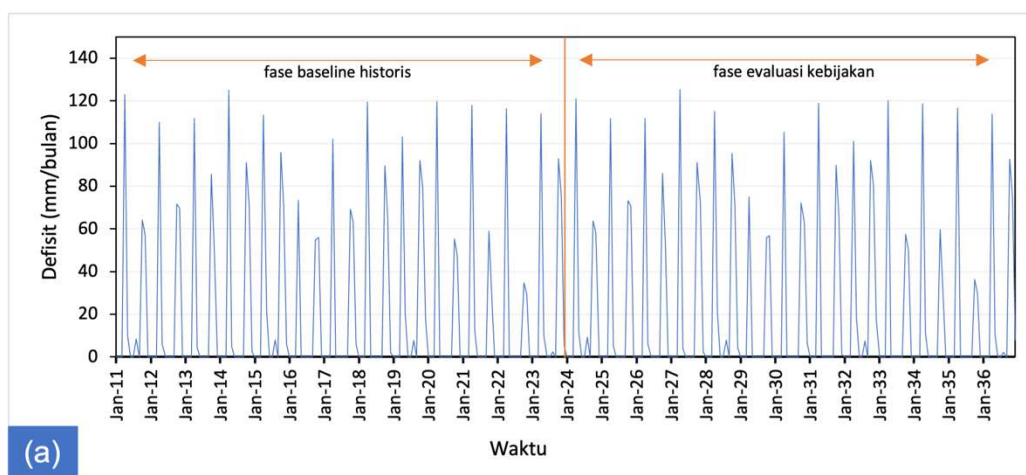
Hasil disajikan dalam tiga bentuk pembacaan yang saling melengkapi, yaitu deret waktu, ringkasan menurut bulan kalender, dan ringkasan statistik berbasis indikator kinerja utama (KPI). Penyajian deret waktu diperlukan untuk menangkap sifat episodik dan intra-musiman dari kegagalan layanan, yang sering kali tidak tampak apabila evaluasi hanya didasarkan pada nilai rata-rata tahunan. Ringkasan bulan kalender

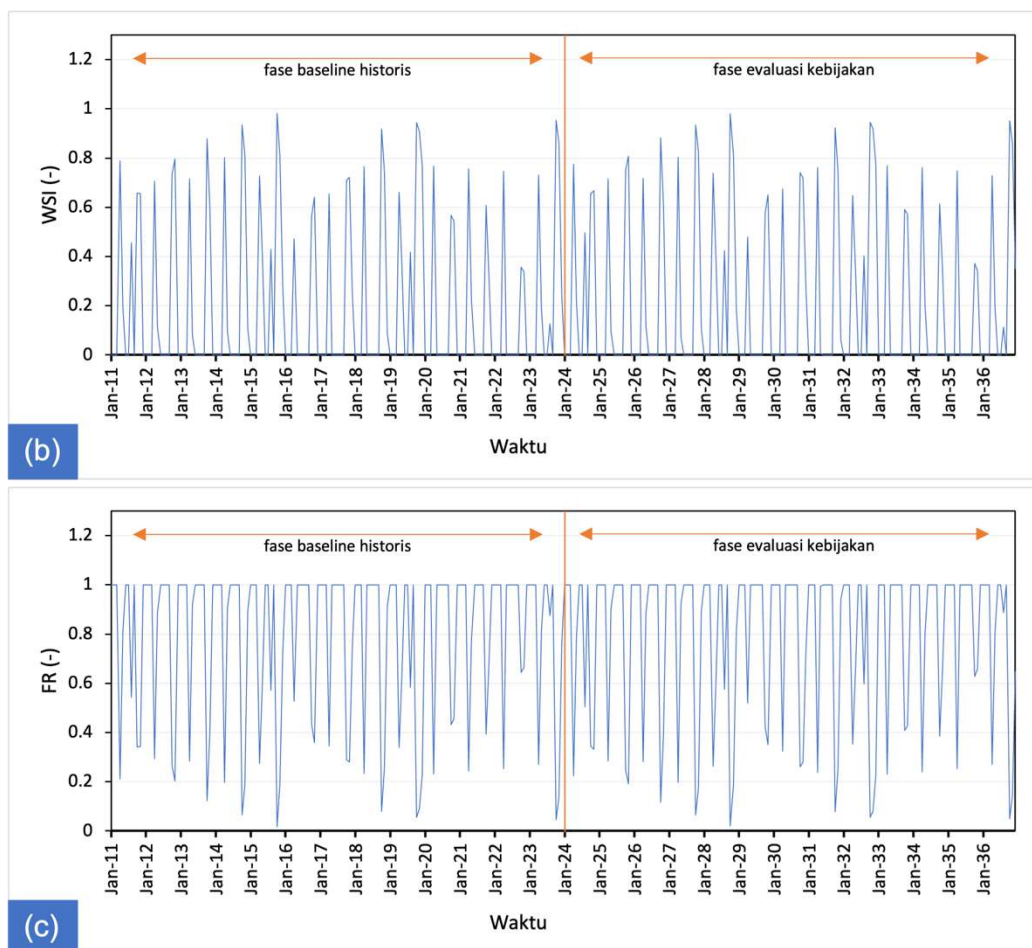
digunakan untuk mengidentifikasi bulan-bulan kritis yang berulang, sedangkan ringkasan statistik lintas skenario digunakan untuk menilai kekuatan relatif masing-masing intervensi serta efek sinergi pada paket terpadu.

Seluruh KPI pada Bab V disajikan untuk horizon simulasi 2011–2036 agar perilaku sistem dapat dibaca secara utuh dari fase baseline menuju fase evaluasi kebijakan. Meskipun demikian, interpretasi kebijakan terutama diarahkan pada periode 2024–2036 sebagai fase implementasi skenario. Untuk indikator stabilitas produksi, perhitungan dilakukan mengikuti tahun tanam Oktober–September dan musim tanam lengkap, yaitu MT1 Oktober–Maret dan MT2 April–Agustus, dengan September sebagai masa bera.

5.4.1. Baseline S0: karakter layanan irigasi dan periode kritis intra-musiman

Pada baseline S0, deret waktu indikator layanan memperlihatkan bahwa sistem mengalami tekanan layanan pada sebagian periode simulasi, meskipun pada bulan-bulan lain kebutuhan air masih dapat dipenuhi. Secara agregat, reliabilitas kejadian bulanan tanpa defisit mencapai 0,63, yang berarti sekitar 63,14% bulan berada pada kondisi tanpa defisit, sedangkan 115 bulan atau 36,86% bulan mengalami defisit sepanjang horizon simulasi (Tabel 18; Gambar 41a). Tekanan layanan tersebut tercermin pada indikator stres air, dengan WSI rata-rata 0,21 dan WSI maksimum 0,98. Besaran kekurangan layanan juga tidak kecil, dengan defisit rata-rata 21,41 mm/bulan dan defisit maksimum 125,25 mm/bulan (Tabel 18; Gambar 41b). Kombinasi reliabilitas yang belum tinggi dan adanya kejadian defisit maksimum yang besar menegaskan bahwa baseline menggambarkan sistem yang secara umum masih berfungsi, tetapi memiliki titik lemah intra-musiman yang berulang dan berpotensi menimbulkan penalti hasil yang besar apabila terjadi pada fase kritis pertumbuhan.





Gambar 41. Deret waktu indikator kinerja layanan irigasi baseline (S0) pada Sub-DAS Bila selama horizon simulasi: (a) Deficit, (b) WSI, dan (c) Fulfillment ratio (FR).

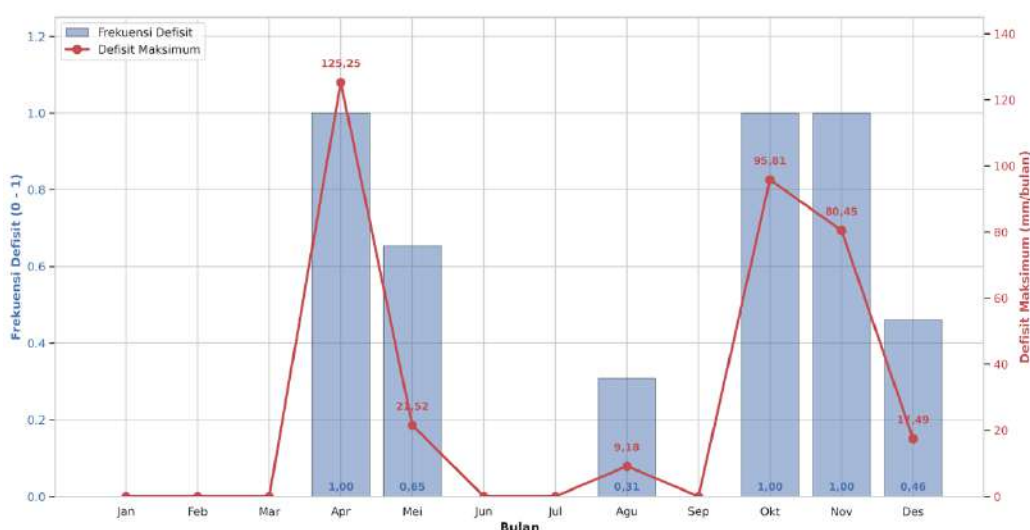
Tabel 18. KPI kinerja layanan irigasi bulanan untuk baseline (S0) dan skenario kebijakan (S1–S4) sepanjang horizon simulasi 2011–2036

Skenario	Rel_m (rata- rata)	Bulan defisit (n)	Bulan defisit (%)	Defisit rata- rata (mm/bulan)	Defisit maksimum (mm/bulan)	Defisit kumulatif (mm)	WSI rata- rata	WSI maksimum	FR rata- rata
S0 Baseline	0,63	115	36,86	21,41	125,25	6.680,63	0,21	0,98	0,79
S1	0,67	102	32,69	19,64	120,13	6.126,32	0,19	0,98	0,81
S2	0,67	102	32,69	16,61	101,85	5.181,86	0,19	0,98	0,82
S3	0,69	96	30,77	18,50	116,47	5.771,31	0,17	0,98	0,83
S4 Paket terpadu	0,76	75	24,04	11,72	83,19	3.656,73	0,13	0,97	0,88

*Keterangan: *Rel_m* = reliabilitas bulanan(0/1) yang diringkaskan sebagai rata-rata; *WSI* = water stress index; *FR* = fulfillment ratio.

Lebih jauh, baseline menunjukkan bahwa defisit tidak muncul secara acak, melainkan terkonsentrasi pada bulan-bulan tertentu. Ringkasan berbasis bulan kalender

menempatkan bulan 4, 10, dan 11 sebagai periode kritis yang berulang, sementara kejadian defisit muncul lebih sporadis pada bulan 5, 8, dan 12 (Gambar 42). Pola pengulangan ini secara manajerial menunjukkan bahwa masalah utama bukan sekadar “kekurangan air” dalam arti umum, melainkan ketidakselarasan temporal antara pasokan efektif dan kebutuhan efektif yang berulang pada jendela waktu tertentu. Dalam konteks sistem monsun, *mismatch* temporal semacam ini lazim terjadi ketika kebutuhan meningkat, misalnya pada fase awal atau pertengahan musim tanam, sementara pasokan efektif melemah akibat keterbatasan penyaluran, alokasi, atau fluktuasi ketersediaan air.

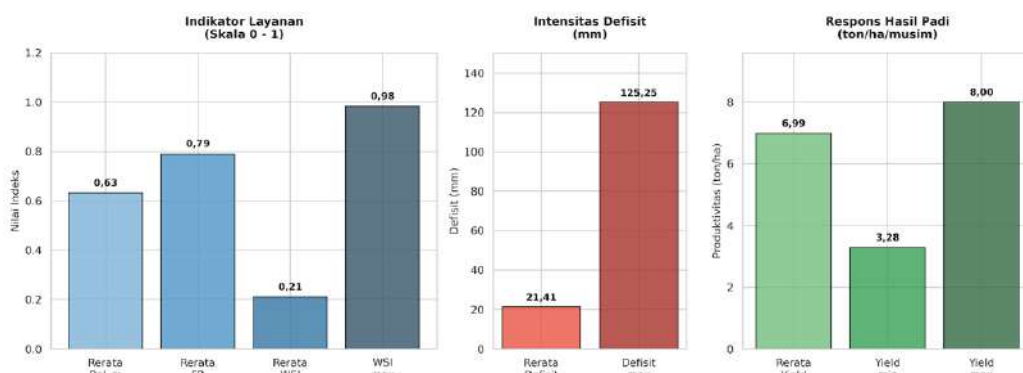


Gambar 42. Ringkasan bulan kalender baseline (S_0) yang menunjukkan konsentrasi periode kritis intra-musiman berdasarkan kejadian dan intensitas defisit.

Rasio pemenuhan kebutuhan bulanan (FR) memberikan pembacaan yang lebih operasional tentang tingkat layanan yang benar-benar diterima pengguna pada setiap bulan. Pada baseline S_0 , FR rata-rata sebesar 0,79, yang menunjukkan bahwa secara rata-rata sistem hanya mampu memenuhi sekitar 79,00% kebutuhan efektif. Penurunan FR pada bulan-bulan tertentu berasosiasi langsung dengan kenaikan defisit dan lonjakan WSI (Gambar 41c), sehingga periode tersebut dapat dipandang sebagai titik lemah layanan yang paling strategis untuk intervensi operasional, terutama melalui penguatan aturan dan respons distribusi pada puncak kebutuhan, peningkatan efisiensi penyaluran untuk menekan kehilangan, serta pengendalian permintaan (Guemouria *et al.*, 2023).

Dampak ketidakandalan baseline selanjutnya tercermin pada respons hasil. Dengan *Yield_potential* ditetapkan 8,00 ton/ha/musim, *Yield_actual* rata-rata pada baseline berada pada 6,99 ton/ha/musim, dengan nilai minimum 3,28 ton/ha/musim pada kejadian stres yang paling berat (Tabel 19; Gambar 43). Selisih yang besar antara hasil rata-rata dan hasil minimum menunjukkan bahwa episode stres tertentu mampu menurunkan hasil secara tajam. Pola ini sejalan dengan Hassan *et al.* (2023) dan Liberatore *et al.* (2025), yang menekankan bahwa penalti hasil padi sangat ditentukan oleh timing stres air, khususnya ketika stres terjadi pada fase reproduktif seperti

pembungaan atau pembentukan malai, yang dapat menurunkan pembentukan gabah dan hasil akhir secara tajam. Selain itu, konsep respons hasil terhadap defisit air juga memiliki dasar kuat dalam pendekatan fungsi respons hasil–air, yaitu bahwa penurunan ketersediaan air pada periode kritis dapat menghasilkan kehilangan hasil yang tidak proporsional dibandingkan defisit yang sama pada periode yang kurang sensitif (Gu *et al.*, 2025). Temuan ini memperkuat pentingnya evaluasi berbasis reliabilitas dan kejadian (*event-based*) pada skala intra-musiman, karena pada sistem padi penalti hasil sering kali lebih ditentukan oleh ketepatan waktu defisit terhadap fase pertumbuhan yang sensitif daripada oleh kecukupan total pada skala tahunan (Zulkafli *et al.*, 2021).



Gambar 43. Ringkasan statistik baseline (S0) untuk indikator layanan irigasi dan respons hasil padi.

Tabel 19. KPI hasil, produksi, stabilitas, ekonomi, dan dukungan pengelolaan untuk S0–S4 sepanjang horizon simulasi 2011–2036

Skenario	Yield_potensial (ton/ha/musim)	Yield aktual rata-rata (ton/ha/musim)	Yield aktual minimum (ton/ha/musim)	Produksi padi kumulatif (ton)	Produksi tahunan rata-rata berdasarkan tahun tanam (ton/tahun)	CV produksi tahunan (%)	CV produksi musiman (%)	Pendapatan kumulatif (Rp)	OM_index
S0	8,00	6,99	3,28	8.652.031,61	332.770,45	13,99	15,05	38.934.142.223.735,00	100,00
S1	8,00	7,11	3,30	8.793.838,78	338.224,57	13,91	14,86	39.572.274.529.296,00	120,00
S2	8,00	7,11	3,30	8.800.869,52	338.494,98	13,91	14,86	39.603.912.858.248,00	100,00
S3	8,00	7,17	3,31	8.875.368,06	341.360,31	13,90	14,79	39.939.156.255.806,00	100,00
S4	8,00	7,40	3,36	9.159.649,69	352.294,22	13,77	14,47	41.218.423.617.239,00	130,00

*Keterangan: CV tahunan dihitung berdasarkan tahun tanam Oktober–September, sedangkan CV musiman dihitung berdasarkan musim tanam lengkap, yaitu MT1 Oktober–Maret dan MT2 April–Agustus. *OM_index* = indeks intensitas operasi-pemeliharaan dengan basis 100.

Secara umum, temuan baseline ini menguatkan bahwa tantangan utama pengelolaan air irigasi di Sub-DAS Bila terletak pada reliabilitas pemenuhan kebutuhan pada periode-periode kritis intra-musiman, bukan semata pada kecukupan total air.

Dengan baseline seperti ini, arah kebijakan yang paling relevan adalah intervensi yang secara spesifik menurunkan frekuensi dan besaran defisit pada bulan-bulan kritis, meningkatkan reliabilitas kejadian tanpa defisit, dan menurunkan intensitas stres air (Cho *et al.*, 2021; Sunkara & Singh, 2022).

5.4.2. Perbandingan kinerja layanan irigasi antar-skenario (S0 vs S1–S4)

Perbandingan antar-skenario menunjukkan bahwa seluruh intervensi memperbaiki kinerja layanan dibanding baseline, namun besarnya perbaikan berbeda sesuai dengan mekanisme kebijakan yang bekerja pada sisi pasokan, permintaan, atau tata kelola distribusi (Tabel 18; Gambar 44). Setelah intervensi, reliabilitas meningkat menjadi 0,67 pada S1 dan S2, 0,69 pada S3, dan mencapai 0,76 pada paket terpadu S4. Secara konsisten, jumlah bulan defisit turun dari 115 pada S0 menjadi 102 pada S1 dan S2, 96 pada S3, dan 75 pada S4. Penurunan jumlah bulan defisit ini mencerminkan perbaikan pada frekuensi kegagalan layanan, sedangkan penurunan defisit maksimum dan *WSI* rata-rata menunjukkan perbaikan pada intensitas stres ketika kegagalan tetap terjadi.

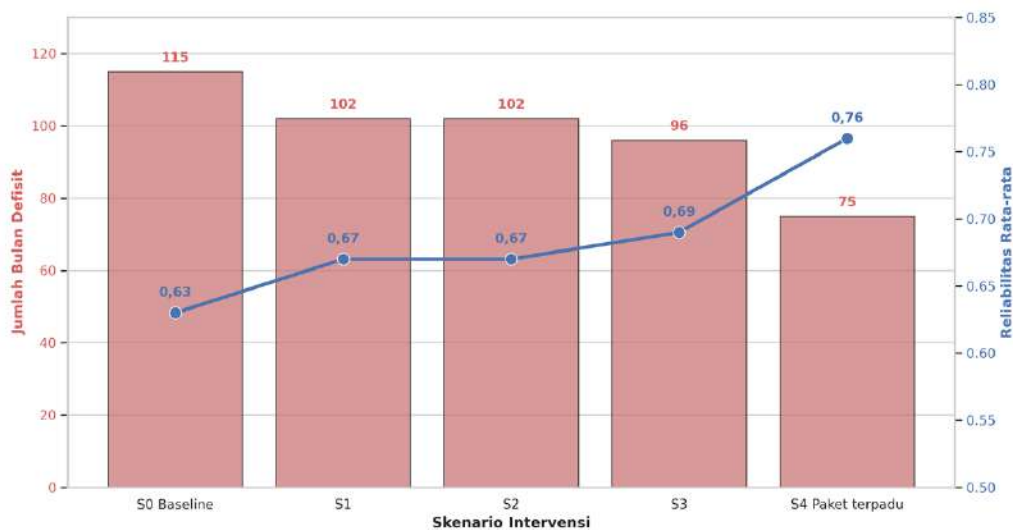
Intervensi sisi pasokan melalui skenario S1 (peningkatan efisiensi penyaluran), menurunkan tekanan layanan secara moderat. Pada skenario ini, defisit kumulatif turun dari 6.680,63 menjadi 6.126,32 mm atau berkurang 8,30%, *WSI* rata-rata turun dari 0,21 menjadi 0,19, dan reliabilitas meningkat menjadi 0,67 (Tabel 18). Pola ini sejalan dengan prinsip bahwa ketika kehilangan penyaluran berkurang, pasokan efektif yang benar-benar mencapai sistem layanan meningkat sehingga peluang defisit menurun, terutama pada kondisi jaringan dengan kehilangan air yang besar. Studi Bekchanov (2024) dan Lund *et al.* (2023) menunjukkan bahwa rehabilitasi jaringan dan perbaikan pemeliharaan dapat menekan kehilangan penyaluran dan meningkatkan produktivitas penggunaan air. Namun demikian, karena akar masalah bersifat intra-musiman dan juga dipengaruhi oleh dinamika kebutuhan, perbaikan pasokan efektif saja belum cukup untuk menghilangkan episode stres ekstrem, yang tercermin dari *WSI* maksimum yang tetap mendekati 1.

Intervensi sisi permintaan melalui skenario S2 (pengurangan kebutuhan efektif), menghasilkan penurunan defisit yang lebih besar dibanding S1, dengan defisit kumulatif turun menjadi 5.181,86 mm atau berkurang 22,43% dari baseline, dan defisit maksimum turun menjadi 101,85 mm/bulan atau berkurang 18,68%, sementara reliabilitas meningkat setara dengan S1, yaitu 0,67 (Tabel 18). Hasil ini menunjukkan bahwa intervensi *demand-side* mampu memberikan dampak kuat pada volume defisit, terutama pada periode ketika kebutuhan memuncak, sehingga *mismatch* pasokan–kebutuhan dapat dikurangi meskipun pasokan tidak berubah secara langsung. Pola ini konsisten dengan temuan Bo *et al.* (2024) dan Li *et al.* (2024), yang menunjukkan bahwa strategi pengelolaan air padi seperti *alternate wetting and drying* (AWD) dan praktik hemat air lainnya dapat menurunkan kebutuhan irigasi dan meningkatkan efisiensi penggunaan air, dengan dampak hasil yang relatif kecil atau dapat dikelola bila implementasinya tepat. Namun, sama seperti S1, skenario tunggal ini tetap menyisakan peluang kejadian stres ekstrem karena mekanisme yang bekerja hanya pada satu sisi sistem.

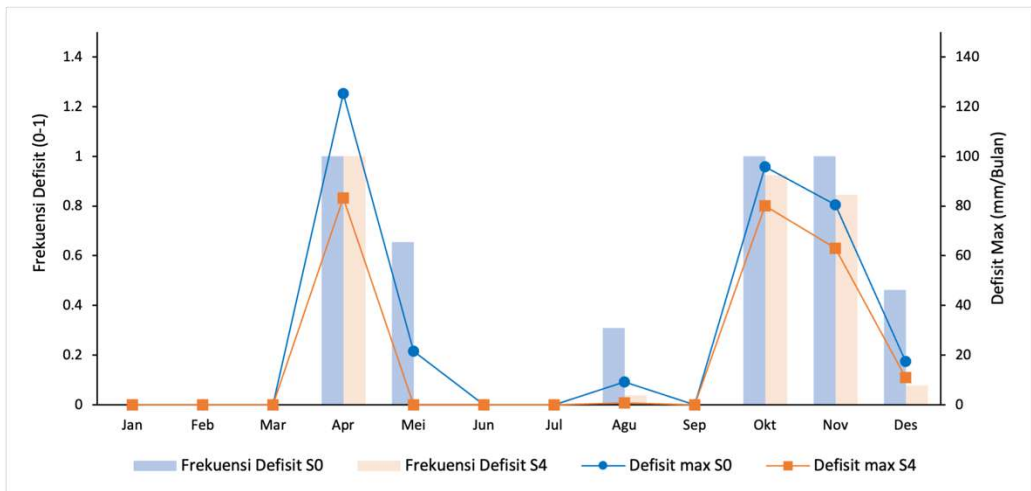
Skenario S3 (peningkatan akses dan alokasi efektif), menunjukkan karakter perbaikan yang berbeda. Pada skenario ini reliabilitas meningkat paling baik di antara intervensi tunggal menjadi 0,69, jumlah bulan defisit turun menjadi 96 atau berkurang

16,52%, dan *WSI* rata-rata turun menjadi 0,17 atau berkurang 19,05% (Tabel 18). Hal ini mengindikasikan bahwa perbaikan tata kelola distribusi dan efektivitas alokasi berperan penting sebagai pengurang kegagalan operasional pada bulan-bulan kritis. Dalam sistem irigasi, masalah layanan sering kali tidak hanya ditentukan oleh volume air, tetapi juga oleh koordinasi kelembagaan, kapasitas tata kelola distribusi, kepatuhan, dan ketepatan operasi pada jendela waktu tertentu. Sistem distribusi yang lebih efektif cenderung mengurangi kegagalan operasional dan memperbaiki performa manajemen irigasi (Bopp *et al.*, 2024; Leroy, 2023). Karena itu, peningkatan akses/alokasi efektif dapat meningkatkan peluang bulan tanpa defisit meskipun penurunan defisit kumulatifnya tidak sebesar skenario *demand-side*.

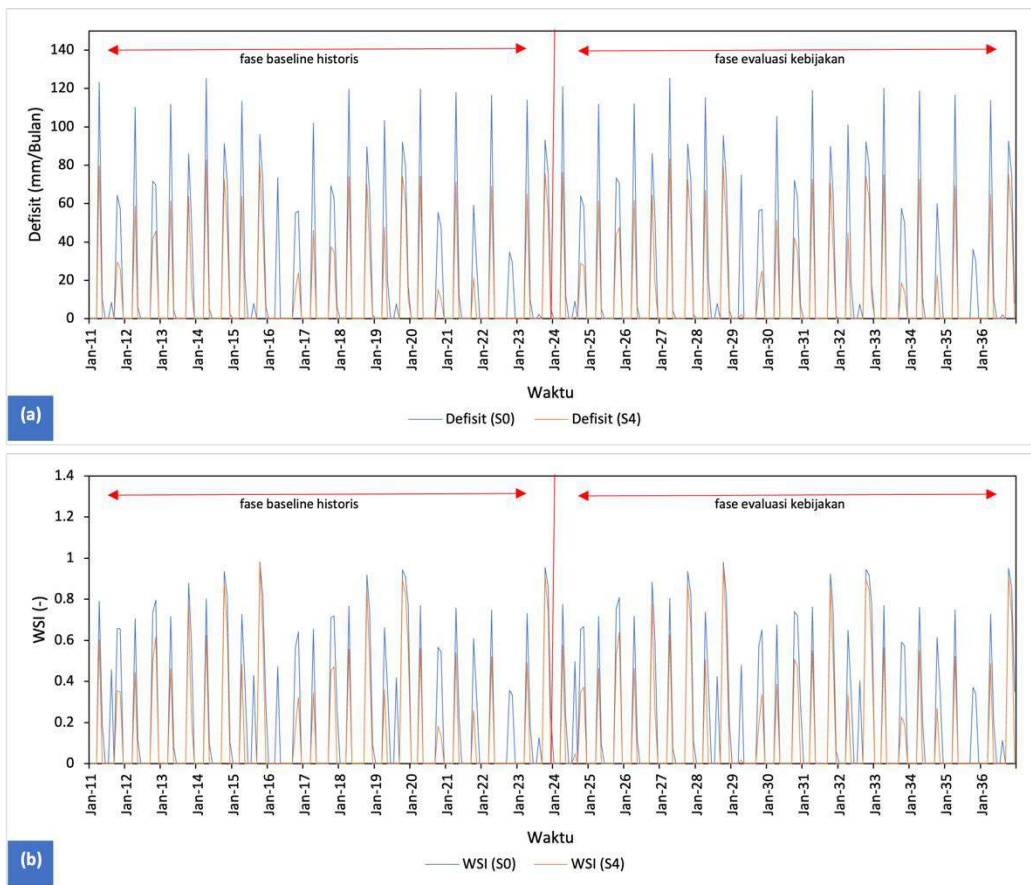
Skenario S4 (paket terpadu), memberikan perbaikan paling kuat dan paling konsisten pada seluruh indikator layanan, yang menunjukkan adanya sinergi ketika perbaikan pasokan efektif, pengendalian permintaan, dan penguatan akses/alokasi dilakukan secara simultan. Pada S4, defisit kumulatif turun menjadi 3.656,73 mm atau berkurang 45,26%, defisit maksimum turun menjadi 83,19 mm/bulan atau berkurang 33,58%, *WSI* rata-rata turun dari 0,21 menjadi 0,13, dan reliabilitas meningkat menjadi 0,76 atau naik sekitar 20,63% dibanding baseline (Tabel 18). Penurunan jumlah bulan defisit dari 115 menjadi 75 berarti terdapat 40 bulan yang bertransformasi dari kondisi defisit menjadi tidak defisit selama horizon simulasi. Selain menurunkan besaran defisit puncak, S4 juga mengurangi frekuensi defisit pada beberapa bulan yang sebelumnya rentan, sehingga profil layanan bergeser menuju kondisi yang lebih stabil pada skala intra-musiman (Gambar 45–46). Dengan demikian, hasil perbandingan layanan memperjelas bahwa sumber masalah pada sistem ini bersifat multi-penyebab, sehingga respons kebijakan yang paling efektif bukanlah intervensi tunggal, melainkan paket terpadu yang menggabungkan intervensi fisik-operasional dan penguatan tata kelola.



Gambar 44. Perbandingan KPI layanan irigasi antar-skenario (S0–S4).



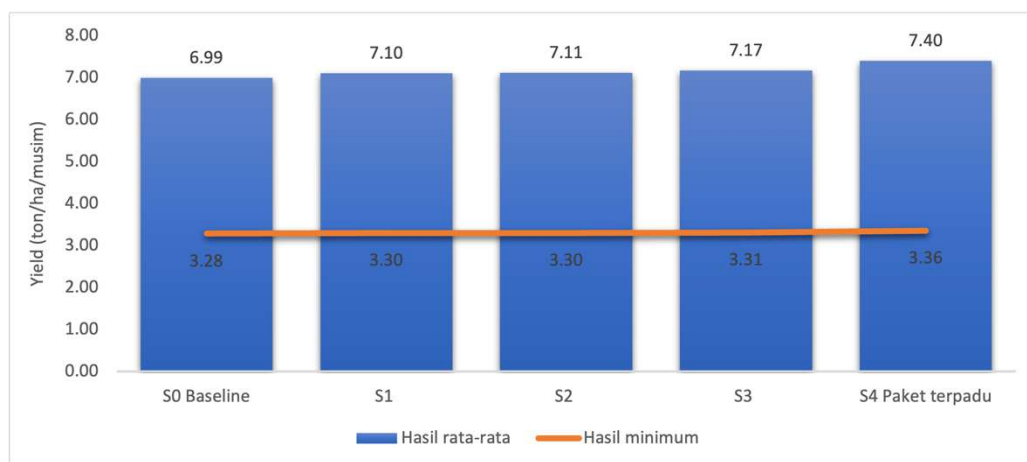
Gambar 45. Perbandingan frekuensi dan intensitas defisit bulanan antara baseline (S0) dan paket terpadu (S4).



Gambar 46. Overlay deret waktu defisit (a) dan WSI (b) untuk baseline (S0) dan paket terpadu (S4).

5.4.3. Dampak skenario kebijakan terhadap hasil padi (*yield*) dalam kerangka dua musim tanam per tahun

Perbaikan kinerja layanan irigasi pada skenario S1–S4 berimplikasi langsung pada penurunan stres air dan peningkatan hasil padi yang diproyeksikan. Hubungan mekanistik ini dibangun melalui fungsi penalti hasil berbasis indeks stres air, sehingga perubahan *WSI* pada skala bulanan diteruskan menjadi perubahan hasil musiman. Pada baseline S0, *Yield_actual* rata-rata sebesar 6,99 ton/ha/musim, dengan nilai minimum 3,28 ton/ha/musim (Tabel 19; Gambar 47). Setelah intervensi, seluruh skenario meningkatkan *Yield_actual* rata-rata dengan urutan yang sejalan dengan penurunan *WSI* rata-rata dan peningkatan reliabilitas layanan. Pada intervensi tunggal, hasil rata-rata meningkat menjadi 7,11 ton/ha/musim pada S1 dan S2, serta 7,17 ton/ha/musim pada S3. Paket terpadu S4 memberikan peningkatan paling tinggi dan paling konsisten, dengan *Yield_actual* rata-rata mencapai 7,40 ton/ha/musim atau meningkat 5,87% dibanding baseline (Tabel 19). Kenaikan hasil pada S4 konsisten dengan penurunan *WSI* rata-rata menjadi 0,13, kenaikan reliabilitas menjadi 0,76, dan penurunan jumlah bulan defisit menjadi 75, yang menunjukkan bahwa intensitas stres pada sebagian besar periode menurun sehingga penalti hasil juga berkurang. Secara konseptual, hal ini sejalan dengan He *et al.* (2022) dan Liberatore *et al.* (2025), bahwa hasil padi sensitif terhadap kekurangan air, terutama pada fase pertumbuhan tertentu, dan episode defisit yang singkat namun intens tetap dapat menekan hasil secara tajam apabila terjadi pada periode kritis.

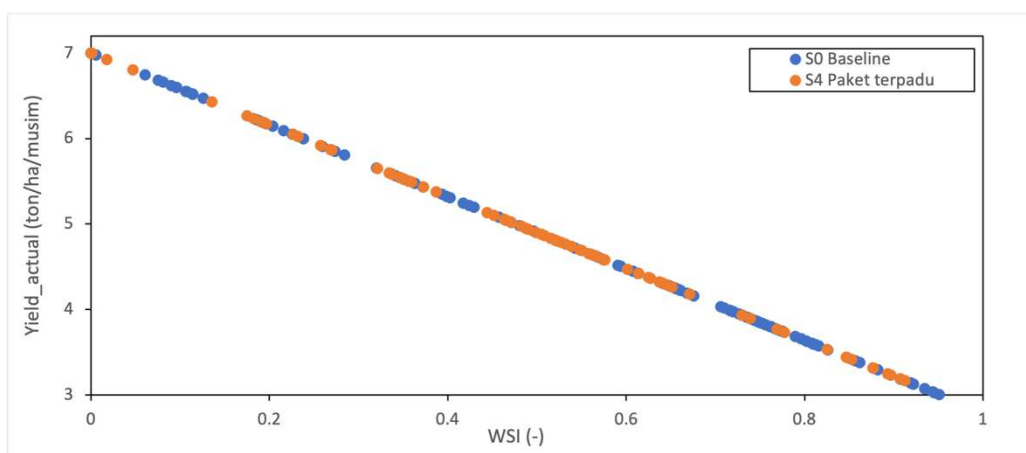


Gambar 47. Perbandingan *Yield_actual* antar-skenario (S0–S4) pada kerangka dua musim tanam per tahun.

Walaupun rata-rata hasil meningkat, episode terburuk tidak sepenuhnya hilang. Nilai minimum *Yield_actual* hanya bergerak dari 3,28 ton/ha/musim pada S0 menjadi 3,36 ton/ha/musim pada S4. Hal ini menandakan bahwa sistem masih memiliki *residual risk* pada kondisi tertentu. Namun, paket terpadu mampu menurunkan frekuensi dan intensitas stres pada mayoritas periode sehingga peningkatan hasil rata-rata dan konsistensi hasil tetap membaik (Tabel 19). Hubungan antara *WSI* dan *Yield_actual*

memperjelas bahwa penurunan stres rata-rata berasosiasi dengan pergeseran distribusi hasil ke nilai yang lebih tinggi, sedangkan stres ekstrem yang jarang tetap dapat menghasilkan *outlier* hasil rendah (Gambar 48). Temuan ini penting untuk menempatkan ekspektasi kebijakan secara proporsional, yaitu bahwa kebijakan terbaik bukan berarti menghapus seluruh risiko, melainkan secara nyata mengurangi peluang dan dampak episode stres yang paling merugikan.

Dalam kerangka dua musim tanam per tahun, temuan ini mengimplikasikan bahwa kebijakan yang meningkatkan reliabilitas intra-musiman memberi manfaat bukan hanya pada peningkatan hasil rata-rata, tetapi juga pada pengurangan risiko musim gagal akibat stres air yang tinggi pada sebagian periode. Dengan demikian, evaluasi kebijakan pada Sub-DAS Bila sebaiknya tidak hanya menargetkan peningkatan pasokan tahunan, melainkan menitikberatkan pada pengurangan kejadian defisit pada periode kritis, karena mekanisme penalti hasil pada padi sangat dipengaruhi oleh waktu terjadinya stres air.



Gambar 48. Hubungan *WSI* dan *Yield_actual* pada baseline (*S0*) dan paket terpadu (*S4*).

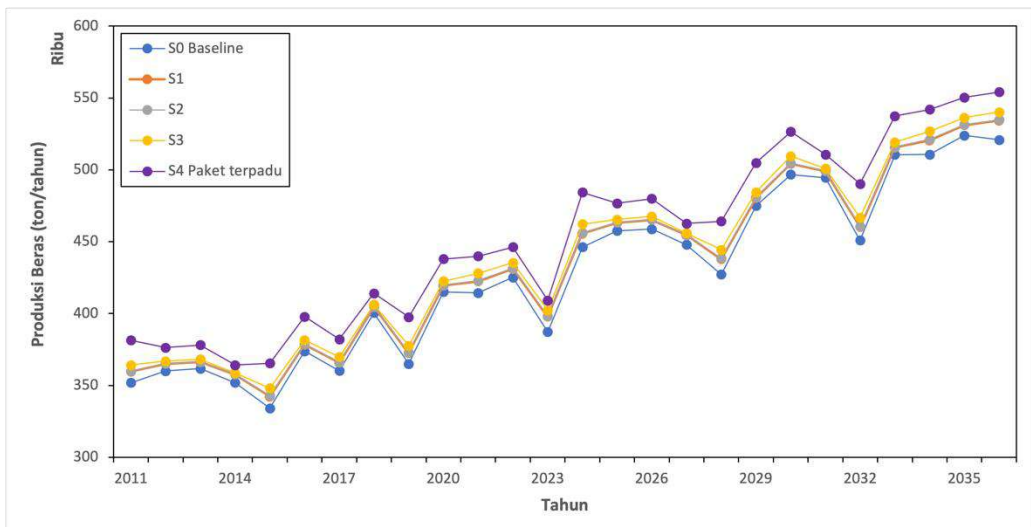
5.4.4. Dampak pada produksi padi dan stabilitas ketahanan pangan

Perubahan kinerja layanan irigasi pada skenario *S1–S4* tidak hanya meningkatkan hasil per satuan luas, tetapi juga menaikkan produksi padi sebagai proksi dimensi ketersediaan (*availability*) dan memperbaiki stabilitas produksi sebagai proksi dimensi stabilitas (*stability*) dalam kerangka ketahanan pangan (Harkness *et al.*, 2023). Secara konseptual, produksi total merepresentasikan sisi ketersediaan, sedangkan variabilitas antar-periode merepresentasikan stabilitas pasokan yang menjadi salah satu pilar ketahanan pangan (Guiné *et al.*, 2021; Manikas *et al.*, 2023). Dalam model ini, rantai kausalnya bersifat langsung, yakni *WSI* memengaruhi *Yield_actual*, lalu *Yield_actual* dikalikan luas sawah menghasilkan *Rice_production*. Karena luas sawah diasumsikan tetap antar-musim, maka perubahan produksi antar-skenario terutama ditentukan oleh perubahan *Yield_actual* dan stabilitasnya lintas musim dan tahun. Stabilitas dievaluasi menggunakan koefisien variasi (*CV*) pada dua skala waktu, yaitu skala tahunan berdasarkan tahun tanam Oktober–September dan skala musiman yang mengikuti MT1 Oktober–Maret serta MT2 April–Agustus.

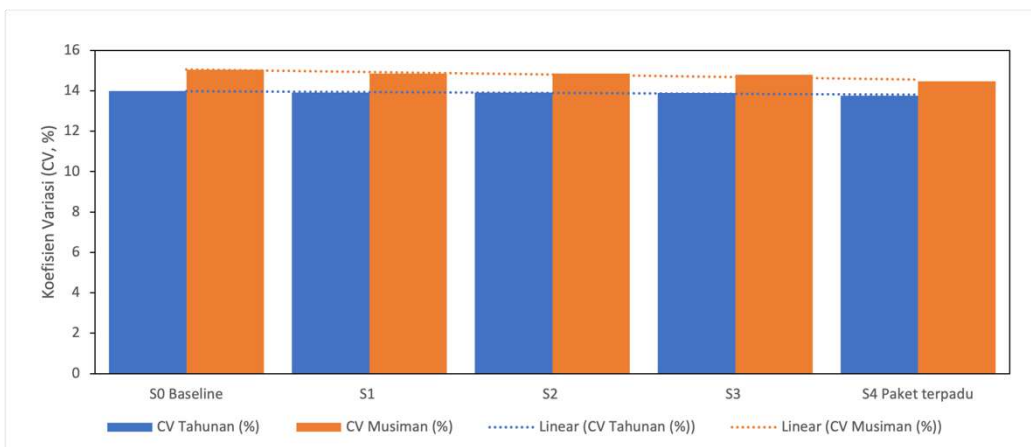
Pada baseline S0, produksi padi kumulatif sepanjang horizon simulasi mencapai 8.652.031,61 ton, dengan produksi tahunan rata-rata sebesar 332.770,45 ton/tahun, CV tahunan 13,99%, dan CV musiman 15,05% (Tabel 19; Gambar 49; Gambar 50). Nilai CV tersebut menunjukkan bahwa sistem tidak hanya menghadapi tantangan pada level produksi total, tetapi juga pada konsistensi produksi lintas tahun dan lintas musim. Dengan demikian, risiko tahun buruk atau musim buruk akibat episode defisit intra-musiman tetap signifikan meskipun produksi kumulatif sistem tergolong tinggi. Dalam konteks ketahanan pangan, stabilitas pasokan menjadi krusial karena fluktuasi yang besar dapat meningkatkan risiko kekurangan pasokan pada periode tertentu walaupun ketersediaan agregat jangka panjang terlihat memadai (Guiné *et al.*, 2021; Manikas *et al.*, 2023).

Skenario intervensi tunggal (S1–S3) meningkatkan produksi kumulatif secara bertahap. Dibanding S0, produksi kumulatif meningkat menjadi 8.793.838,78 ton pada S1 atau bertambah 1,64%, 8.800.869,52 ton pada S2 atau bertambah 1,72%, dan 8.875.368,06 ton pada S3 atau bertambah 2,58%. Kenaikan produksi ini konsisten dengan peningkatan *Yield_actual* rata-rata pada ketiga skenario, dari 6,99 ton/ha/musim pada S0 menjadi 7,11 pada S1, 7,11 pada S2, dan 7,17 ton/ha/musim pada S3 (Tabel 19; Gambar 46). Namun, efek terhadap stabilitasnya relatif terbatas. CV produksi tahunan hanya berubah dari 13,99% pada S0 menjadi 13,91% pada S1, 13,91% pada S2, dan 13,90% pada S3. Hal ini menunjukkan bahwa perbaikan stabilitas produksi cenderung lebih kecil daripada peningkatan level produksi karena periode stres ekstrem belum sepenuhnya hilang (Wang *et al.*, 2025). Dengan kata lain, kebijakan tunggal membantu menaikkan level produksi, tetapi belum cukup kuat untuk menekan variabilitas antar-tahun karena sisa episode defisit pada bulan-bulan kritis masih tetap terjadi.

Paket terpadu S4 memberikan perbaikan paling konsisten, baik pada level produksi maupun stabilitas. Produksi kumulatif meningkat menjadi 9.159.649,69 ton atau bertambah 5,87% dari S0, dengan rata-rata produksi tahunan sebesar 352.294,22 ton/tahun (Tabel 19; Gambar 48). Pada saat yang sama, variabilitas menurun menjadi CV tahunan 13,77% dan CV musiman 14,47% (Tabel 19; Gambar 50). Dibanding baseline, hal ini berarti CV tahunan turun sekitar 1,57% dan CV musiman turun sekitar 3,85%. Penurunan CV ini menunjukkan bahwa kebijakan terpadu tidak hanya meningkatkan ketersediaan melalui kenaikan produksi, tetapi juga memperkuat stabilitas melalui penurunan variabilitas relatif. Penurunan variabilitas pada skala musiman penting karena risiko ketahanan pangan berbasis padi di wilayah monsun sering dipicu oleh kegagalan layanan pada periode intra-musiman yang berimpit dengan fase sensitif budidaya (Bowden *et al.*, 2023). Dengan demikian, keberhasilan kebijakan pada Sub-DAS Bila melalui skenario S4 bukan hanya menaikkan rata-rata produksi, tetapi juga mengurangi ketidakpastian produksi dari musim ke musim dan dari tahun ke tahun, yang secara langsung relevan dengan pilar stabilitas ketahanan pangan berbasis padi di wilayah monsun.



Gambar 49. Perbandingan produksi padi tahunan antar-skenario (S0–S4).



Gambar 50. Koefisien variasi produksi padi antar-skenario (S0–S4) pada skala tahunan dan musiman (dua musim tanam per tahun).

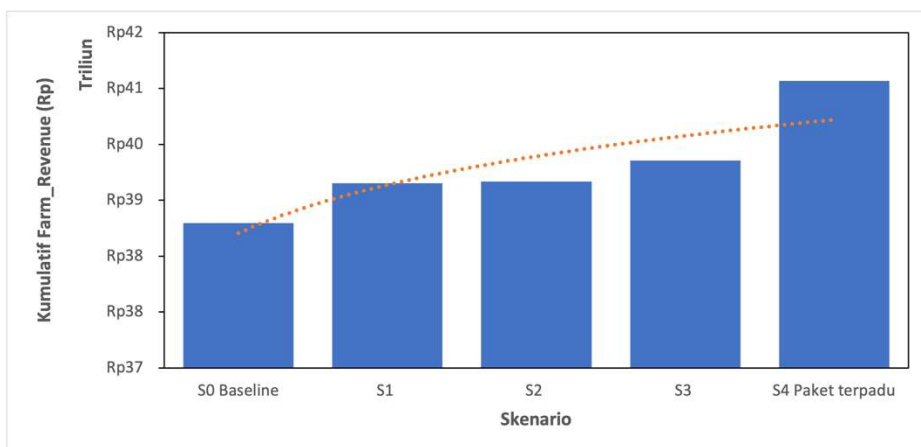
Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat bahwa strategi kebijakan yang menargetkan perbaikan secara simultan pada pasokan efektif, pengendalian permintaan, dan penguatan akses/alokasi mampu menghasilkan manfaat ganda, yaitu peningkatan ketersediaan melalui kenaikan produksi, serta peningkatan stabilitas melalui penurunan variabilitas relatif. Temuan ini juga konsisten dengan Egli *et al.* (2020) dan Reckling *et al.* (2021), yang menekankan pentingnya menilai bukan hanya rata-rata hasil, tetapi juga dispersi temporalnya karena stabilitas merupakan atribut kunci bagi keberlanjutan sistem pangan dalam jangka panjang.

5.4.5. Dampak ekonomi dan *trade-off* dukungan pengelolaan

Dampak ekonomi dinilai menggunakan *Farm_revenue* sebagai proksi manfaat ekonomi di tingkat usaha tani, yang diturunkan langsung dari produksi padi dan harga gabah. Karena harga dianggap konstan dalam eksperimen ini, perubahan *Farm_revenue* terutama mencerminkan perubahan produksi, sehingga analisis difokuskan pada perbandingan manfaat antar-skenario dan konsekuensi kebutuhan dukungan pengelolaan yang direpresentasikan oleh *OM_index* sebagai proksi intensitas operasi dan pemeliharaan.

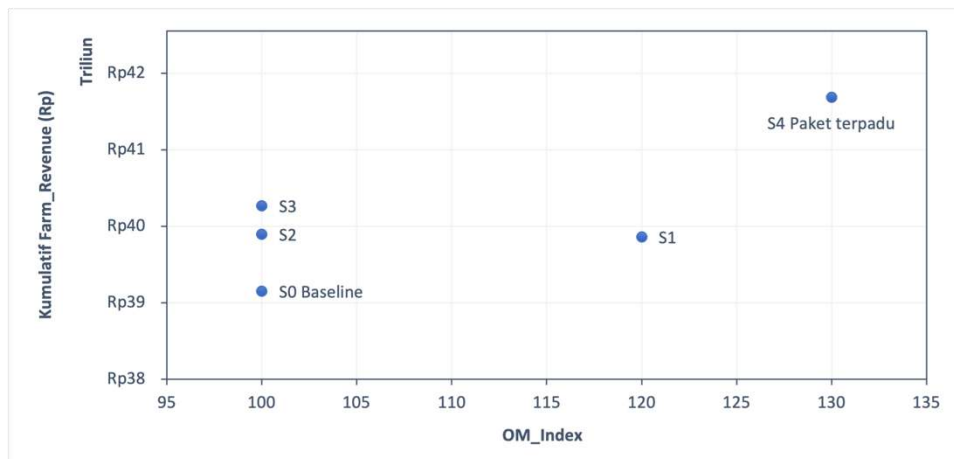
Pada baseline S0, *Farm_revenue* kumulatif mencapai Rp 38.934.142.223.735,00 sepanjang horizon simulasi. Intervensi tunggal meningkatkan manfaat ekonomi secara bertahap. Dibanding baseline, S1 meningkatkan *Farm_revenue* kumulatif menjadi Rp 39.572.274.529.296,00 atau bertambah 1,64%, S2 menjadi Rp 39.603.912.858.248,00 atau bertambah 1,72%, dan S3 menjadi Rp 39.939.156.255.806,00 atau bertambah 2,58%. Besaran peningkatan ini konsisten dengan kenaikan *Yield_actual* rata-rata dan produksi pada masing-masing skenario, sehingga menunjukkan bahwa perbaikan layanan yang menurunkan stres air menghasilkan manfaat ekonomi yang nyata, meskipun belum sepenuhnya mengubah karakter risiko episode stres ekstrem.

Paket terpadu S4 memberikan peningkatan manfaat ekonomi paling besar dan sekaligus memperbaiki stabilitas. *Farm_revenue* kumulatif pada S4 mencapai Rp 41.218.423.617.239,00, meningkat 5,87% dari baseline (Tabel 19; Gambar 51). Kenaikan ini sejalan dengan peningkatan *Yield_actual* rata-rata menjadi 7,40 ton/ha/musim dan kenaikan produksi kumulatif menjadi 9.159.649,69 ton, disertai penurunan variabilitas produksi pada skala tahunan dan musiman, masing-masing dari 13,99% menjadi 13,77% dan dari 15,05% menjadi 14,47%. Hal ini mengindikasikan bahwa paket terpadu tidak hanya memperbesar total manfaat, tetapi juga cenderung menurunkan ketidakpastian hasil relatif antar-periode, yang secara ekonomi penting karena volatilitas produksi berkaitan dengan ketidakpastian pendapatan rumah tangga tani dan risiko ketahanan pangan lokal (Harkness *et al.*, 2023; Tankari, 2020).



Gambar 51. Kumulatif *Farm_revenue* antar-skenario (S0–S4) sebagai proksi manfaat ekonomi.

Peningkatan kinerja sistem tidak berlangsung tanpa kebutuhan dukungan pengelolaan, sehingga muncul *trade-off* antara manfaat ekonomi dan besaran dukungan operasi–pemeliharaan. Dalam penelitian ini, *OM_index* dibaca sebagai proksi intensitas O&M relatif terhadap baseline, bukan sebagai biaya moneter riil. Nilai dasar 100,00 merepresentasikan intensitas O&M eksisting. Pada S1, *OM_index* dinaikkan menjadi 120,00 karena peningkatan efisiensi penyaluran memerlukan tambahan rehabilitasi, pemeliharaan jaringan, dan penguatan operasi distribusi. Pada S4, *OM_index* dinaikkan menjadi 130,00 karena paket terpadu menuntut dukungan teknis seperti pada S1 sekaligus tambahan koordinasi, monitoring, dan penguatan tata kelola agar intervensi pasokan, permintaan, dan alokasi bekerja secara sinergis. Sebaliknya, *OM_index* pada S2 dan S3 dipertahankan 100,00 karena dalam model ini kedua skenario direpresentasikan terutama sebagai perubahan aturan pengelolaan permintaan dan efektivitas distribusi, bukan sebagai peningkatan intensitas O&M fisik yang berdiri sendiri (Gambar 52). Kenaikan *OM_index* merepresentasikan kebutuhan penguatan operasi–pemeliharaan, monitoring, serta kapasitas kelembagaan untuk memastikan bahwa perbaikan layanan tidak menurun kembali akibat degradasi jaringan, meningkatnya kehilangan penyaluran, lemahnya kepatuhan, atau ketidakteraturan distribusi (Bopp *et al.*, 2024; Lund *et al.*, 2023). Dengan pembacaan ini, *OM_index* harus dipahami sebagai indikator *trade-off* dukungan pengelolaan relatif antar-skenario, bukan sebagai estimasi biaya O&M riil.



Gambar 52. Trade-off antara intensitas dukungan pengelolaan (*OM_index*) dan manfaat ekonomi (kumulatif *Farm_revenue*) pada S0–S4.

Dari perspektif pengambilan keputusan, hasil ini menempatkan pilihan kebijakan pada spektrum manfaat ekonomi versus intensitas dukungan pengelolaan. Skenario tunggal yang tidak menaikkan *OM_index*, seperti S2 dan S3, dapat dipandang sebagai langkah bertahap ketika sumber daya pengelolaan terbatas. Namun, paket terpadu S4 memberikan manfaat ekonomi tertinggi dan perbaikan stabilitas terbaik, sehingga argumen kebijakan yang muncul bukan sekadar memilih intervensi yang paling murah, melainkan merancang kombinasi kebijakan dengan dukungan O&M dan tata kelola yang realistis agar manfaat produksi dan pendapatan dapat dipertahankan dalam jangka

panjang. Temuan ini penting secara manajerial, karena kebijakan yang efektif untuk meningkatkan pasokan efektif dan mengunci perbaikan kinerja layanan memerlukan O&M yang lebih kuat agar kehilangan penyaluran tidak meningkat kembali, operasi distribusi tetap responsif, dan kepatuhan terhadap aturan distribusi dapat dijaga (Barkhordari *et al.*, 2020; Taguas *et al.*, 2025). Implikasi praktisnya, paket terpadu sebaiknya dipandang sebagai investasi kelembagaan dan O&M yang menghasilkan pengembalian berupa produksi dan pendapatan yang lebih tinggi serta lebih stabil, sedangkan strategi implementasi yang realistis adalah pendekatan bertahap menuju paket terpadu, dimulai dari intervensi yang paling cepat menurunkan defisit pada bulan kritis sambil membangun kapasitas O&M dan tata kelola.

5.4.6. Implikasi kebijakan dan manajerial pengelolaan sumber daya air Sub-DAS Bila

Temuan penelitian ini menegaskan bahwa desain kebijakan pengelolaan air di Sub-DAS Bila sebaiknya bergeser dari orientasi kecukupan tahunan menuju peningkatan reliabilitas layanan pada skala intra-musiman. Pada baseline S0, reliabilitas kejadian tanpa defisit hanya 0,63 dengan 115 bulan mengalami defisit, sementara *WSI* dapat mencapai 0,98 dan defisit maksimum 125,25 mm/bulan (Tabel 18). Pola ini menegaskan bahwa kegagalan layanan yang singkat tetapi berulang pada bulan-bulan tertentu lebih menentukan risiko stres air dan penalti hasil dibandingkan besaran pasokan rata-rata. Karena itu, kebijakan yang efektif perlu diarahkan untuk menurunkan frekuensi dan intensitas defisit pada periode kritis, meningkatkan rasio pemenuhan kebutuhan (*FR*), serta menekan *WSI* pada bulan-bulan rentan, bukan sekadar menaikkan pasokan agregat (Gu *et al.*, 2025; Hou *et al.*, 2025; Xu *et al.*, 2025).

Implikasi manajerial pertama adalah prioritas intervensi teknis-operasional pada jaringan dan tata operasi distribusi untuk memperbaiki pasokan efektif. Peningkatan efisiensi penyaluran pada S1 terbukti menaikkan reliabilitas menjadi 0,67, menurunkan defisit kumulatif menjadi 6.126,32 mm atau berkurang 8,30%, dan meningkatkan *FR* rata-rata menjadi 0,81 (Tabel 18). Pesan kebijakannya adalah bahwa ketika air secara hidrologis tersedia di tingkat DAS, tantangan utama sering kali justru terletak pada kehilangan dan keterlambatan penyaluran. Secara praktis, paket tindakan yang paling relevan mencakup rehabilitasi jaringan, pemeliharaan rutin saluran dan bangunan bagi, penataan operasi pintu air yang responsif terhadap dinamika kebutuhan, serta penguatan prosedur pembagian air pada bulan-bulan kritis yang berulang (Ashour *et al.*, 2024; Bekchanov, 2024; Zhou *et al.*, 2025).

Implikasi kedua adalah pentingnya instrumen pengelolaan permintaan sebagai pelengkap yang relatif cepat dan fleksibel untuk menurunkan risiko defisit intra-musiman. S2 menghasilkan penurunan defisit kumulatif yang lebih besar daripada S1, yaitu menjadi 5.181,86 mm atau berkurang 22,43%, dan menurunkan defisit maksimum menjadi 101,85 mm/bulan, dengan reliabilitas yang sama, yaitu 0,67, serta *FR* rata-rata 0,82. Hal ini menunjukkan bahwa *demand management* yang menurunkan kebutuhan efektif dapat memberi dampak besar pada tekanan layanan pada bulan-bulan puncak. Pada level implementasi, kebijakan dapat diarahkan pada penyesuaian kalender tanam yang lebih adaptif, perbaikan tata air tingkat tersier dan petak untuk mengurangi pemborosan terutama pada fase persiapan lahan (Mao *et al.*, 2024; Zahir *et al.*, 2024),

serta penerapan praktik budidaya hemat air yang tetap menjaga produktivitas (Li *et al.*, 2024; Yu *et al.*, 2024).

Implikasi ketiga, yang paling menentukan keberlanjutan dampak, adalah penguatan tata kelola distribusi sebagai pengunci manfaat agar perbaikan tidak bersifat sementara. S3 meningkatkan reliabilitas paling tinggi di antara intervensi tunggal menjadi 0,69, meningkatkan *FR* rata-rata menjadi 0,83, dan menurunkan *WSI* rata-rata menjadi 0,17 (Tabel 18). Pola ini mengindikasikan bahwa kapasitas operasi, aturan alokasi, koordinasi, dan kepatuhan distribusi berperan penting untuk memastikan bahwa air yang tersedia benar-benar mengurangi stres pada pengguna ketika dibutuhkan (Gómez-Limón *et al.*, 2020; Leroy, 2023; Zhou *et al.*, 2025). Dengan demikian, penguatan kelembagaan pengelola dan mekanisme monitoring-distribusi perlu diposisikan sebagai inti kebijakan, bukan sebagai komponen tambahan.

Hasil paling kuat muncul ketika kebijakan dibangun sebagai paket terpadu. S4 menurunkan defisit kumulatif menjadi 3.656,73 mm atau berkurang 45,26%, meningkatkan reliabilitas menjadi 0,76, meningkatkan *FR* rata-rata menjadi 0,88, serta menurunkan jumlah bulan defisit menjadi 75. Perbaikan layanan ini diterjemahkan menjadi peningkatan hasil dan manfaat ekonomi, yaitu *Yield_actual* rata-rata meningkat dari 6,99 menjadi 7,40 ton/ha/musim, produksi kumulatif meningkat dari 8.652.031,61 menjadi 9.159.649,69 ton atau bertambah 5,87%, dan *Farm_revenue* kumulatif meningkat dari Rp 38.934.142.223.735,00 menjadi Rp 41.218.423.617.239,00 atau bertambah 5,87%. Selain itu, stabilitas produksi juga membaik, ditunjukkan oleh penurunan CV produksi tahunan dari 13,99% menjadi 13,77% dan CV musiman dari 15,05% menjadi 14,47%. Hal ini menunjukkan paket terpadu tidak hanya menaikkan level produksi dan pendapatan, tetapi juga menurunkan ketidakpastian pasokan lintas musim dan lintas tahun, yang sangat relevan bagi ketahanan pangan berbasis padi. Oleh karena itu, intervensi tunggal memang membantu, tetapi paket terpadu adalah opsi yang paling efektif.

Konsekuensi kebijakan yang perlu dikelola adalah *trade-off* antara manfaat dan kebutuhan dukungan pengelolaan. Sesuai rancangan yang diterapkan, dukungan operasi–pemeliharaan yang lebih tinggi tercermin pada *OM_index* yang meningkat pada S1 menjadi 120,00 dan paling tinggi pada S4 menjadi 130,00 (Tabel 19). Temuan ini menegaskan bahwa kebijakan tidak dapat berhenti pada rehabilitasi fisik semata; diperlukan desain pembiayaan dan penguatan kapasitas O&M yang realistis agar manfaat paket terpadu tidak terdegradasi kembali. Secara praktis, temuan penelitian ini mengarah pada empat prioritas kebijakan yang perlu dijalankan secara saling menguatkan. Pertama, rehabilitasi jaringan dan pengurangan kehilangan air perlu diprioritaskan pada titik-titik kritis penyaluran agar pasokan efektif meningkat. Kedua, *demand management* perlu diterapkan untuk menekan kebutuhan efektif pada bulan-bulan puncak, terutama melalui pengelolaan tata air yang lebih hemat dan penyesuaian praktik budidaya. Ketiga, tata kelola distribusi harus diperkuat melalui aturan alokasi yang lebih tegas, monitoring yang rutin, dan kepatuhan kelembagaan yang lebih baik agar air tersedia tepat waktu pada bulan-bulan kritis. Keempat, seluruh intervensi tersebut harus ditopang oleh dukungan O&M yang memadai agar manfaat kebijakan tidak cepat hilang. Dalam kerangka hasil simulasi, kombinasi keempat prioritas ini paling baik direpresentasikan oleh S4, sehingga paket terpadu perlu diposisikan sebagai arah

kebijakan utama, sedangkan skenario tunggal lebih tepat dibaca sebagai langkah transisional ketika kapasitas pembiayaan dan kelembagaan belum sepenuhnya siap. Temuan pada Bab V juga memperkuat jembatan analitis ke Bab VI. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tantangan utama pengelolaan sumber daya air di Sub-DAS Bila tidak lagi dapat dijawab hanya dengan diagnosis biofisik atau proyeksi ketersediaan air, melainkan memerlukan sintesis kebijakan yang menghubungkan air, layanan, stres, hasil, produksi, dan ekonomi dalam satu kerangka evaluasi.

Keterbatasan model perlu diinformasikan agar interpretasi kebijakan tetap proporsional. Pertama, proksi ekonomi pada penelitian ini masih berbentuk proksi pendapatan berbasis harga konstan dan belum memasukkan biaya input, biaya O&M riil, atau dinamika harga dan risiko pasar. Karena itu, besaran manfaat ekonomi sebaiknya dibaca sebagai peningkatan relatif antar-skenario, bukan sebagai analisis kelayakan finansial penuh. Kedua, meskipun pembagian dua musim tanam telah diterapkan untuk evaluasi stabilitas, variasi kalender tanam aktual yang dapat bergeser antar-tahun belum dimodelkan secara eksplisit. Kalender tanam nyata dapat berubah mengikuti iklim, operasi irigasi, dan keputusan petani, sehingga pengembangan selanjutnya dapat memasukkan kalender tanam adaptif dan heterogenitas antar-segmen layanan. Ketiga, kualitas air tidak diskenariokan sehingga robustitas kebijakan pada kondisi degradasi kualitas air yang lebih ekstrem belum diuji. Pengembangan lanjutan dapat menambahkan modul beban pencemar musiman atau skenario degradasi kualitas air untuk menguji ketahanan paket kebijakan secara lebih lengkap. Meskipun demikian, keterbatasan tersebut tidak mengurangi kegunaan utama model sebagai kerangka operasional untuk membandingkan efektivitas kebijakan lintas dimensi, mengidentifikasi strategi yang paling efektif untuk meningkatkan reliabilitas layanan irigasi, dan memperkuat ketahanan pangan berbasis padi di Sub-DAS Bila.

5.5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan pada Bab V, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penelitian ini berhasil mengembangkan model sistem dinamik berbasis *PowerSim* sebagai kerangka evaluasi kebijakan pengelolaan sumber daya air irigasi di Sub-DAS Bila yang menghubungkan pasokan air bulanan, kebutuhan irigasi, kinerja layanan, respons stres air tanaman, produksi padi, dan proksi manfaat ekonomi dalam satu sistem analitis yang terintegrasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa persoalan utama pengelolaan air di Sub-DAS Bila bukan terletak pada kecukupan air tahunan semata, melainkan pada ketidakandalan layanan irigasi pada skala intra-musiman yang memunculkan defisit berulang pada bulan-bulan tertentu.
2. Pada kondisi baseline S0, kinerja layanan irigasi menunjukkan tekanan yang nyata. Reliabilitas kejadian tanpa defisit hanya mencapai 0,63, dengan 115 bulan atau 36,86% periode simulasi mengalami defisit. *WSI* rata-rata tercatat sebesar 0,21 dengan nilai maksimum 0,98, sedangkan defisit rata-rata mencapai 21,41 mm/bulan dan defisit maksimum mencapai 125,25 mm/bulan. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun sistem masih berfungsi, terdapat periode-periode kritis intra-musiman yang berulang dan berpotensi menimbulkan penalti hasil yang besar. Hal tersebut

tercermin pada *Yield_actual* rata-rata sebesar 6,99 ton/ha/musim, yang dapat turun hingga 3,28 ton/ha/musim pada kejadian stres paling berat.

3. Intervensi kebijakan tunggal mampu memperbaiki kinerja sistem, tetapi dampaknya masih terbatas dan berbeda menurut mekanisme yang diintervensi. S1 yang menekankan peningkatan efisiensi penyaluran meningkatkan reliabilitas menjadi 0,67 dan menurunkan defisit kumulatif menjadi 6.126,32 mm. S2 yang menekankan pengurangan kebutuhan efektif memberikan penurunan defisit kumulatif yang lebih besar menjadi 5.181,86 mm, dengan reliabilitas yang sama, yaitu 0,67. S3 yang menekankan peningkatan akses dan alokasi efektif menghasilkan reliabilitas tertinggi di antara skenario tunggal, yaitu 0,69, dengan *WSI* rata-rata turun menjadi 0,17 dan *FR* rata-rata meningkat menjadi 0,83. Namun demikian, pada seluruh skenario tunggal, *WSI* maksimum masih tetap tinggi, sehingga risiko stres ekstrem belum sepenuhnya hilang.
4. Paket terpadu S4 memberikan perbaikan paling kuat dan paling konsisten dibanding seluruh skenario lain. S4 meningkatkan reliabilitas menjadi 0,76, menurunkan jumlah bulan defisit menjadi 75, menurunkan defisit kumulatif menjadi 3.656,73 mm, menurunkan *WSI* rata-rata menjadi 0,13, dan meningkatkan *FR* rata-rata menjadi 0,88. Perbaikan kinerja layanan ini diterjemahkan ke dalam *outcome* produksi dan ekonomi yang lebih baik, yaitu *Yield_actual* rata-rata meningkat menjadi 7,40 ton/ha/musim, produksi padi kumulatif meningkat menjadi 9.159.649,69 ton, dan *Farm_revenue* kumulatif meningkat menjadi Rp 41.218.423.617.239,00. Selain itu, stabilitas produksi juga membaik, ditunjukkan oleh penurunan CV produksi tahunan dari 13,99% menjadi 13,77% dan CV produksi musiman dari 15,05% menjadi 14,47%. Dengan demikian, paket terpadu tidak hanya meningkatkan ketersediaan, tetapi juga memperkuat stabilitas produksi sebagai komponen penting ketahanan pangan berbasis padi.
5. Dari sisi kebijakan dan manajerial, hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi pengelolaan sumber daya air yang paling efektif untuk Sub-DAS Bila adalah strategi yang berfokus pada pengurangan defisit pada bulan-bulan kritis melalui kombinasi perbaikan pasokan efektif, pengendalian permintaan, dan penguatan tata kelola distribusi. Namun, perbaikan tersebut memerlukan dukungan pengelolaan yang lebih besar, yang tercermin pada *OM_index* sebesar 120,00 pada S1 dan 130,00 pada S4, dibandingkan baseline 100,00. Oleh karena itu, kebijakan yang direkomendasikan bukan hanya rehabilitasi teknis jaringan, tetapi paket terpadu yang juga mencakup rehabilitasi jaringan, *demand management*, penguatan tata kelola distribusi, serta dukungan operasi dan pemeliharaan yang memadai. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa keberlanjutan ketahanan pangan berbasis padi di Sub-DAS Bila akan lebih efektif didukung oleh kebijakan yang menargetkan peningkatan reliabilitas layanan irigasi pada skala intra-musiman daripada kebijakan yang hanya berorientasi pada kecukupan pasokan air tahunan.

5.6. Daftar Pustaka

- Abdullah, Hardianty H, R., Boceng, A., & Asra, R. (2022). Flood Vulnerability Projection in Rice Land Based on The HadCM3 Climate Model in The Bila Watershed Province Of South Sulawesi. *Jurnal Galung Tropika*, 11(2), 143–152. <https://doi.org/10.31850/jgt.v11i2.898>
- Abuhay, W., Gashaw, T., & Tsegaye, L. (2023). Assessing impacts of land use/land cover changes on the hydrology of Upper Gilgel Abbay watershed using the SWAT model. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100535. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100535>
- Amorocho-Daza, H., Sušnik, J., van der Zaag, P., & Slinger, J. H. (2025). A model-based policy analysis framework for social-ecological systems: Integrating uncertainty and participation in system dynamics modelling. *Ecological Modelling*, 499, 110943. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2024.110943>
- Armenia, S., Barnabé, F., Franco, E., Iandolo, F., Pompei, A., & Tsaples, G. (2023). Identifying policy options and responses to water management issues through System Dynamics and fsQCA. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122737. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2023.122737>
- Ashkevari, S., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2025). Evaluation of planning policy scenarios for the water-food and energy nexus through the development of a multi-objective optimization model. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 32806-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17085-z>
- Ashour, M. A., Mohamed, H. I., Abdou, A. A., & Abu-Zaid, T. S. (2024). New approach for the rehabilitation of irrigation canals based on implementation priority. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(8), 102831. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2024.102831>
- Asra, R., Mappiasse, M. F., & Nurnawati, A. A. (2020). The Application of CA-Markov Model for Prediction of Land Use Change in Sub-Watershed Bila Year 2036. *AGROVITAL : Jurnal Ilmu Pertanian*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.35329/agrovital.v5i1.630>
- Bailey, R. T., Abbas, S., Arnold, J. G., & White, M. J. (2025). SWAT+MODFLOW: a new hydrologic model for simulating surface-subsurface flow in managed watersheds. *Geoscientific Model Development*, 18(17), 5681–5697. <https://doi.org/10.5194/GMD-18-5681-2025>
- Barkhordari, S., Hashemy Shahadany, S. M., Taghvaeian, S., Firoozfar, A. R., & Maestre, J. M. (2020). Reducing losses in earthen agricultural water conveyance and distribution systems by employing automatic control systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105122. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.105122>
- Basukala, A. K., Eschenbach, A., & Rasche, L. (2024). Effect of irrigation canal conveyance efficiency enhancement on crop productivity under climate change in Nepal. *Environmental Monitoring and Assessment* 2024 196:12, 196(12), 1282-. <https://doi.org/10.1007/S10661-024-13405-4>
- Behboudian, M., & Kerachian, R. (2021). Evaluating the resilience of water resources management scenarios using the evidential reasoning approach: The Zarrinehrud river basin experience. *Journal of Environmental Management*, 284, 112025. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112025>
- Bekchanov, M. (2024). Conveyance efficiency and irrigation water productivity under varying water supply conditions in arid lowlands of Central Asia. *Agricultural Water Management*, 293, 108697. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.108697>

- Benavides, J., Hernández-Plaza, E., Mateos, L., & Fereres, E. (2021). A global analysis of irrigation scheme water supplies in relation to requirements. *Agricultural Water Management*, 243, 106457. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106457>
- Bo, Y., Wang, X., van Groenigen, K. J., Linqvist, B. A., Müller, C., Li, T., Yang, J., Jägermeyr, J., Qin, Y., & Zhou, F. (2024). Improved alternate wetting and drying irrigation increases global water productivity. *Nature Food* 2024 5:12, 5(12), 1005–1013. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01081-z>
- Bopp, C., Engler, A., Jordan, C., & Jara-Rojas, R. (2024). What is behind water user satisfaction with irrigation organizations' performance? An empirical analysis under different water scarcity conditions. *Agricultural Water Management*, 304, 109072. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109072>
- Bowden, C., Foster, T., & Parkes, B. (2023). Identifying links between monsoon variability and rice production in India through machine learning. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 2446-. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27752-8>
- Cho, G. H., Ahmad, M. J., & Choi, K. S. (2021). Water Supply Reliability of Agricultural Reservoirs under Varying Climate and Rice Farming Practices. *Water* 2021, Vol. 13, Page 2988, 13(21), 2988. <https://doi.org/10.3390/W13212988>
- Chukalla, A. D., Mul, M. L., Van Der Zaag, P., Van Halsema, G., Mubaya, E., Muchanga, E., Den Besten, N., & Karimi, P. (2022). A framework for irrigation performance assessment using WaPOR data: The case of a sugarcane estate in Mozambique. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(10), 2759–2778. <https://doi.org/10.5194/HESS-26-2759-2022>
- Demir, M. S., & Muratoglu, A. (2025). Improving water footprint assessment in agriculture: A high-resolution SWAT model study of the Ceyhan Basin, Türkiye. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 100664. <https://doi.org/10.1016/J.ECOHYD.2025.100664>
- Egli, L., Schröter, M., Scherber, C., Tschamtkke, T., & Seppelt, R. (2020). Crop asynchrony stabilizes food production. *Nature* 2020 588:7837, 588(7837), E7–E12. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2965-6>
- Eslamifar, G., Balali, H., & Fernald, A. (2024). Following Strategy and Its Impact on Surface Water and Groundwater Withdrawal, and Agricultural Economics: A System Dynamics Approach in Southern New Mexico. *Water* 2024, Vol. 16, 16(1). <https://doi.org/10.3390/W16010181>
- Gao, R., Zhuo, L., Duan, Y., Yan, C., Yue, Z., Zhao, Z., & Wu, P. (2024). Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water-saving, and emission reduction in rice fields: A global meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 353, 110075. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2024.110075>
- Giordano, R., Osann, A., Henao, E., López, M. L., Piqueras, J. G., Nikolaidis, N. P., Lilli, M., Coletta, V. R., & Pagano, A. (2025). Causal Loop Diagrams for bridging the gap between Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus thinking and Nexus doing: Evidence from two case studies. *Journal of Hydrology*, 650, 132571. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.132571>
- Golmohammadi, M. H., Safavi, H. R., Sandoval-Solis, S., & Fooladi, M. (2021). Improving Performance Criteria in the Water Resource Systems Based on Fuzzy Approach. *Water Resources Management* 2021 35:2, 35(2), 593–611. <https://doi.org/10.1007/S11269-020-02739-6>
- Gómez-Limón, J. A., Gutiérrez-Martín, C., & Montilla-López, N. M. (2020). Agricultural Water Allocation under Cyclical Scarcity: The Role of Priority Water Rights. *Water* 2020, Vol. 12, 12(6). <https://doi.org/10.3390/W12061835>

- Gu, R., He, H., Chen, H., & Tian, J. (2025). Study on hierarchical regulation of crop irrigation threshold under severe drought conditions. *Agricultural Water Management*, 307, 109239. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109239>
- Guan, G., Zhu, Z., Mao, Z., Feng, T., & Hu, X. (2025). Hierarchical distributed model predictive control for large-scale irrigation canal network under water scarcity condition: A case study of the Zhanghe Irrigation District, China. *Agricultural Water Management*, 319, 109787. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2025.109787>
- Guemouria, A., Chehbouni, A., Belaqqiz, S., Epule Epule, T., Ait Brahim, Y., El Khalki, E. M., Dhiba, D., & Bouchaou, L. (2023). System Dynamics Approach for Water Resources Management: A Case Study from the Souss-Massa Basin. *Water* 2023, Vol. 15, 15(8). <https://doi.org/10.3390/W15081506>
- Guiné, R. de P. F., Pato, M. L. de J., da Costa, C. A., da Costa, D. de V. T. A., da Silva, P. B. C., & Martinho, V. J. P. D. (2021). Food Security and Sustainability: Discussing the Four Pillars to Encompass Other Dimensions. *Foods* 2021, Vol. 10, 10(11). <https://doi.org/10.3390/FOODS10112732>
- Han, E., Montes, C., Hussain, S. G., & Krupnik, T. J. (2024). Agronomic monsoon onset definitions to support planting decisions for rainfed rice in Bangladesh. *Climatic Change* 2024 177:5, 177(5), 77-. <https://doi.org/10.1007/S10584-024-03736-Z>
- Harkness, C., Areal, F. J., Semenov, M. A., Senapati, N., Shield, I. F., & Bishop, J. (2023). Towards stability of food production and farm income in a variable climate. *Ecological Economics*, 204, 107676. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2022.107676>
- Hassan, M. A., Dahu, N., Hongning, T., Qian, Z., Yueming, Y., Yiru, L., & Shimei, W. (2023). Drought stress in rice: morpho-physiological and molecular responses and marker-assisted breeding. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1215371. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1215371/FULL>
- He, J., Ma, B., & Tian, J. (2022). Water production function and optimal irrigation schedule for rice (*Oryza sativa* L.) cultivation with drip irrigation under plastic film-mulched. *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 17243-. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20652-3>
- Hou, Y., Wang, S., Song, S., Chen, P., & Wu, X. (2025). Crop irrigation water requirements mismatch the actual water allocation in the anthropogenic-regulated Yellow River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 61, 102715. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2025.102715>
- Hristov, I., Cristofaro, M., Camilli, R., & Leoni, L. (2024). A system dynamics approach to the balanced scorecard: a review and dynamic strategy map for operations management. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(4), 705–743. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2022-0069>
- Ishimaru, T., Sasaki, K., Lumanglas, P. D., Leo U. Cabral, C., Ye, C., Yoshimoto, M., Kumar, A., & Henry, A. (2022). Effect of drought stress on flowering characteristics in rice (*Oryza sativa* L.): a study using genotypes contrasting in drought tolerance and flower opening time. *Plant Production Science*, 25(3), 359–370. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2022.2085589>
- Iwanaga, T., Wang, H. H., Hamilton, S. H., Grimm, V., Koralewski, T. E., Salado, A., Elsayah, S., Razavi, S., Yang, J., Glynn, P., Badham, J., Voinov, A., Chen, M., Grant, W. E., Peterson, T. R., Frank, K., Shenk, G., Barton, C. M., Jakeman, A. J., & Little, J. C. (2021). Socio-technical scales in socio-environmental modeling: Managing a system-of-systems modeling approach. *Environmental Modelling & Software*, 135, 104885. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2020.104885>

- Kaghazchi, A., Hashemy Shahdany, S. M., & Roozbahani, A. (2021). Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. *Agricultural Water Management*, 245, 106578. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106578>
- Khan, A. A., Wang, Y. F., Akbar, R., & Alhoqail, W. A. (2025). Mechanistic insights and future perspectives of drought stress management in staple crops. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1547452. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2025.1547452>
- Leroy, D. (2023). An empirical assessment of the institutional performance of community-based water management in a large-scale irrigation system in southern Mexico. *Agricultural Water Management*, 276, 108051. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.108051>
- Li, L., Huang, Z., Mu, Y., Song, S., Zhang, Y., Tao, Y., & Nie, L. (2024). Alternate wetting and drying maintains rice yield and reduces global warming potential: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 318, 109603. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2024.109603>
- Li, M., Zhang, X., Chen, Y., Xu, Y., Li, R., Zhao, L., & Fu, Q. (2025). Multiobjective optimization of daily scale irrigation schedules for rice in irrigation districts considering joint uncertainties in water supply and demand. *Computers and Electronics in Agriculture*, 231, 110054. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2025.110054>
- Liberatore, C. M., Biancucci, M., Ezquer, I., Gregis, V., & Di Marzo, M. (2025). Investigating how reproductive traits in rice respond to abiotic stress. *Journal of Experimental Botany*, 76(8), 2064–2080. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERA031>
- Liu, Y., Wang, L., Chen, X., Niu, Z., Zhang, M., Sun, J., & Zhao, J. (2025). Quantifying the effects of aerosols and cloud radiative effect on rice growth and yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 364, 110453. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2025.110453>
- Lund, A. A. R., Gates, T. K., & Scalia, J. (2023). Characterization and control of irrigation canal seepage losses: A review and perspective focused on field data. *Agricultural Water Management*, 289, 108516. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108516>
- Manikas, I., Ali, B. M., & Sundarakani, B. (2023). A systematic literature review of indicators measuring food security. *Agriculture & Food Security* 2023 12:1, 12(1), 10-. <https://doi.org/10.1186/S40066-023-00415-7>
- Mao, W., Zhu, Y., Huang, S., Han, X., Sun, G., Ye, M., & Yang, J. (2024). Assessment of spatial and temporal seepage losses in large canal systems under current and future water-saving conditions: A case study in the Hetao Irrigation District, China. *Agricultural Water Management*, 291, 108615. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108615>
- Mashaly, A. F., Fernald, A. G., Geli, H. M. E., Salim Bawazir, A., & Steiner, R. L. (2024). Dynamic simulation modeling for sustainable water management with climate change in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 644, 132126. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.132126>
- Metic, J., Guzzo, D., Kopainsky, B., McAlloone, T. C., & Pigosso, D. C. A. (2024). A simulation-based approach for investigating the dynamics of rebound effects in the circular economy: A case of use-oriented product/service system. *Journal of Environmental Management*, 365, 121627. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.121627>
- Mkondiwa, M., & Urfels, A. (2024). Risk-based evaluations of competing agronomic climate adaptation strategies: The case of rice planting strategies in the indo-

- Gangetic Plains. *Agricultural Systems*, 218, 104014. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2024.104014>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/TRANS.58.10715>
- Nahar, S. (2024). Modeling the effects of artificial intelligence (AI)-based innovation on sustainable development goals (SDGs): Applying a system dynamics perspective in a cross-country setting. *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123203. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2023.123203>
- Naugle, A., Langarudi, S., & Clancy, T. (2024). What is (quantitative) system dynamics modeling? Defining characteristics and the opportunities they create. *System Dynamics Review*, 40(2), e1762. <https://doi.org/10.1002/SDR.1762>
- Pang, J., Zhang, H., Xu, Q., Wang, Y., Wang, Y., Zhang, O., & Hao, J. (2020). Hydrological evaluation of open-access precipitation data using SWAT at multiple temporal and spatial scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(7), 3603–3626. <https://doi.org/10.5194/HESS-24-3603-2020>
- Rafew, S. M., & Rafizul, I. M. (2021). Application of system dynamics model for municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh. *Waste Management*, 129, 1–19. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.04.059>
- Rajah, J. K., & Kopainsky, B. (2025). A systematic method to integrate co-produced causal loop diagrams based on feedback stories. *System Dynamics Review*, 41(1), e1794. <https://doi.org/10.1002/SDR.1794>
- Reckling, M., Ahrends, H., Chen, T. W., Eugster, W., Hadasch, S., Knapp, S., Laidig, F., Linstädter, A., Macholdt, J., Piepho, H. P., Schiffrers, K., & Döring, T. F. (2021). Methods of yield stability analysis in long-term field experiments. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 2021 41:2, 41(2), 27-. <https://doi.org/10.1007/S13593-021-00681-4>
- Staddal, I., Haridjaja, O., & Hidayat, Y. (2016). The Analysis of Streamflow on Bila Watershed, South Sulawesi. *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(2), 117–130. <https://doi.org/10.32679/jsda.v12i2.56>
- Steduto, P., C. Hsiao, T., Fereres, E., Raes, D., & Land and Water Division. (2012). *Crop Yield Response to Water*. In United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat): Addis Ababa, Ethiopia. (2021). FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i2800e>
- Sumanasekara, H. S., Jayasinghe, A., Herath, A. B., Siriwardhana, K. D., Imbulana, I. L., Mullegamgoda, K., Herath, R., Paranavithana, G., & Rathnayake, U. (2025). Insights on the irrigation conveyance efficiency of three canal systems for improving agricultural sustainability in Sri Lanka. *Water Supply*, 25(5), 807–824. <https://doi.org/10.2166/WS.2025.056>
- Sun, B., Lu, S., Pan, X., Han, L., & Tu, J. (2025). Multi-stakeholders cooperative decision analysis in underground logistics system development: A methodology combining topic modeling and system dynamics. *Computers & Industrial Engineering*, 210, 111548. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2025.111548>
- Sunkara, S. V., & Singh, R. (2022). Assessing the impact of the temporal resolution of performance indicators on optimal decisions of a water resources system. *Journal of Hydrology*, 612, 128185. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128185>
- Taguas, E. V., Cuadrado-Alarcón, B., Domenech, I., Carmona, M. A., Mateos, L., & Gomez-Macpherson, H. (2025). Irrigation performance and hydrological indicators in an irrigated catchment: How participatory research within a FabLab can contribute to sustainable irrigated production. *Agricultural Water Management*, 316, 109553. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2025.109553>

- Tankari, M. R. (2020). Rainfall variability and farm households' food insecurity in Burkina Faso: nonfarm activities as a coping strategy. *Food Security* 2020 12:3, 12(3), 567–578. <https://doi.org/10.1007/S12571-019-01002-0>
- Wang, S., Liu, Y., Asseng, S., Harrison, M. T., Tang, L., Liu, B., Liu, K., Luo, Z., Wang, E., Chang, J., Qiu, X., Liu, L., Zhang, X., Cao, W., Zhu, Y., & Xiao, L. (2025). Rice yield stability and its determinants across different rice-cropping systems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 364, 110452. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2025.110452>
- Wang, Y., & Wu, J. (2018). An Empirical Examination on the Role of Water User Associations for Irrigation Management in Rural China. *Water Resources Research*, 54(12), 9791–9811. <https://doi.org/10.1029/2017WR021837>
- Xu, Y., Zhang, Z., Li, M., Xia, S., Liu, W., Xu, X., & Li, Q. (2025). Cross-scale synergistic optimization for irrigation allocation and fertilizer management under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 317, 109672. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2025.109672>
- Xue, R., Jiang, Y., Li, H., & Shi, B. (2025). Review of advancements and challenges in delayed irrigation: Enhancing crop water productivity and sustainable crop production. *Agricultural Water Management*, 318, 109739. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2025.109739>
- Yu, Q., Dai, Y., Wei, J., Wang, J., Liao, B., & Cui, Y. (2024). Rice yield and water productivity in response to water-saving irrigation practices in China: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 302, 109006. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109006>
- Zahir, A. M., Somura, H., & Moroizumi, T. (2024). Regional-scale evaluation of tertiary irrigation system in Muda Irrigation Scheme from space. *Agricultural Water Management*, 306, 109175. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.109175>
- Zhou, K., Gao, Z., Fan, Y., Chen, H., Zheng, X., & Zhang, X. (2025). Research on the coupled model of canal system optimization control and water distribution. *Agricultural Water Management*, 320, 109842. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2025.109842>
- Zhu, S., Tong, W., Li, H., Li, K., Xu, W., & Liang, B. (2025). Temporal Variations in Rice Water Requirements and the Impact of Effective Rainfall on Irrigation Demand: Strategies for Sustainable Rice Cultivation. *Water*, 17(5), 656. <https://doi.org/10.3390/W17050656/S1>
- Zulkafli, Z., Muharam, F. M., Raffar, N., Jajarmizadeh, A., Abdi, M. J., Rehan, B. M., & Nurulhuda, K. (2021). Contrasting Influences of Seasonal and Intra-Seasonal Hydroclimatic Variabilities on the Irrigated Rice Paddies of Northern Peninsular Malaysia for Weather Index Insurance Design. *Sustainability* 2021, Vol. 13, 13(9). <https://doi.org/10.3390/SU13095207>

BAB VI PEMBAHASAN UMUM

Pembahasan ini menempatkan seluruh temuan penelitian ke dalam satu kerangka pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS. Fokus utamanya dengan mensintesis keterkaitan antara kuantitas air, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, perubahan iklim, dan implikasi kebijakan pengelolaan. Dalam kerangka tersebut, nilai utama penelitian ini tidak hanya terletak pada penggunaan beberapa model, tetapi pada keterlacakan analisis dari diagnosis kondisi eksisting, proyeksi perubahan, hingga evaluasi alternatif kebijakan yang relevan secara operasional.

6.1. Sintesis persoalan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa persoalan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila tidak dapat dijelaskan hanya sebagai persoalan ketersediaan air atau mutu air secara terpisah. Persoalan utamanya terletak pada bagaimana air tersedia, didistribusikan, dan dipertahankan mutunya sebagai layanan yang menopang sistem irigasi pada skala ruang dan waktu yang relevan bagi budidaya padi. Dengan demikian, pertanyaan kuncinya bukan sekadar apakah air tersedia dalam jumlah cukup secara tahunan, tetapi apakah pasokan tersebut hadir pada saat dibutuhkan, pada lokasi yang membutuhkan, dan dengan kualitas yang masih aman untuk menopang keberlanjutan layanan irigasi.

Kelayakan fondasi model proses ditunjukkan oleh kinerja SWAT yang “sangat baik” (NSE 0,77–0,76; R^2 0,80–0,77; $P_{bias} < \pm 3\%$), sehingga proksi pasokan air bulanan yang digunakan dalam analisis neraca air dan model kebijakan memiliki reliabilitas numerik yang kuat. Pada sisi kualitas air, pemodelan proses QUAL2Kw yang terkalibrasi pada kondisi *synoptic* April 2024 memungkinkan pembacaan gradien degradasi yang sering luput pada evaluasi berbasis pengukuran sesaat, sekaligus menyediakan “baseline kinetika” yang dapat dipertahankan untuk proyeksi horizon 2036. Dengan keterlacakan rantai pemodelan tersebut, simpulan pada level kebijakan ditopang oleh bukti proses yang konsisten, dimana rekomendasi adaptasi tidak bergantung pada satu model tunggal, melainkan pada konvergensi lintas-komponen.

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa sistem Sub-DAS Bila masih memiliki basis sumber daya air yang relatif kuat pada skala tahunan, tetapi tetap menunjukkan kerentanan nyata pada skala intra-musiman. Pada kondisi eksisting, nilai IRI sebesar 0,75 dan IDS sebesar 106,12 mm menunjukkan bahwa kerentanan utama sistem tidak terletak pada kekurangan air tahunan, melainkan pada ketidakselarasan temporal antara pasokan dan kebutuhan air irigasi. Pola ini tetap bertahan pada horizon 2036, ketika reliabilitas bulanan masih berada di kisaran 0,75 dan IDS meningkat menjadi 122,12 mm. Temuan ini menegaskan bahwa masalah air di Sub-DAS Bila lebih tepat dibaca sebagai persoalan keandalan layanan irigasi daripada sekadar persoalan volume air tahunan.

Pada saat yang sama, kualitas air sungai tidak dapat diposisikan sebagai isu sekunder. Secara regulatif (mengacu PP 22/2021), mutu air masih tergolong layak untuk irigasi, tetapi profil longitudinal kualitas air memperlihatkan gradien degradasi yang konsisten menuju tengah dan hilir. Pada kondisi eksisting, DO menurun dari 8,96 mg/L

di hulu menjadi 5,48 mg/L di hilir, sedangkan pada horizon 2036 DO minimum diproyeksikan turun menjadi 4,77 mg/L. Kondisi ini menunjukkan bahwa status layak secara regulatif tidak identik dengan aman secara operasional, karena margin keamanan kualitas air mulai menipis pada segmen-segmen tertentu. Dalam konteks irigasi, temuan ini penting karena menunjukkan bahwa kualitas air harus dibaca sebagai bagian dari keandalan layanan, bukan hanya sebagai indikator ekologis sungai.

Jika kedua dimensi tersebut dibaca secara bersamaan, maka tampak bahwa kerentanan sistem sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila bersifat ganda. Pada dimensi kuantitas, sistem menghadapi risiko *too little* dalam bentuk defisit intra-musiman pada bulan-bulan kritis. Pada dimensi kualitas, sistem menghadapi risiko *too dirty* dalam bentuk penurunan margin keamanan mutu air pada segmen tertentu. Kedua risiko ini tidak berdiri sendiri, melainkan saling berinteraksi dalam satu sistem DAS yang sama. Pasokan yang tidak hadir pada saat dibutuhkan akan menurunkan reliabilitas layanan, sedangkan air yang secara kuantitatif tersedia tetapi mutunya makin rapuh juga akan menurunkan efektivitas layanan irigasi dan meningkatkan beban pengelolaan.

Sintesis ini juga menunjukkan bahwa perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim harus dipahami sebagai faktor penggerak utama sistem, bukan sebagai latar belakang tambahan. Perubahan lanskap menunjukkan penurunan vegetasi alami atau semialami dan bergerak menuju mosaik yang semakin agro-dominan, disertai kenaikan temperatur sebesar 0,34 °C untuk T_{min} dan 0,45 °C untuk T_{max} , memperlihatkan bahwa tekanan terhadap sistem cenderung menguat pada masa mendatang. Kombinasi keduanya memperbesar kebutuhan evaporatif, memodifikasi respons hidrologi, dan meningkatkan tekanan beban difus terhadap kualitas air. Dengan demikian, risiko masa depan di Sub-DAS Bila tidak terutama muncul sebagai penurunan drastis volume air tahunan, tetapi sebagai penguatan tekanan musiman pada kuantitas dan kualitas air yang sama-sama menentukan kinerja layanan irigasi.

Dari sudut pandang manajerial, hasil penelitian ini menegaskan bahwa persoalan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila harus dibaca sebagai persoalan layanan irigasi berbasis sistem DAS. Air yang cukup secara tahunan belum tentu andal secara operasional, dan air yang masih layak secara regulatif belum tentu aman secara fungsional untuk menjamin kestabilan layanan. Karena itu, pengelolaan tidak dapat lagi bertumpu pada pembacaan parsial yang hanya mengejar kecukupan air atau menilai mutu air secara terpisah. Yang dibutuhkan adalah pengelolaan yang mampu menjembatani dinamika pasokan, kebutuhan, kualitas, perubahan lanskap, perubahan iklim, dan respons tata kelola dalam satu kerangka yang saling terhubung.

6.2. Keterkaitan kuantitas air, kebutuhan irigasi, dan keandalan layanan

Temuan penelitian ini menegaskan bahwa inti persoalan kuantitas air di Sub-DAS Bila bukan terletak pada kekurangan absolut air tahunan, tetapi pada ketidakselarasan antara waktu ketersediaan air dan waktu kebutuhan irigasi. Dengan kata lain, surplus tahunan menutupi kerentanan intra-musiman yang justru paling menentukan kinerja layanan irigasi di lahan sawah. Pada kondisi eksisting, total hasil air tahunan mencapai 1.882,03 mm, jauh lebih besar daripada kebutuhan irigasi tahunan sebesar 765,33 mm. Namun, kelebihan air secara agregat tersebut tidak otomatis

diterjemahkan menjadi layanan yang andal pada skala bulanan, karena sistem tetap mengalami defisit pada bulan-bulan tertentu yang bertepatan dengan fase budidaya yang sensitif.

Kerentanan tersebut tercermin pada indikator keandalan layanan. Pada kondisi eksisting, nilai *IRI* sebesar 0,75 menunjukkan bahwa kebutuhan irigasi hanya dapat dipenuhi pada sekitar 75,00% bulan ketika irigasi diperlukan, sedangkan *IDS* mencapai 106,12 mm atau sekitar 13,90% dari total kebutuhan irigasi tahunan. Angka ini menunjukkan bahwa masalah utama bukan tidak tersedianya air secara umum, melainkan masih adanya kekurangan layanan yang berulang pada periode tertentu. Dengan demikian, sistem yang tampak aman pada skala tahunan tetap dapat menghasilkan tekanan nyata pada tingkat usaha tani ketika pasokan tidak hadir tepat pada saat kebutuhan mencapai puncaknya.

Pola yang sama tetap bertahan pada horizon 2036. Hasil proyeksi menunjukkan bahwa total hasil air masih mencapai 1.849,85 mm/tahun, sedangkan kebutuhan irigasi kotor sebesar 751,50 mm/tahun, sehingga secara tahunan sistem tetap berada pada kondisi surplus. Namun demikian, reliabilitas layanan justru masih menunjukkan tekanan, dengan *IRI* sekitar 0,75 dan *IDS* meningkat menjadi 122,12 mm atau sekitar 16,25% dari total kebutuhan irigasi tahunan. Artinya, perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim tidak terutama menggeser sistem menjadi defisit tahunan, tetapi mempertahankan bahkan memperkuat *mismatch* intra-musiman yang telah terlihat pada kondisi eksisting.

Secara operasional, *mismatch* tersebut terkonsentrasi pada bulan-bulan kritis, yaitu April, Oktober, dan November. Ketiga bulan ini menjadi sangat penting karena bertepatan dengan fase persiapan lahan dan awal pertumbuhan, yaitu fase ketika kebutuhan air irigasi meningkat tajam. Di antara ketiganya, Oktober muncul sebagai titik kerentanan tertinggi pada skenario 2036 karena defisit mencapai sekitar 33,13% dari kebutuhan bulan tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa persoalan layanan irigasi di Sub-DAS Bila bersifat sangat temporal. Risiko utama tidak muncul karena air tahunan tidak cukup, tetapi karena air tidak tersedia secara efektif pada jendela waktu yang paling menentukan keberhasilan musim tanam.

Dalam kerangka ini, indikator kinerja layanan tidak dapat dibatasi pada satu ukuran tunggal. *IRI* dan *IDS* penting untuk membaca *mismatch* pasokan dan kebutuhan pada analisis neraca air, sedangkan *Deficit*, *WSI*, dan *FR* memperkaya pembacaan performa layanan pada tahap evaluasi kebijakan. Kelima indikator tersebut saling melengkapi, bukan dipisahkan sebagai ukuran yang berdiri sendiri dalam membaca performa layanan, karena masing-masing menangkap dimensi yang berbeda, yaitu seberapa sering sistem gagal memenuhi kebutuhan, seberapa besar kekurangan air yang terjadi, seberapa berat tekanan air yang dialami, dan seberapa jauh kebutuhan aktual benar-benar terpenuhi. Dengan demikian, layanan irigasi yang dinilai baik bukan hanya layanan yang memiliki pasokan rata-rata tinggi, tetapi layanan yang mampu menekan frekuensi, besaran, dan intensitas defisit pada bulan-bulan yang kritis.

Makna kebijakan dari temuan menunjukkan intervensi paling relevan adalah intervensi yang menargetkan bulan kritis, khususnya April, Oktober, dan November, karena di situlah *mismatch* antara pasokan dan kebutuhan paling nyata. Strategi peningkatan layanan karena itu perlu diarahkan pada penguatan reliabilitas distribusi,

pengurangan tekanan kebutuhan, peningkatan efisiensi penyaluran, dan pengaturan alokasi air yang lebih responsif terhadap pola musiman. Pendekatan ini lebih tepat daripada strategi yang hanya berfokus pada peningkatan pasokan tahunan, karena sumber kerentanannya memang berada pada jendela waktu tertentu, bukan pada keseluruhan tahun.

Secara umum, sintesis ini menegaskan bahwa kuantitas air dan keandalan layanan merupakan dua hal yang berkaitan erat tetapi tidak identik. Sistem dapat memiliki ketersediaan air tahunan yang relatif memadai, namun tetap gagal memberikan layanan yang stabil apabila pasokan tidak selaras dengan kebutuhan pada skala intra-musiman. Karena itu, pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila harus bergeser dari orientasi kecukupan tahunan menuju orientasi reliabilitas layanan bulanan. Pergeseran cara baca ini penting, karena hanya dengan memahami bahwa surplus tahunan dapat menyembunyikan kerentanan intra-musiman, kebijakan pengelolaan dapat diarahkan secara lebih tepat pada waktu-waktu yang benar-benar menentukan keberhasilan layanan irigasi.

6.3. Keterkaitan kualitas air sungai dengan keberlanjutan layanan irigasi

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa kualitas air merupakan prasyarat layanan irigasi yang andal, bukan sekadar deskripsi kondisi ekologis sungai. Dalam konteks pengelolaan air lahan sawah, air yang tersedia dalam jumlah cukup belum tentu mampu mendukung layanan secara berkelanjutan apabila mutu airnya menurun pada segmen-segmen tertentu. Karena itu, kualitas air perlu dibaca sebagai bagian integral dari performa layanan irigasi, terutama karena penurunan mutu air dapat meningkatkan risiko sedimentasi, menurunkan kapasitas saluran, dan memperbesar kebutuhan operasi serta pemeliharaan jaringan.

Hasil analisis menunjukkan adanya gradien degradasi longitudinal dari hulu ke arah tengah dan hilir. Pada kondisi eksisting, kadar DO menurun dari 8,96 mg/L di hulu menjadi 5,48 mg/L di hilir, sedangkan ISS meningkat hingga 14,08 mg/L di bagian hilir. Pola ini menegaskan bahwa kualitas air tidak seragam di sepanjang aliran, tetapi memburuk secara bertahap pada segmen yang menerima akumulasi tekanan dari bagian hulu dan wilayah sekitarnya. Dengan demikian, pembacaan kualitas air yang hanya bertumpu pada satu titik atau satu status umum menjadi kurang memadai untuk menjelaskan risiko nyata terhadap layanan irigasi.

Sehingga, DO penting dipahami sebagai *buffer* keselamatan sistem. Selama nilainya masih berada pada kisaran yang memenuhi baku mutu, layanan irigasi secara regulatif memang masih dapat dinilai layak. Namun, status layak tidak identik dengan aman secara operasional. Penurunan DO menunjukkan menipisnya margin keamanan kualitas air, sehingga sistem menjadi lebih rentan terhadap tambahan tekanan, terutama pada saat debit melemah atau beban organik meningkat. Pada horizon 2036, DO minimum bahkan diproyeksikan turun menjadi 4,77 mg/L, yang menunjukkan bahwa ruang aman sistem semakin menyempit meskipun belum serta-merta menunjukkan kegagalan mutu secara menyeluruh.

Di sisi lain, ISS perlu diperlakukan sebagai indikator risiko fisik yang langsung berkaitan dengan keberlanjutan layanan irigasi. Peningkatan ISS di bagian hilir, dari

14,08 mg/L pada kondisi eksisting menjadi 16,82 mg/L pada proyeksi 2036, menunjukkan kecenderungan meningkatnya beban padatan yang berpotensi mempercepat sedimentasi dan menambah tekanan pada jaringan irigasi. Implikasinya bersifat sangat operasional, karena akumulasi padatan dapat menurunkan kapasitas saluran, mengganggu distribusi air, dan meningkatkan kebutuhan pengerukan serta pemeliharaan rutin. Dalam arti ini, penurunan kualitas air tidak hanya berdampak pada kondisi sungai, tetapi juga pada efektivitas layanan yang diterima di tingkat lahan.

Kondisi tersebut menjadi semakin penting ketika dibaca bersama kecenderungan meningkatnya beban organik dan menurunnya kapasitas pemulihan alami aliran menuju hilir. Secara substantif, hal ini menunjukkan bahwa segmen tengah dan hilir adalah prioritas pengelolaan, karena pada bagian inilah tekanan kualitas air paling nyata terakumulasi dan paling berpotensi memengaruhi kestabilan layanan irigasi. Oleh sebab itu, pengelolaan tidak cukup diarahkan pada pemenuhan kuantitas air saja, tetapi juga harus menjaga agar air yang dialirkan tetap memiliki mutu yang aman secara operasional.

Secara umum, sintesis ini menegaskan bahwa keberlanjutan layanan irigasi di Sub-DAS Bila ditentukan oleh keterpaduan antara kuantitas dan kualitas air. Air yang secara regulatif masih tergolong layak tetap memerlukan kewaspadaan operasional apabila menunjukkan penipisan DO dan peningkatan ISS pada segmen tertentu. Karena itu, segmen tengah dan hilir perlu ditempatkan sebagai fokus pengelolaan kualitas air, sementara indikator seperti DO minimum dan ISS perlu diposisikan sebagai sinyal dini untuk menjaga stabilitas layanan. Dengan cara baca ini, kualitas air tidak lagi dipahami sebagai isu tambahan, tetapi sebagai komponen inti dalam menjaga layanan irigasi yang efektif, stabil, dan berkelanjutan.

6.4. Peran perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim sebagai penggerak sistem

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim bukan variabel tambahan, tetapi penggerak sistem yang menjembatani kondisi eksisting dengan risiko masa depan. Keduanya bekerja sebagai faktor yang membentuk ulang hubungan antara pasokan air, kebutuhan irigasi, dan kualitas air, sehingga perubahan yang tampak moderat pada skala tahunan dapat menghasilkan tekanan yang lebih nyata pada skala musiman dan pada segmen sungai tertentu. Dalam kerangka ini, masa depan layanan irigasi di Sub-DAS Bila tidak hanya ditentukan oleh berapa banyak air yang tersedia, tetapi juga oleh bagaimana perubahan lanskap dan iklim menggeser respons sistem secara spasial dan temporal.

Dari sisi penggunaan/tutupan lahan, proyeksi tahun 2036 memperlihatkan kecenderungan lanskap menunjukkan penurunan vegetasi alami atau semialami dan bergerak menuju mosaik agro-dominan. Hutan diproyeksikan menurun sebesar 810,76 ha atau 2,92 persen, sedangkan semak belukar menurun 642,89 ha atau 20,25%. Pada saat yang sama, pertanian lahan kering meningkat 682,87 ha atau 12,60%, pertanian lahan basah meningkat 728,45 ha atau 15,02%, dan permukiman/lahan terbangun meningkat 74,42 ha atau 16,54%. Arah perubahan ini menunjukkan bahwa ruang penyangga ekologis cenderung menyusut, sementara penggunaan/tutupan lahan budidaya dan terbangun semakin menguat. Konsekuensinya, sistem menjadi lebih

sensitif terhadap limpasan, pengangkutan sedimen, dan beban difus yang pada akhirnya memengaruhi kuantitas maupun kualitas air.

Dari sisi iklim, sinyal perubahan masa depan lebih menonjol pada kenaikan temperatur daripada perubahan presipitasi. Proyeksi menunjukkan bahwa T_{min} meningkat sekitar 0,34 °C dan T_{max} meningkat sekitar 0,45 °C, sedangkan presipitasi tahunan relatif tidak berubah secara drastis. Pola ini menegaskan bahwa tekanan masa depan lebih terlihat pada dinamika musiman daripada rerata tahunan. Kenaikan temperatur tersebut berimplikasi pada meningkatnya kebutuhan evaporatif, sehingga kebutuhan air tanaman cenderung bertambah walaupun total curah hujan tahunan tidak banyak bergeser. Dalam sistem irigasi, kondisi seperti ini dapat memperlebar mismatch antara pasokan dan kebutuhan pada bulan-bulan transisi yang sejak awal sudah rentan.

Dampak gabungan kedua penggerak tersebut terlihat pada tetap bertahannya kerentanan layanan irigasi pada horizon 2036. Meskipun sistem secara umum masih menunjukkan kondisi yang relatif memadai pada tingkat tahunan, indikator keandalan memperlihatkan bahwa masalah utama belum terselesaikan sepenuhnya. Nilai IRI pada proyeksi 2036 berada pada kisaran 0,75, yang menunjukkan bahwa kerentanan intra-musiman tetap berlangsung. Hal ini memperkuat temuan bahwa tekanan masa depan tidak terutama muncul sebagai krisis volume tahunan, melainkan sebagai penguatan kerentanan pada bulan-bulan kritis ketika kebutuhan meningkat, respons hidrologi belum pulih penuh, dan distribusi air menjadi lebih sensitif terhadap gangguan.

Pada saat yang sama, perubahan lanskap dan iklim juga memperkuat tekanan terhadap kualitas air, terutama di bagian tengah dan hilir. Salah satu sinyal yang paling jelas adalah turunnya DO minimum hingga 4,77 mg/L pada proyeksi 2036. Nilai ini menunjukkan bahwa margin keamanan kualitas air semakin menipis, sehingga sistem menjadi lebih rentan terhadap tambahan tekanan dari beban organik dan padatan tersuspensi. Dengan demikian, perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim tidak bekerja secara terpisah, tetapi saling memperkuat melalui kombinasi peningkatan kebutuhan evaporatif, perubahan respons hidrologi, dan penguatan beban difus di sepanjang aliran.

Secara umum, hal ini menegaskan bahwa adaptasi tidak dapat dirancang hanya sebagai respons terhadap satu sumber tekanan. Adaptasi harus dirancang sebagai respons gabungan terhadap perubahan lanskap dan iklim, karena keduanya secara simultan memengaruhi kuantitas air, keandalan layanan, dan kestabilan kualitas air. Dalam konteks Sub-DAS Bila, kebutuhan adaptasi menjadi semakin jelas bukan karena sistem kehilangan seluruh kapasitasnya, tetapi karena sistem menghadapi tekanan yang makin kompleks pada titik-titik kritisnya, baik dalam dimensi waktu maupun ruang.

6.5. Signifikansi integratif model pengelolaan sistem dinamik

Model sistem dinamik pada penelitian ini merupakan puncak sintesis dari seluruh analisis sebelumnya. Diagnosis mengenai ketidakselarasan pasokan dan kebutuhan air, kerentanan bulan-bulan kritis, serta tekanan kualitas air yang berkembang secara spasial diterjemahkan ke dalam variabel kebijakan yang dapat diuji secara operasional. Dengan cara ini, hasil dari analisis hidrologi, kebutuhan irigasi, dan kualitas air tidak berhenti

sebagai temuan diagnosis, tetapi diubah menjadi dasar untuk membandingkan alternatif intervensi pengelolaan.

Signifikansi penting dari pendekatan ini terletak pada kemampuannya menghubungkan bukti proses dengan pilihan kebijakan yang konkret. Pada kondisi dasar, sistem menunjukkan reliabilitas rata-rata sebesar 0,63 dengan 115 bulan defisit, sehingga menegaskan bahwa persoalan utama memang berada pada layanan yang belum stabil secara intra-musiman. Kondisi ini sejalan dengan pembahasan sebelumnya bahwa tekanan sistem tidak terutama ditentukan oleh kekurangan air absolut tahunan, tetapi oleh kegagalan layanan yang berulang pada waktu-waktu kritis. Melalui model sistem dinamik, kerentanan tersebut kemudian dapat dibaca bersama-sama dengan konsekuensinya terhadap hasil produksi dan kebutuhan dukungan pengelolaan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa paket terpadu merupakan skenario yang paling efektif. Pada skenario ini, reliabilitas meningkat dari 0,63 menjadi 0,76, sedangkan jumlah bulan defisit turun dari 115 menjadi 75 bulan. Defisit kumulatif juga menurun sebesar 45,26%, yang menunjukkan bahwa intervensi tidak hanya mengurangi frekuensi gangguan, tetapi juga menekan besaran tekanan layanan secara keseluruhan. Pada saat yang sama, hasil produksi ikut membaik, dengan *Yield actual* meningkat dari 6,99 menjadi 7,40 ton/ha/musim, dan pendapatan kumulatif meningkat sebesar 5,87%. Temuan ini menunjukkan bahwa perbaikan layanan irigasi dapat diterjemahkan menjadi manfaat produksi dan ekonomi yang nyata.

Keunggulan paket terpadu muncul karena intervensi ini menutup beberapa simpul kendali secara bersamaan, yaitu pasokan efektif, pengendalian permintaan, dan tata kelola distribusi. Dengan demikian, perbaikan yang dihasilkan tidak bergantung pada satu tuas kebijakan saja, melainkan pada kombinasi instrumen yang saling memperkuat. Hal ini sekaligus menjelaskan mengapa intervensi tunggal cenderung menghasilkan perbaikan yang lebih terbatas, karena hanya menyentuh sebagian mekanisme yang membentuk kinerja layanan.

Namun demikian, peningkatan layanan tidak berlangsung tanpa konsekuensi. Skenario terbaik juga menunjukkan bahwa perbaikan reliabilitas memerlukan penguatan dukungan pengelolaan, yang tercermin pada kenaikan *OM_index* menjadi 130,00. Dengan kata lain, ada *cost of governance* yang harus diterima apabila sistem ingin mencapai layanan yang lebih andal dan lebih produktif. Konsekuensi ini realistis, karena peningkatan kinerja irigasi pada akhirnya memerlukan operasi, pemeliharaan, koordinasi, dan kepatuhan distribusi yang lebih kuat daripada kondisi dasar.

Secara keseluruhan, hal ini menegaskan bahwa hasil ilmiah penelitian berhasil diterjemahkan menjadi alternatif kebijakan operasional yang dapat dibandingkan secara langsung. Kekuatan model sistem dinamik bukan semata pada kemampuannya mensimulasikan skenario, tetapi pada kemampuannya menunjukkan bahwa kebijakan terbaik adalah kebijakan yang mampu mengurangi risiko layanan, meningkatkan *outcome* produksi, dan sekaligus mengakui kebutuhan nyata akan penguatan O&M dan tata kelola.

6.6. Implikasi ilmiah, praktis, dan kebijakan

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa persoalan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila tidak dapat dipahami secara memadai apabila kuantitas air, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, dan respons pengelolaan dibaca secara terpisah. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada kemampuannya menyatukan seluruh komponen tersebut ke dalam satu kerangka analisis yang menjaga keterlacakan dari diagnosis kondisi eksisting, proyeksi perubahan, hingga evaluasi alternatif kebijakan. Dengan kerangka tersebut, penelitian ini tidak hanya menjelaskan di mana masalah terjadi, tetapi juga mengapa masalah muncul, kapan risiko menjadi paling tinggi, serta intervensi apa yang paling relevan untuk menurunkannya.

Secara ilmiah, penelitian ini memperkuat argumen bahwa kinerja pengelolaan air irigasi pada sistem sawah berbasis DAS lebih tepat dievaluasi melalui keterhubungan antara pasokan air, kebutuhan air tanaman, mutu air sungai, dan mekanisme respons pengelolaan. Dalam konteks ini, integrasi SWAT, CROPWAT, QUAL2Kw, CA-ANN, CMIP6, dan sistem dinamik bukan sekadar penggabungan beberapa model, melainkan suatu linked modeling chain yang memungkinkan perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim ditelusuri hingga ke perubahan keandalan layanan, tekanan kualitas air, dan outcome produksi. Nilai penting pendekatan ini terletak pada kemampuannya menjembatani hubungan antara proses biofisik dan keputusan manajerial secara lebih operasional. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini bukan hanya pada penyusunan model yang terintegrasi, tetapi pada pembuktian bahwa keterlacakan dari diagnosis ke kebijakan dapat dibangun secara sistematis dalam satu kerangka penelitian.

Selain itu, penelitian ini menegaskan pentingnya evaluasi pada skala intra-musiman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa surplus air tahunan tidak otomatis menghasilkan layanan irigasi yang andal, karena kerentanan utama justru muncul pada saat pasokan dan kebutuhan tidak selaras pada bulan-bulan tertentu. Pada kondisi eksisting, nilai *IRI* sebesar 0,75 dan *IDS* sebesar 106,12 mm menunjukkan bahwa sistem masih menghadapi defisit yang bermakna secara operasional. Pada horizon 2036, nilai *IRI* menurun menjadi sekitar 0,75 dan *IDS* meningkat menjadi 122,12 mm, yang mengindikasikan bahwa tekanan masa depan lebih tampak pada dinamika musiman daripada pada perubahan rerata tahunan. Temuan ini memperluas cara pandang evaluasi irigasi yang selama ini sering terlalu bertumpu pada ketersediaan air agregat, dengan menekankan bahwa frekuensi, besaran, dan intensitas defisit harus dibaca secara bersama-sama melalui indikator seperti *IRI*, *IDS*, *Deficit*, *WSI*, dan *FR*.

Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan arah yang jelas mengenai prioritas implementasi di lapangan. Prioritas pertama adalah target waktu, yaitu bulan-bulan kritis April, Oktober, dan November, karena pada periode tersebut *mismatch* antara pasokan dan kebutuhan paling konsisten memunculkan defisit layanan. Prioritas kedua adalah target ruang, yaitu segmen tengah hingga hilir sungai, karena bagian inilah yang menunjukkan gradien degradasi kualitas air paling nyata. Penurunan DO dari 8,96 mg/L di bagian hulu menjadi 5,48 mg/L di bagian hilir pada kondisi eksisting, serta turunnya DO minimum menjadi 4,77 mg/L pada proyeksi 2036, menegaskan bahwa status layak secara regulatif tetap memerlukan kewaspadaan operasional. Dalam konteks yang

sama, peningkatan ISS hingga 14,08 mg/L pada kondisi eksisting dan 16,82 mg/L pada horizon 2036 menunjukkan bahwa kualitas air tidak hanya berkaitan dengan aspek ekologis sungai, tetapi juga dengan risiko sedimentasi, penurunan kapasitas saluran, dan peningkatan kebutuhan operasi serta pemeliharaan jaringan irigasi.

Implikasi praktis berikutnya adalah perlunya sistem monitoring minimum yang tidak berhenti pada satu kelompok indikator saja. Pengelolaan yang efektif harus menghubungkan indikator layanan, indikator kualitas, dan indikator *outcome* produksi dalam satu kerangka pemantauan. Pada sisi layanan, indikator seperti reliabilitas, defisit, *FR*, dan *WSI* diperlukan untuk membaca performa distribusi air secara langsung. Pada sisi kualitas, indikator seperti DO minimum, COD atau CBOD_f, dan ISS pada segmen prioritas dapat berfungsi sebagai *early warning* terhadap memburuknya kondisi operasional. Sementara itu, pada sisi *outcome*, hasil panen, produksi total, dan pendapatan tetap penting dipertahankan sebagai indikator akhir untuk memastikan bahwa perbaikan pengelolaan benar-benar bermakna bagi keberlanjutan sistem pangan.

Secara kebijakan, penelitian ini menunjukkan bahwa intervensi tunggal tidak cukup untuk menjawab kompleksitas persoalan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila. Evaluasi sistem dinamik memperlihatkan bahwa paket terpadu merupakan arah kebijakan yang paling rasional karena mampu menutup beberapa simpul kendali secara bersamaan, yaitu pasokan efektif, pengendalian permintaan, serta tata kelola distribusi. Hal ini tercermin dari peningkatan reliabilitas dari 0,63 pada skenario baseline menjadi 0,76 pada skenario terpadu, penurunan jumlah bulan defisit dari 115 menjadi 75 bulan, serta penurunan defisit kumulatif sebesar 45,26 persen. Namun, hasil yang lebih baik tersebut tidak diperoleh tanpa konsekuensi. Peningkatan layanan juga menuntut kenaikan dukungan pengelolaan, yang dalam penelitian ini tercermin pada peningkatan *OM_index* hingga 130,00. Artinya, kebijakan yang efektif harus dirancang bukan hanya untuk meningkatkan layanan, tetapi juga untuk menjamin kesiapan operasi, pemeliharaan, dan penguatan tata kelola agar manfaatnya dapat dipertahankan dalam jangka menengah dan panjang.

Dengan demikian, arah kebijakan yang paling relevan bukan sekadar memilih intervensi teknis tertentu, melainkan membangun strategi adaptasi yang berbasis target ruang dan target waktu, serta dipantau melalui indikator kinerja yang terintegrasi. Dalam kerangka tersebut, Tabel 20 merangkum sintesis temuan utama, makna risiko, implikasi kebijakan, dan indikator monitoring minimum yang perlu diprioritaskan dalam pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila.

Tabel 20. Sintesis temuan lintas bab dan implikasi kebijakan pengelolaan irigasi Sub-DAS Bila

Komponen sintesis	Temuan kunci	Makna utama	Implikasi kebijakan	Indikator monitoring minimum
Kuantitas air dan layanan irigasi pada kondisi eksisting	Sistem menunjukkan surplus air tahunan, tetapi keandalan layanan belum penuh. Nilai IRI sebesar 0,75 dan IDSI sebesar 106,12 mm menegaskan adanya kerentanan intra-	Risiko utama bukan kekurangan air absolut tahunan, tetapi ketidakselarasan temporal antara pasokan dan kebutuhan.	Intervensi harus diarahkan pada bulan kritis melalui pengaturan distribusi, pengendalian permintaan, dan penyesuaian operasi jaringan.	IRI, IDSI, Deficit bulanan, FR, WSI, jumlah bulan defisit

	musiman yang berulang pada April, Oktober, dan November.			
Kualitas air sungai dan keberlanjutan layanan	Mutu air masih layak secara regulatif, tetapi menunjukkan gradien degradasi menuju tengah dan hilir. DO menurun dari 8,96 mg/L di hulu menjadi 5,48 mg/L di hilir, sementara ISS hilir mencapai 14,08 mg/L.	Status layak tidak identik dengan aman secara operasional. Penurunan DO menandakan penipisan margin keamanan, sedangkan ISS menunjukkan risiko fisik dan peningkatan kebutuhan O&M.	Pengelolaan perlu memprioritaskan segmen tengah dan hilir sebagai hotspot pengawasan dan pengendalian beban.	DO minimum, COD atau CBODf, ISS atau TSS, segmen prioritas, frekuensi pemeliharaan
Perubahan penggunaan lahan dan iklim sebagai penggerak sistem	Lanskap bergerak menuju mosaik agro-dominan melalui penurunan hutan dan semak belukar serta peningkatan pertanian dan lahan terbangun. Sinyal iklim lebih kuat pada kenaikan temperatur, dengan Tmin naik 0,34 °C dan Tmax naik 0,45 °C, sementara presipitasi relatif stabil.	LULC dan iklim bukan variabel tambahan, tetapi penggerak sistem yang memperkuat tekanan melalui peningkatan kebutuhan evaporatif, perubahan respons hidrologi, dan penguatan beban difus.	Adaptasi harus diposisikan sebagai respons gabungan terhadap perubahan lanskap dan iklim, bukan sebagai respons sektoral yang berdiri sendiri.	Perubahan LULC, Tmin, Tmax, kebutuhan irigasi, IRI, IDSI
Risiko masa depan pada horizon 2036	Kerentanan intra-musiman tetap bertahan pada April, Oktober, dan November. Nilai IRI sekitar 0,75 dan IDSI sebesar 122,12 mm menunjukkan peningkatan tekanan layanan. Pada saat yang sama, DO minimum turun menjadi 4,77 mg/L dan ISS hilir meningkat menjadi 16,82 mg/L.	Tekanan masa depan lebih nyata pada dinamika musiman dan penipisan margin kualitas daripada pada rerata tahunan.	Kebijakan adaptasi harus menjaga keandalan layanan pada bulan kritis sekaligus menahan degradasi kualitas pada segmen prioritas.	IRI, IDSI, DO minimum, ISS hilir, bulan kritis, status mutu air
Sintesis kebijakan sistem dinamik	Paket terpadu menghasilkan kinerja terbaik dengan peningkatan reliabilitas dari 0,63 menjadi 0,76, penurunan bulan defisit dari 115 menjadi 75, dan penurunan defisit kumulatif sebesar 45,26 persen.	Paket terpadu paling efektif karena menutup beberapa simpul kendali secara bersamaan, bukan hanya memperbaiki satu aspek sistem.	Arah kebijakan paling rasional adalah paket terpadu yang menggabungkan pasokan efektif, demand management, dan penguatan tata kelola.	Reliabilitas, Deficit kumulatif, FR, WSI, hasil panen, produksi, pendapatan
Trade-off pengelolaan	Peningkatan layanan pada skenario terpadu diikuti kenaikan kebutuhan dukungan pengelolaan dengan OM_index mencapai 130,00.	Perbaikan layanan memiliki konsekuensi realistis berupa peningkatan kebutuhan O&M dan penguatan kelembagaan.	Implementasi kebijakan perlu bertahap, realistis, dan didukung pembiayaan serta tata kelola yang memadai.	OM_index, biaya O&M, kepatuhan distribusi, stabilitas layanan
Kontribusi utama penelitian	Penelitian membangun linked modeling chain yang menjaga keterlacakan dari perubahan LULC dan iklim menuju keandalan layanan, kualitas air, dan outcome produksi.	Kontribusi utama terletak pada keterlacakan dari diagnosis ke kebijakan, bukan hanya pada penggunaan banyak model.	Monitoring minimum harus menghubungkan indikator layanan, kualitas, dan outcome produksi dalam satu kerangka evaluasi.	Dashboard terpadu berisi indikator layanan, kualitas air, produksi, dan dukungan pengelolaan

Secara keseluruhan, sintesis tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila perlu diarahkan pada strategi yang terintegrasi, bertahap, dan berbasis target ruang serta target waktu. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada kemampuannya menunjukkan bahwa diagnosis hidrologi, kebutuhan irigasi, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, dan respons kebijakan dapat dihubungkan secara langsung dalam satu kerangka yang operasional. Dengan demikian, adaptasi yang relevan bukan hanya adaptasi yang menambah pasokan, tetapi adaptasi yang mampu menjaga keandalan layanan pada bulan-bulan kritis, mempertahankan margin keamanan kualitas air pada segmen prioritas, dan secara simultan menopang keberlanjutan produksi pangan.

6.7. Keterbatasan penelitian dan arah pengembangan lanjut

Penelitian ini telah membangun kerangka analisis yang terintegrasi dan menjaga keterlacakan dari diagnosis kondisi eksisting, proyeksi perubahan, hingga evaluasi kebijakan. Meskipun demikian, beberapa keterbatasan tetap perlu dinyatakan agar interpretasi hasil dilakukan secara proporsional. Keterbatasan tersebut terutama terkait representasi dinamika musiman penuh, perilaku adaptif sistem, dan penyederhanaan pada beberapa komponen ekonomi serta kebijakan.

Pada aspek kualitas air, proyeksi kondisi masa depan masih didasarkan pada pendekatan *snapshot* pada kondisi representatif tertentu, sehingga belum sepenuhnya menangkap variasi musiman yang lebih luas, termasuk kemungkinan tekanan kualitas air pada periode ekstrem di luar kondisi yang dimodelkan. Konsekuensinya, hasil proyeksi kualitas air lebih tepat dibaca sebagai indikasi arah perubahan dan penajaman lokasi risiko, bukan sebagai representasi lengkap seluruh dinamika temporal sungai sepanjang tahun. Keterbatasan ini penting dicatat karena stabilitas layanan irigasi pada praktiknya dipengaruhi oleh interaksi antara debit, beban pencemar, dan kondisi hidraulik yang dapat berubah antar-musim.

Pada aspek iklim dan penggunaan/tutupan lahan, pendekatan koreksi iklim yang digunakan telah memadai untuk menjaga konsistensi dan keterlacakan skenario, tetapi belum memodelkan perubahan variabilitas dan kejadian ekstrem harian secara eksplisit. Demikian pula, proyeksi penggunaan/tutupan lahan tahun 2036 masih merepresentasikan kecenderungan *business as usual*, sehingga belum memasukkan kemungkinan perubahan spasial yang dipicu oleh intervensi kebijakan konservasi, perubahan infrastruktur, atau pengendalian tata ruang yang lebih kuat. Dengan demikian, tekanan masa depan yang digambarkan dalam penelitian ini perlu dipahami sebagai lintasan yang masuk akal berdasarkan kecenderungan saat ini, bukan sebagai satu-satunya kemungkinan masa depan.

Pada aspek sistem dinamik, kualitas air belum dimasukkan sebagai pembatas aktif yang secara langsung memengaruhi kinerja layanan dalam model kebijakan, sehingga hubungan antara degradasi mutu air, kapasitas operasional jaringan, dan *outcome* produksi belum sepenuhnya dimodelkan secara endogen. Selain itu, kalender tanam dalam simulasi belum dibuat adaptif antar-tahun, padahal dalam praktik lapangan penyesuaian waktu tanam merupakan salah satu respons penting terhadap

ketidakpastian pasokan air. Pada sisi ekonomi, evaluasi masih menggunakan pendekatan yang disederhanakan melalui harga gabah yang dibuat konstan dan proksi dukungan pengelolaan dalam bentuk indeks, sehingga belum sepenuhnya menangkap variasi biaya riil operasi dan pemeliharaan, biaya input budidaya, maupun dinamika pasar yang dapat memengaruhi hasil akhir kebijakan.

Meskipun memiliki keterbatasan tersebut, kerangka penelitian ini tetap kuat untuk evaluasi kebijakan karena dibangun di atas konsistensi lintas-model dan keterhubungan yang jelas antara perubahan biofisik dan respons pengelolaan. Kekuatan utama penelitian ini terletak pada kemampuannya menunjukkan bahwa persoalan layanan irigasi di Sub-DAS Bila tidak dapat dijelaskan hanya oleh satu komponen, melainkan oleh interaksi antara pasokan air, kebutuhan air, kualitas air, perubahan lanskap, sinyal iklim, dan kapasitas tata kelola. Oleh karena itu, keterbatasan yang ada lebih tepat dipandang sebagai ruang pengembangan untuk meningkatkan realisme model, bukan sebagai kelemahan yang meniadakan validitas temuan utama penelitian.

Arah pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada lima hal. Pertama, mengintegrasikan kualitas air sebagai pembatas aktif dalam model sistem dinamik, sehingga pengaruh degradasi mutu air terhadap reliabilitas layanan, kebutuhan pemeliharaan, dan produksi dapat dianalisis secara lebih menyatu. Kedua, mengembangkan kalender tanam adaptif yang dapat berubah antar-tahun sesuai kondisi pasokan air dan risiko musiman. Ketiga, menyusun skenario spasial berbasis kebijakan, terutama yang terkait dengan konservasi tutupan lahan, rehabilitasi area prioritas, dan pengendalian sumber beban difus pada subwilayah yang paling berpengaruh terhadap segmen tengah dan hilir. Keempat, memperluas evaluasi ke skenario multi-horizon agar arah perubahan jangka menengah dan jangka panjang dapat dibandingkan secara lebih sistematis. Kelima, menyempurnakan evaluasi biaya-manfaat dengan memasukkan struktur biaya operasi dan pemeliharaan yang lebih riil, respons petani, serta kemungkinan perubahan harga dan insentif kebijakan.

Dengan demikian, arah pengembangan penelitian selanjutnya adalah memperdalam integrasi antar-komponen dan meningkatkan realisme kebijakan tanpa meninggalkan prinsip keterlacakan yang telah menjadi kekuatan utama penelitian ini. Pendekatan tersebut akan memperkuat kapasitas model sebagai alat bantu pengambilan keputusan, sekaligus membuka ruang bagi evaluasi pengelolaan sumber daya air lahan sawah yang semakin adaptif, operasional, dan relevan terhadap tantangan masa depan.

BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan Umum

Berdasarkan keseluruhan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menghasilkan kerangka pengelolaan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS yang terintegrasi, dengan keterlacakan analisis yang terjaga dari diagnosis kondisi eksisting, proyeksi perubahan penggunaan/tutupan lahan dan iklim, hingga evaluasi alternatif kebijakan. Integrasi SWAT, CROPWAT, QUAL2Kw, CA-ANN, CMIP6, dan model sistem dinamik memungkinkan keterkaitan antara kuantitas air, kualitas air, dinamika lanskap, dan kinerja layanan irigasi dijelaskan secara konsisten dalam satu sistem analisis. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini tidak hanya terletak pada penggunaan multi-model, tetapi pada kemampuannya membangun hubungan yang jelas antara diagnosis biofisik dan pilihan kebijakan yang operasional.
2. Pada kondisi eksisting, pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila menunjukkan bahwa persoalan utama bukan terletak pada kekurangan air tahunan, melainkan pada ketidakselarasan intra-musiman antara pasokan dan kebutuhan irigasi. Meskipun hasil air tahunan mencapai 1.882,03 mm dan kebutuhan irigasi tahunan sebesar 765,33 mm, sistem masih mengalami defisit berulang pada April, Oktober, dan November, yang tercermin pada nilai $IRI = 0,75$ dan $IDSi = 106,12$ mm. Temuan ini menegaskan bahwa keandalan layanan irigasi lebih ditentukan oleh ketepatan waktu pasokan daripada oleh besarnya surplus air tahunan.
3. Kondisi kualitas air sungai di Sub-DAS Bila secara umum masih layak untuk mendukung irigasi, tetapi menunjukkan gradien degradasi yang jelas dari hulu ke hilir sehingga tidak seluruh segmen memiliki tingkat keamanan operasional yang sama. Penurunan DO dari 8,96 mg/L di hulu menjadi 5,48 mg/L di hilir, disertai peningkatan beban organik (CBOD_f 1,44 menjadi 4,64 mg/L; COD 2,00 menjadi 13,95 mg/L) dan padatan tersuspensi (ISS 3,18 menjadi 14,08 mg/L), menunjukkan bahwa segmen tengah hingga hilir merupakan prioritas pengelolaan. Temuan ini menegaskan bahwa kualitas air harus dipahami bukan hanya berdasarkan status kelayakan regulatif, tetapi juga berdasarkan implikasinya terhadap kestabilan layanan irigasi dan kebutuhan operasi–pemeliharaan jaringan.
4. Proyeksi tahun 2036 menunjukkan bahwa tekanan masa depan terhadap sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila tetap nyata, terutama sebagai akibat kombinasi perubahan penggunaan/tutupan lahan dan perubahan iklim. Perubahan lanskap menunjukkan penurunan vegetasi alami dan semialami (hutan -810,76 ha; semak belukar -642,89 ha), dan bergerak menuju mosaik agro-dominan (pertanian lahan kering +682,87 ha, pertanian lahan basah +728,45 ha, dan permukiman/lahan terbangun +74,42 ha), disertai kenaikan temperatur ($\Delta T_{min} +0,34$ °C; $\Delta T_{max} +0,45$ °C), tidak terutama mendorong sistem ke arah kekurangan air tahunan, tetapi memperkuat kerentanan intra-musiman dan menipiskan margin keamanan kualitas air pada segmen prioritas. Hal ini tercermin dari tetap munculnya defisit pada bulan-bulan kritis dengan nilai IRI sekitar 0,75 dan $IDSi$ 122,12 mm, serta penurunan DO minimum

hingga 4,77 mg/L pada skenario 2036. Temuan ini menunjukkan bahwa adaptasi harus dirancang sebagai respons gabungan terhadap perubahan lanskap dan iklim, dengan fokus pada dinamika musiman, pengendalian beban difus, dan perlindungan segmen tengah hingga hilir.

5. Model sistem dinamik menunjukkan bahwa peningkatan keandalan layanan irigasi di Sub-DAS Bila paling efektif dicapai melalui paket kebijakan terpadu yang menggabungkan perbaikan pasokan efektif, pengendalian permintaan, dan penguatan tata kelola distribusi. Dibandingkan kondisi dasar, skenario terpadu memberikan perbaikan kinerja yang paling konsisten, yang tercermin dari kenaikan reliabilitas dari 0,63 menjadi 0,76, penurunan jumlah bulan defisit dari 115 menjadi 75, serta penurunan defisit kumulatif sebesar 45,26%. Perbaikan layanan tersebut juga diikuti oleh peningkatan hasil produksi, dengan *Yield_actual* mencapai 7,40 ton/ha/musim. Namun, manfaat tersebut memerlukan konsekuensi realistik berupa peningkatan kebutuhan operasi, pemeliharaan, dan dukungan tata kelola, yang dalam penelitian ini tercermin pada *OM_index* sebesar 130,00. Temuan ini menegaskan bahwa intervensi tunggal tidak cukup untuk menjawab kompleksitas persoalan air lahan sawah, sehingga arah kebijakan yang paling rasional adalah pengelolaan terpadu yang operasional, bertahap, dan didukung kelembagaan yang memadai.
6. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila harus bergeser dari orientasi kecukupan air tahunan menuju orientasi keandalan layanan irigasi berbasis DAS yang mampu menjamin ketepatan waktu pasokan, menjaga margin keamanan kualitas air, dan merespons tekanan perubahan penggunaan/tutupan lahan serta iklim secara adaptif. Dengan demikian, pengelolaan yang andal tidak dapat dibangun melalui pendekatan parsial, melainkan harus mengintegrasikan kuantitas air, kualitas air, dinamika lanskap, sinyal iklim, dan tata kelola distribusi dalam satu kerangka kebijakan yang saling terhubung. Inilah jawaban utama penelitian ini terhadap kebutuhan pengelolaan Sub-DAS Bila, yaitu bahwa keberlanjutan layanan irigasi dan ketahanan produksi pangan lebih efektif dicapai melalui pendekatan terpadu, keterlacakan analisis dari diagnosis ke kebijakan, serta penguatan operasi, pemeliharaan, dan kelembagaan secara berkelanjutan.

7.2. Saran

Adapun saran yang direkomendasikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengelolaan sumber daya air lahan sawah di Sub-DAS Bila perlu diarahkan pada penerapan paket kebijakan terpadu yang menggabungkan peningkatan pasokan efektif, pengendalian permintaan air di tingkat lahan, serta penguatan tata kelola distribusi. Arah ini dipandang paling rasional karena persoalan utama sistem tidak terletak pada kekurangan air tahunan, tetapi pada ketidakandalan layanan pada periode tertentu. Oleh sebab itu, perencanaan dan implementasi kebijakan sebaiknya tidak lagi dilakukan secara parsial, melainkan disusun dalam satu kerangka pengelolaan berbasis DAS yang menghubungkan aspek kuantitas air, kualitas air, perubahan penggunaan/tutupan lahan, perubahan iklim, dan kelembagaan irigasi.

2. Prioritas operasional pengelolaan perlu difokuskan pada bulan-bulan kritis April, Oktober, dan November, karena pada periode tersebut ketidakselarasan antara pasokan dan kebutuhan air paling konsisten memunculkan defisit layanan. Pada bulan-bulan ini, strategi yang direkomendasikan meliputi pengaturan distribusi air yang lebih responsif, peningkatan efisiensi penyaluran, pengurangan tekanan kebutuhan di tingkat petani, serta penguatan aturan alokasi air agar reliabilitas layanan dapat ditingkatkan secara nyata pada jendela waktu yang paling menentukan keberhasilan musim tanam.
3. Pengelolaan kualitas air perlu diprioritaskan pada segmen tengah dan hilir sungai sebagai wilayah yang menunjukkan kecenderungan penurunan margin keamanan kualitas air dan peningkatan beban padatan tersuspensi. Pemantauan rutin sebaiknya menempatkan DO minimum dan ISS atau TSS sebagai indikator utama, karena keduanya paling relevan untuk membaca risiko operasional terhadap sedimentasi, kapasitas saluran, dan kebutuhan operasi serta pemeliharaan jaringan irigasi. Dengan demikian, pengelolaan kualitas air tidak hanya berfungsi menjaga status mutu sungai, tetapi juga menopang keberlanjutan layanan irigasi.
4. Penguatan operasi dan pemeliharaan perlu ditempatkan sebagai bagian inti dari kebijakan, bukan sebagai kegiatan pendukung yang berdiri sendiri. Peningkatan keandalan layanan yang dihasilkan oleh paket kebijakan terpadu akan sulit dipertahankan tanpa dukungan pembiayaan O&M yang memadai, monitoring distribusi yang konsisten, serta penguatan peran kelembagaan pengguna air. Karena itu, pemerintah daerah dan pengelola irigasi perlu menyiapkan mekanisme pendanaan, pengawasan, dan koordinasi kelembagaan yang mampu menjaga keberlanjutan manfaat kebijakan dalam jangka menengah dan panjang.
5. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperdalam integrasi antar-komponen model melalui beberapa pengembangan, yaitu memasukkan kualitas air sebagai pembatas aktif dalam model sistem dinamik, menyusun kalender tanam adaptif antar-tahun, mengembangkan skenario spasial berbasis kebijakan konservasi dan pengendalian beban difus, serta menyempurnakan analisis ekonomi dengan memasukkan biaya O&M riil, biaya rehabilitasi, dan kemungkinan dinamika harga. Pengembangan tersebut penting agar model pengelolaan yang dihasilkan semakin realistis, adaptif, dan kuat sebagai dasar perencanaan kebijakan sumber daya air lahan sawah berbasis DAS.