

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

Bab ini memaparkan tentang latar belakang masalah yang mencakup kebaruan penelitian dan posisi penelitian, rumusan masalah penelitian, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, definisi operasional variabel dan sistematika penulisan disertasi.

### **1.1 Latar Belakang Penelitian**

Ekologi merupakan salah satu disiplin ilmu yang penting dalam kajian biologi, dimana lingkup studinya mempelajari tentang interaksi timbal balik antara makhluk hidup dengan lingkungannya. Sebagai cabang ilmu yang mengkaji tentang adaptasi organisme, bertahan hidup, dan berkembang biak dalam berbagai kondisi lingkungan, ekologi memiliki peran kunci dalam memahami keseimbangan alam. Setiap makhluk hidup, mulai dari mikroorganisme hingga organisme kompleks seperti manusia, bergantung pada ekosistem yang menyediakan sumber daya vital, termasuk makanan, air, udara bersih, dan tempat tinggal. Hubungan timbal balik ini tidak hanya bersifat individual, tetapi juga melibatkan dinamika populasi, komunitas, dan ekosistem secara keseluruhan. Sebagai bagian dari ekosistem, manusia memiliki kontribusi yang sangat besar dalam memberi pengaruh terhadap perubahan kesetimbangan ekosistem. Keterkaitan organisme ini menyoroti dinamika populasi, komunitas, dan ekosistem sebagai satu kesatuan yang kohesif (Zhao *et al.*, 2018).

Saat ini, kehidupan manusia berada pada zaman *Anthropocene*, dimana pengaruh manusia terhadap bumi menjadi sangat signifikan sehingga dapat meninggalkan jejak yang dapat dideteksi dalam catatan geologi (Ghazoul, 2020). Aktivitas kehidupan manusia saat ini akan menjadi warisan permanen pada sistem Bumi di masa depan. Warisan yang sedang diukir saat ini mencakup hilangnya keanekaragaman hayati, perubahan iklim, peningkatan karbon atmosfer, pengasaman laut, pengendapan nitrogen, penyebaran spesies invasif, deforestasi, dan erosi tanah, yang semuanya mengubah struktur dan fungsi ekosistem untuk jangka panjang (Steffen *et al.*, 2015). Pada keadaan ini, pemahaman ekologi yang

dibangun di atas sistem masa lalu yang alami, masih mewariskan sistem yang stabil dan tidak terganggu, sehingga mampu memberikan panduan terbatas untuk pola dan hasil di masa depan. Studi tentang ekologi menjadi sangat relevan untuk menjaga keberlanjutan hidup planet bumi ditengah perubahan lingkungan global yang semakin cepat akibat dari aktivitas kehidupan manusia. Memahami prinsip-prinsip ekologi memungkinkan manusia untuk merancang strategi konservasi yang efektif, mengelola sumber daya alam secara berkelanjutan, dan mengurangi dampak negatif dari kegiatan manusia terhadap lingkungan, sehingga keseimbangan ekosistem dan keanekaragaman hayati tetap terjaga untuk generasi mendatang (Caswell *et al.*, 2019).

Perubahan lingkungan global yang semakin cepat telah menjadi salah satu isu paling penting pada abad 21. Percepatan ini disebabkan oleh kombinasi berbagai faktor, terutama aktivitas manusia yang mengganggu keseimbangan alam secara signifikan. Lajunya perubahan lingkungan global, dapat dilihat dengan jelas, salah satunya melalui fenomena pencemaran sungai, yang kini menjadi salah satu krisis lingkungan paling mendesak. Sungai, sebagai sumber air bersih dan penopang kehidupan bagi ekosistem darat dan perairan, kini menghadapi tekanan besar akibat aktivitas manusia yang tidak terkendali. Perubahan ini sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti industrialisasi yang pesat, pertumbuhan populasi, dan urbanisasi yang mendorong peningkatan limbah rumah tangga serta limbah industri yang masuk ke dalam aliran sungai (Love *et al.*, 2020). Limbah yang mengandung zat kimia berbahaya, seperti logam berat dari aktivitas pertambangan, industri, serta buangan organik dari pertanian dan perkotaan, mencemari sungai-sungai utama di berbagai daerah. Peningkatan pencemaran ini menyebabkan sungai kehilangan fungsinya sebagai sumber air bersih dan dapat mengancam kehidupan organisme yang bergantung pada ekosistem perairan tersebut. Akibatnya, kerusakan lingkungan yang terjadi tidak hanya mempengaruhi kualitas air, tetapi juga mempercepat perubahan lingkungan lokal yang berdampak pada kehidupan masyarakat sekitar (Aldwila, 2018).

Disisi lain, deforestasi yang terjadi di daerah tangkapan air turut memperparah masalah pencemaran sungai. Penebangan hutan secara besar-

besaran untuk membuka lahan pertanian, pemukiman, atau aktivitas industri mengakibatkan hilangnya fungsi alami hutan sebagai penyaring alami air dan pengatur aliran air di Daerah Aliran Sungai (DAS). Hutan yang sebelumnya berfungsi untuk menyerap air hujan dan mengurangi limpasan permukaan kini hilang, sehingga air hujan langsung mengalir ke sungai dengan membawa partikel-partikel tanah, sedimen, dan polutan lainnya (Zeilhofer *et al.*, 2018). Erosi tanah yang meningkat akibat hilangnya vegetasi ini menyebabkan sungai dipenuhi sedimen, mengurangi kualitas air dan mempercepat pendangkalan sungai (Rodríguez-Romero *et al.*, 2018). Kondisi ini tidak hanya mengancam ekosistem sungai, tetapi juga memicu banjir di hilir, serta mengurangi kapasitas penyimpanan air tanah yang penting untuk mendukung kehidupan masyarakat disekitarnya. Deforestasi yang terus berlanjut di sekitar daerah aliran sungai juga memperburuk kerusakan ekologis dan mempercepat laju pencemaran air sehingga upaya pemulihan dan pelestarian sungai menjadi semakin sulit (Degraf & Detzel, 2022).

Krisis pencemaran sungai semakin kompleks karena banyaknya sumber pencemar yang bekerja secara bersamaan dan saling memperparah dampak pencemaran itu sendiri. Sebagai contoh, dalam kasus pencemaran sungai akibat limbah tambang, zat beracun seperti merkuri dan sianida yang sering digunakan dalam proses ekstraksi emas dapat merembes ke dalam air sungai, mencemari seluruh ekosistem perairan (Chetty *et al.*, 2021). Selain itu, penggunaan pestisida dan pupuk kimia yang berlebihan di sektor pertanian juga berkontribusi terhadap pencemaran sungai yang dapat menyebabkan eutrofikasi, yakni pertumbuhan alga yang berlebihan akibat tingginya kandungan nutrisi, seperti nitrogen dan fosfor, dalam air (Temino-Boes *et al.*, 2019). Kondisi ini merusak ekosistem air, karena mengurangi kadar oksigen terlarut yang diperlukan oleh ikan dan organisme air lainnya untuk bertahan hidup (Jia *et al.*, 2019). Proses eutrofikasi juga dapat menciptakan zona mati di badan air, yang selanjutnya mengganggu kestabilan ekosistem perairan dan menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati (Jia *et al.*, 2019). Tidak hanya itu, limbah cair dari pabrik yang mengandung bahan kimia beracun turut memperparah pencemaran sungai dengan menyebabkan akumulasi

polutan dalam tubuh organisme perairan, yang kemudian bisa berdampak pada rantai makanan, termasuk manusia yang mengonsumsi ikan atau menggunakan air dari sungai tersebut. Kompleksitas krisis ini semakin diperburuk dengan minimnya pengelolaan limbah yang efektif dan lemahnya penegakan hukum lingkungan di banyak negara, yang membuat pencemaran sungai semakin sulit untuk dikendalikan (Li & Zhang, 2023).

Dampak dari pencemaran sungai tidak hanya terbatas pada degradasi lingkungan, tetapi juga berhubungan langsung dengan masalah kesehatan masyarakat dan keberlanjutan ekonomi. Pencemaran air sungai oleh logam berat dan bahan kimia berbahaya telah menyebabkan berbagai penyakit serius di kalangan masyarakat yang menggantungkan kebutuhan sehari-harinya pada sungai. Di beberapa wilayah, pencemaran sungai bahkan telah menyebabkan krisis air bersih, di mana akses masyarakat terhadap air yang aman dan layak menjadi sangat terbatas (Ahmed *et al.*, 2021). Krisis ini memerlukan pendekatan yang lebih sistematis dan terkoordinasi, dengan menekankan pentingnya literasi lingkungan di kalangan masyarakat sekitar sungai (Pernet-Coudrier *et al.*, 2012). Selain itu, penerapan konsep keberlanjutan dalam pengelolaan sumber daya air juga sangat penting, di mana eksploitasi dan pemanfaatan sungai harus dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan ekosistem untuk generasi mendatang (Goudarzi *et al.*, 2022).

Kegiatan penambangan emas merupakan salah satu kontributor utama dalam pencemaran sungai diberbagai negara, termasuk di Indonesia. Tingginya hasil produksi emas umumnya sejalan dengan besarnya limbah yang dihasilkan, terutama dalam penambangan emas skala besar maupun skala kecil. Proses penambangan emas, baik yang dilakukan oleh perusahaan besar maupun tambang rakyat, melibatkan teknik-teknik ekstraksi yang menghasilkan jumlah limbah yang sangat besar. Limbah ini terdiri dari tailing (sisa material setelah emas dipisahkan dari bijih), bahan kimia beracun seperti merkuri dan sianida, serta sedimen dan air limbah yang terkontaminasi (Tayebi-Khorami *et al.*, 2019). Dalam penambangan emas skala besar, proses ekstraksi emas sering menggunakan metode sianidasi, di mana bijih emas dihancurkan dan dicampur dengan sianida untuk melarutkan

emas. Proses ini menghasilkan limbah tailing dalam jumlah besar, yang harus disimpan dalam fasilitas khusus (Fu *et al.*, 2018). Data dari *World Gold Council* menunjukkan bahwa untuk setiap gram emas yang diperoleh, bisa dihasilkan beberapa ton limbah tailing (Tayebi-Khorami *et al.*, 2019; World Gold Council, 2024). Pada tahun 2018, penambangan emas di Grasberg, Papua, salah satu tambang emas terbesar di dunia, menghasilkan 240.000 ton tailing per hari. Tailing ini umumnya mengandung sianida, logam berat, dan zat beracun lainnya yang dapat mencemari air, tanah, dan ekosistem lokal jika tidak dikelola dengan benar (Tayebi-Khorami *et al.*, 2019).

Penggunaan zat kimia berbahaya seperti merkuri dan sianida untuk mengekstraksi atau amalgamasi emas dari bijih batuan merupakan praktik umum yang digunakan tidak hanya pada penambangan emas skala besar, tetapi juga dipraktikkan pada penambangan skala kecil, terutama di sektor penambangan rakyat. Merkuri digunakan untuk membentuk amalgam dengan emas, yang kemudian dipanaskan untuk memisahkan logam mulia tersebut. Proses ini menghasilkan limbah merkuri yang dilepaskan langsung ke lingkungan, terutama ke sungai dan tanah. Limbah beracun yang dihasilkan dari proses ini sering kali dibuang langsung ke sungai atau bocor ke perairan sekitarnya tanpa melalui pengolahan limbah yang memadai (Gibb & O'Leary, 2014; Vega *et al.*, 2018). Berbagai laporan menginformasikan bahwa merkuri sebagai bahan amalgamasi merupakan logam berat yang sangat beracun dan dapat terakumulasi dalam tubuh organisme perairan, termasuk ikan, dan kemudian masuk ke rantai makanan, yang pada akhirnya berisiko bagi kesehatan manusia yang mengonsumsi ikan yang terkontaminasi (Ashe, 2012; Gibb & O'Leary, 2014). Menurut laporan *Global Mercury Assessment 2018* dari UNEP, sektor pertambangan rakyat bertanggung jawab terhadap 37% emisi merkuri global (UN Environment, 2019; Vega *et al.*, 2018; Wickliffe *et al.*, 2021), dimana Indonesia menjadi penyumbang terbesar di dunia setelah China dan India (Fikri *et al.*, 2023). Setiap kilogram emas yang dihasilkan oleh tambang rakyat, bisa digunakan hingga 1,3 kilogram merkuri, yang sebagian besar berakhir sebagai limbah di lingkungan (Gibb & O'Leary, 2014; Vega *et al.*, 2018). Paparan merkuri yang berada di lingkungan berpotensi

merusak ekosistem sungai dan juga dapat menyebabkan keracunan serius bagi masyarakat sekitar yang bersentuhan dengan air tercemar atau menggunakan air sungai untuk kebutuhan sehari-hari (Gibb & O'Leary, 2014).

Selain pencemaran kimia, penambangan emas juga menyebabkan masalah sedimentasi yang signifikan di sungai. Ketika tanah digali dan lapisan batuan dihancurkan, partikel-partikel tanah dan sedimen terlepas ke dalam aliran sungai, menyebabkan air sungai menjadi keruh dan tercemar oleh bahan padat tersuspensi. Sedimentasi yang berlebihan mengurangi kualitas air, memperburuk kondisi ekosistem perairan, dan mengganggu kehidupan makhluk hidup yang bergantung pada sungai, seperti ikan dan organisme benthik (Coulibaly *et al.*, 2021; Dethier *et al.*, 2019). Selain itu, penggundulan hutan untuk kegiatan penambangan emas, dapat berkontribusi terhadap ketidakstabilan tepian sungai dan peningkatan erosi (De Lucia Lobo *et al.*, 2019). Di sisi lain, sedimentasi juga dapat menyebabkan pendangkalan sungai, meningkatkan risiko banjir di wilayah hilir selama musim hujan. Seiring dengan lajunya kegiatan deforestasi yang sering kali menyertai aktivitas penambangan emas, berdampak langsung pada kerusakan ekosistem sungai, sehingga pemulihan ekosistem dan pengelolaan sumber daya air menjadi tantangan besar bagi pemerintah dan masyarakat (Krisnayanti, 2018; Udodenko *et al.*, 2022). Pencemaran yang dihasilkan dari aktivitas penambangan emas, membutuhkan perhatian serius, solusi berkelanjutan yang melibatkan regulasi ketat, dan pemanfaatan teknologi pengolahan limbah yang lebih baik, serta peningkatan kesadaran lingkungan di kalangan penambang dan masyarakat sekitar, sangat dibutuhkan untuk mengatasi permasalahan ini (Agyarko *et al.*, 2014; Cai *et al.*, 2017).

Penambangan emas skala kecil atau *artisanal small-scale gold mining* (ASGM) di Indonesia telah menimbulkan dampak yang merusak bagi ekosistem sungai di berbagai wilayah, terutama melalui pencemaran merkuri yang dihasilkan. Daerah-Daerah seperti Bombana di Sulawesi Tenggara dan daerah lainnya seperti di Nusa Tenggara Barat, menjadi salah satu pusat dari aktivitas ASGM dengan kerusakan ekosistem sungai yang telah terdeteksi, dimana kerusakan tersebut meluas hingga ke bagian hilir sungai (Basri *et al.*, 2020;

Junaidi *et al.*, 2019). Catatan penelitian yang telah dilakukan, memberikan informasi bahwa aktivitas ASGM di daerah Bombana telah mengakibatkan kontaminasi merkuri yang sangat parah. Berdasarkan penelitian (Basri *et al.*, 2020), kadar merkuri dalam tanah di sekitar area penambangan di Bombana dapat mencapai 17,5 mg/kg, jauh melebihi ambang batas aman yang ditetapkan oleh standar internasional. Selain itu, Yoga *et al.* (2022) mencatat, sektor ASGM di Indonesia berkontribusi besar terhadap emisi merkuri global.

Penelitian yang dilakukan oleh Junaidi *et al.* (2019) tentang pencemaran merkuri di daerah Nusa Tenggara Barat, dari kegiatan ASGM, menunjukkan bahwa konsumsi ikan dari sungai-sungai yang telah terpapar merkuri di wilayah tersebut menimbulkan risiko kesehatan yang besar bagi masyarakat lokal. Ikan dan organisme lain yang hidup di perairan yang telah tercemar memiliki kandungan merkuri yang melebihi tingkat ambang batas kewajaran yaitu sebesar 0,5 µg/g. Hal ini mengindikasikan bahwa merkuri yang terakumulasi dalam jaringan organisme akuatik, ketika dikonsumsi oleh manusia, dapat menyebabkan gangguan kesehatan. Pencemaran merkuri ini berdampak tidak hanya pada organisme akuatik, tetapi juga pada kualitas air sungai itu sendiri. Merkuri dapat terakumulasi dalam sedimen sungai, di mana merkuri yang saat berada di alam, dapat terkonversi menjadi metilmerkuri yang merupakan bentuk merkuri yang lebih sederhana, dengan sifat dasarnya yaitu mudah diserap oleh organisme hidup. Gerson *et al.* (2018) mencatat bahwa beberapa sungai di Indonesia mengandung kadar merkuri total dan metilmerkuri dalam sedimen serta air sungai melebihi ambang batas aman untuk kesehatan ekosistem. Kondisi ini perlu mendapatkan perhatian, karena selain dampak kesehatan yang ditimbulkan oleh kontaminasi merkuri, kerusakan fisik pada ekosistem sungai akibat aktivitas ASGM juga memperburuk kondisi lingkungan di wilayah tersebut.

Selain pencemaran kimiawi, kerusakan fisik pada sistem sungai juga telah terdeteksi sebagai akibat dari penambangan emas skala kecil. Aktivitas tambang emas yang dilakukan di bantaran sungai sering kali menyebabkan erosi tanah yang parah, mengubah morfologi aliran sungai dan meningkatkan beban sedimen di dalam sungai. Penelitian oleh Dethier *et al.* (2023) menunjukkan bahwa kegiatan

ASGM telah meningkatkan beban sedimen di sungai-sungai tropis, yang menyebabkan degradasi habitat akuatik dan mengurangi kualitas air. Habitat-habitat penting bagi spesies ikan dan organisme air lainnya terganggu akibat sedimentasi berlebihan, sehingga mengancam keanekaragaman hayati pada ekosistem tersebut. Kerusakan ekosistem ini juga berimplikasi pada keanekaragaman hayati di sekitar sungai. Nur *et al.* (2021) mengungkapkan bahwa perubahan fisik pada sungai akibat sedimentasi yang berlebihan dan polusi merkuri telah mengurangi populasi spesies akuatik tertentu yang bergantung pada sungai untuk bertahan hidup. Hal ini mengarah pada degradasi ekosistem sungai secara keseluruhan, yang mengancam kemampuan sungai untuk mendukung kehidupan dan menyediakan sumber daya penting bagi manusia, seperti air bersih dan makanan.

Kasus pencemaran limbah tambang emas di Indonesia yang telah terdeteksi memberikan dampak bagi kesehatan masyarakat adalah pencemaran daerah aliran sungai Sekotong di Nusa Tenggara Barat. Praktik penambangan emas di daerah tersebut menggunakan merkuri tanpa kontrol, sehingga menyebabkan konsentrasi merkuri di air dan sedimen sungai melebihi ambang batas aman. Berdasarkan data Mongabay dan berbagai hasil kajian-kajian ilmiah yang dipublish dalam laporan Gubernur Nusa Tenggara Barat. Dimana laporan tersebut termuat di dalam Peraturan Gubernur Nomor 64 Tahun 2020, menginformasikan bahwa konsentrasi merkuri di perairan wilayah Sekotong telah mencapai tingkat yang melebihi batas aman yang ditetapkan oleh Badan Kesehatan Dunia (Gubernur Nusa Tenggara Barat, 2020; Rakhman, 2019). Ambang batas aman yang ditetapkan WHO untuk kandungan merkuri dalam air adalah 0,001 mg/L, sementara di beberapa titik di Sekotong, kandungan merkuri dalam air sungai yang tercemar ditemukan jauh melampaui angka ini. Dampak dari pencemaran ini terlihat jelas pada penurunan kualitas air dan kesehatan biota akuatik, dimana ikan yang tertangkap di sungai tersebut mengandung kadar merkuri yang signifikan, yang berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat lokal yang mengandalkan ikan sebagai sumber protein utama masyarakat (Alkatiri, 2023).

Penelitian tentang kandungan merkuri pada rambut masyarakat Sekotong, menunjukkan hasil yang mengkhawatirkan. Berdasarkan uji sampel rambut yang dilakukan pada penduduk di Sekotong oleh Balifokus dengan prosedur yang dikembangkan oleh IPEN (*International Pollutants Elimination Network*), kadar merkuri total (THg) ditemukan dalam semua sampel yang diuji. Rata-rata kandungan merkuri pada rambut masyarakat Sekotong adalah 3,63 ppm, dengan variasi antara 1,85 ppm hingga 6,05 ppm (Ismawati *et al.*, 2013). Angka ini melebihi ambang batas aman yang direkomendasikan oleh Badan Kesehatan Dunia (WHO), yang menetapkan ambang batas merkuri pada rambut sebesar 1 ppm. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa hampir semua sampel terpapar merkuri dalam jumlah yang signifikan. Tingginya konsentrasi merkuri pada rambut masyarakat Sekotong menandakan tingginya paparan logam berat terhadap lingkungan kehidupan masyarakat. Sumber utama merkuri dalam penelitian ini berasal dari aktivitas penambangan emas yang belum memiliki proses pengendalian yang memadai. Akumulasi merkuri merupakan hasil dari proses bioakumulasi dan biomagnifikasi melalui rantai makanan, terutama melalui konsumsi air dan ikan yang tercemar di wilayah tersebut.

Kasus pencemaran serupa juga berpotensi terjadi di Provinsi Jambi, khususnya di sepanjang Sungai Batanghari yang merupakan tulang punggung ekosistem daerah tersebut. ASGM di sepanjang Sungai Batanghari telah berlangsung selama beberapa dekade. Dalam beberapa tahun terakhir jumlahnya semakin meningkat. Pada tahun 2016 unit GIS KKI WARSI menemukan kerusakan di sepanjang alur sungai, sawah, kebun dengan luas perkiraan 27.822 Ha pada tiga Kabupaten di Provinsi Jambi. Kerusakan paling parah terdapat di Kabupaten Sarolangun dengan 13.762 Ha, Kabupaten Merangin 9.966 Ha dan Kabupaten Bungo seluas 4.094 Ha (Suprpto, 2018). Total luas bukaan ASGM pada tahun 2019 meningkat mencapai 33.832 Ha yang tersebar di 6 kabupaten. Sarolangun merupakan daerah dengan bukaan terluas yang mencapai 14.126 Ha dan disusul oleh Merangin dengan luas 12.349 Ha (KKI Warsi, 2019). Pada tahun 2023 tercatat 48.140 Ha lahan terbuka yang diindikasikan sebagai kawasan tambang emas. Berdasarkan jumlah tersebut, hanya 1.884 ha yang berada dalam

Wilayah Pertambangan Rakyat (WPR) sisanya 46.256 Ha berada di luar WPR atau illegal (KKI Warsi, 2024). KKI WARSI memprediksi kerugian negara yang diakibatkan oleh aktivitas ASGM pada tahun 2024 diperkirakan mencapai Rp. 2,5 Triliun. Kerugian ekonomi tidak hanya diterima oleh negara, namun kerugian yang diterima oleh masyarakat justru lebih besar akibat lingkungannya yang rusak dan tidak lagi nyaman untuk ditinggali (KKI Warsi, 2019). Penggunaan merkuri di sepanjang Sungai Batanghari untuk proses pengolahan emas telah meluas. Hasil uji laboratorium merkuri (Hg) dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Jambi menginformasikan, kandungan merkuri pada permukaan air Sungai di Daerah Batang Asai Hulu dan Hilir (Kabupaten Sarolangun) sebesar 0,003 mg, dan Sungai di daerah Batang Limun Hulu (Kabupaten Merangin) sebesar 0,005 mg, Sungai Batang Limun Hilir sebesar 0,004 mg. Angka ini telah melebihi standar baku mutu yang ditetapkan Gubernur Jambi pada tahun 2007, yaitu sebesar 0,002 Mg per liter (Suprayitno, 2019). Bahkan jauh melebihi standar WHO yang telah menetapkan batas kandungan merkuri dalam air 0,0001 ppm. Selain itu, laporan Badan Lingkungan Hidup Provinsi Jambi juga mencatat bahwa biota akuatik seperti ikan patin dan nila, yang merupakan komoditas penting bagi masyarakat lokal telah terpapar merkuri (Suprayitno, 2019).

Potensi dampak kesehatan dari pencemaran ini perlu ditanggapi dengan serius, terutama mengingat bahwa banyak penduduk yang tinggal di sepanjang Daerah Aliran Sungai Batanghari yang bergantung pada air sungai untuk kebutuhan sehari-hari. Selain dampak langsung terhadap kesehatan manusia, pencemaran merkuri juga berdampak pada keanekaragaman hayati pada ekosistem perairan Sungai Batanghari. Secara ekologis, kondisi ini dapat memicu ketidakseimbangan ekosistem, di mana spesies predator seperti burung air dan buaya, yang juga bergantung pada ikan sebagai sumber makanannya, ikut terdampak. Peningkatan konsentrasi merkuri dan kerusakan ekosistem ini akan terus berlanjut seiring dengan kebutuhan masyarakat terhadap tuntutan ekonomi yang mereka hadapi. Penelitian terbaru dari Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (WALHI) Jambi menyatakan bahwa jika pencemaran ini terus berlangsung tanpa

ada intervensi serius, maka dimasa yang akan datang, ekosistem perairan di Sungai Batanghari bisa mengalami kerusakan permanen (Mairiadi, 2023)

Lajunya kerusakan lingkungan memunculkan ketidakpastian tentang bagaimana populasi, komunitas, dan ekosistem akan merespons perubahan lingkungan yang semakin cepat. Namun para ilmuwan telah memprediksi bahwa ilmu ekologi akan terus berkembang seiring dengan pemanfaatan teknologi dalam berbagai metode dan praktek yang digunakan. Teknologi baru seperti satelit hingga perangkat lunak, telah meningkatkan kedalaman dan keluasan ilmu ekologi, dan memberikan peluang baru untuk melibatkan masyarakat secara langsung. Dalam konteks ini, *citizen science* muncul sebagai salah satu pendekatan partisipatif yang sangat efektif dalam menjembatani kolaborasi antara ilmuwan dan masyarakat. *Citizen science* mengacu pada partisipasi sukarela masyarakat dalam pengumpulan, pengelolaan, dan analisis data ilmiah, melalui proses bimbingan atau kolaborasi dari ilmuwan profesional (Aristeidou *et al.*, 2020). Konsep ini telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan meningkatnya kesadaran lingkungan dan aksesibilitas teknologi digital yang memungkinkan masyarakat umum untuk terlibat langsung dalam proyek-proyek penelitian ilmiah. Sebagai pendekatan partisipatif, *citizen science* menawarkan peluang bagi masyarakat untuk ikut serta dalam proses ilmiah secara aktif, terutama pada isu yang berkaitan langsung dengan lingkungan dan kehidupan sehari-hari (Lewandowski & Oberhauser, 2016).

*Citizen science* telah diakui sebagai metode ilmiah yang digunakan untuk pengumpulan dan analisis data oleh profesional (Silvertown, 2009). *Citizen science* dibentuk untuk membangun hubungan antara publik (sukarelawan, mahasiswa, para ahli dalam bidang yang sedang dikaji atau aktivis) yang mengumpulkan data dalam kemitraan dengan peneliti profesional dari Universitas, Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM), Entitas Pemerintah, dan Organisasi Nirlaba serta Masyarakat (Ruiz-Mallén *et al.*, 2016; Silvertown, 2009). Pendekatan *citizen science* menawarkan berbagai manfaat dan kelebihan yang signifikan dalam penelitian ekologi, terutama dalam isu-isu yang bersifat lokal seperti pencemaran sungai akibat aktivitas pertambangan. Penerapan *citizen*

*science* dalam kajian air termasuk penelitian yang relatif baru (Njue *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2018). Salah satu kelebihan utama dari pendekatan ini adalah kemampuannya untuk mengumpulkan data dalam skala besar dengan melibatkan peran serta masyarakat local (Dean *et al.*, 2018; Popa *et al.*, 2022). Masyarakat yang tinggal di sepanjang sungai dapat dilatih untuk memantau kualitas air, sedimen, serta biota perairan secara berkelanjutan. Hal ini sangat menguntungkan karena banyak dari daerah yang terdampak berada di lokasi terpencil atau sulit dijangkau secara reguler. Dengan keterlibatan masyarakat, proyek *citizen science* dapat menghasilkan data longitudinal yang meliputi periode waktu yang panjang dan area geografis yang luas, yang sangat penting untuk memantau tren jangka panjang pencemaran dan dampaknya terhadap ekosistem (Merenlender *et al.*, 2016; Pocock *et al.*, 2014). Pendekatan *citizen science* juga mampu meningkatkan kesadaran lingkungan di kalangan masyarakat lokal. Dengan berpartisipasi aktif dalam penelitian, masyarakat tidak hanya belajar tentang metode ilmiah, tetapi juga mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang dampak ekologis dari aktivitas pertambangan dan pencemaran yang mereka hadapi sehari-hari. Masyarakat yang terlibat dalam proyek-proyek *citizen science* sering kali menjadi lebih peduli terhadap lingkungan mereka dan terdorong untuk bertindak secara proaktif dalam upaya mitigasi pencemaran, seperti mengadvokasi kebijakan yang lebih ketat terhadap penggunaan merkuri atau menekan pemerintah dan perusahaan tambang untuk mematuhi regulasi lingkungan (Chase & Levine, 2018; Chikowore, 2023).

*Citizen science* menawarkan peluang besar dalam bidang pendidikan, khususnya dalam mendidik calon guru biologi. Melibatkan mahasiswa dalam proyek *citizen science* memberikan pengalaman langsung bagi mahasiswa untuk hadir di lapangan, melatih keterampilan berfikir kritis yang diperlukan untuk mengintegrasikan ilmu ekologi dengan pembelajaran berbasis masalah. Melalui keterlibatan aktif dalam pengumpulan data, analisis lingkungan, dan solusi praktis terhadap isu pencemaran sungai akibat aktivitas pertambangan, calon guru dapat memahami secara mendalam bagaimana proses ilmiah bekerja dan bagaimana

aplikasi konsep-konsep ekologi yang abstrak dapat diterapkan secara nyata dalam kehidupan sehari-hari (Mitchell *et al.*, 2017; Reed *et al.*, 2018).

Manfaat terbesar dari pendekatan ini adalah pengembangan keterampilan pemecahan masalah calon guru dan juga mendorong proses kognitif dan kreatif yang penting untuk mencapai solusi optimal terhadap tantangan lingkungan yang kompleks (Groulx *et al.*, 2017; Parrish *et al.*, 2019). Pemecahan masalah merupakan proses kognitif dan kreatif yang melibatkan serangkaian langkah logis yang bertujuan untuk mencapai hasil yang diinginkan atau solusi optimal. Di dalamnya terdapat perpaduan antara penalaran kritis, pengambilan keputusan berbasis bukti, dan inovasi dalam merespons kondisi dinamis atau kompleks (Parrish *et al.*, 2019; Pocock *et al.*, 2017). Melalui partisipasi langsung dalam proyek *citizen science*, calon guru belajar bagaimana mengidentifikasi masalah lingkungan di daerah mereka, mengumpulkan dan menganalisis data ilmiah, serta mengembangkan strategi mitigasi yang dapat diterapkan dalam lingkup lokal. Keterampilan ini sangat penting untuk ditanamkan dalam kurikulum pendidikan, karena kegiatan tersebut melatih calon guru untuk berpikir kritis dan sistematis dalam memecahkan masalah kompleks yang nantinya kemampuan tersebut dapat mereka transfer kepada mahasiswa mereka (Mitchell *et al.*, 2017; Reed *et al.*, 2018). Pendekatan ini juga mendukung pembelajaran kontekstual, di mana calon guru dapat mengajarkan konsep ekologi berdasarkan pengalaman langsung, pada kasus nyata yang terjadi di sekitar mereka (Schleicher & Schmidt, 2020).

*Citizen science* juga memberikan pengalaman kolaboratif yang sangat bermanfaat bagi calon guru. Mereka belajar bekerja dalam tim dengan ilmuwan, anggota masyarakat, dan sesama rekan pendidik, yang mengembangkan keterampilan sosial dan profesional yang penting dalam karier mengajar. Kolaborasi ini mengajarkan mereka cara mengelola proyek, berkomunikasi secara efektif dengan berbagai pihak, dan memotivasi orang lain untuk terlibat dalam pemecahan masalah lingkungan (Scheuch *et al.*, 2018). Lebih lanjut, melalui keterlibatan dalam proyek *citizen science*, calon guru juga dapat meningkatkan literasi lingkungan dan kesadaran keberlanjutan mereka sendiri. Keterlibatan ini akan memperkaya pemahaman mereka tentang pentingnya pelestarian lingkungan

dan peran mereka sebagai pendidik dalam mengajarkan nilai-nilai keberlanjutan kepada generasi muda (Huffling & Scott, 2021). Membekali diri bagi calon guru dengan pengalaman seperti ini, dapat mendorong mereka untuk menjadi agen perubahan yang memahami masalah lingkungan yang berpartisipasi aktif dalam upaya pelestarian dan pemulihan ekosistem dari gangguan polutan (Mitchell *et al.*, 2015). Konsekuensi yang diperoleh, pendidikan yang dihasilkan melalui *citizen science* akan lebih bermakna, karena tidak hanya mengajarkan ilmu pengetahuan, tetapi juga membentuk sikap peduli terhadap lingkungan yang dapat berdampak positif dalam jangka panjang (Syafri *et al.*, 2022).

Keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan merupakan elemen penting dalam pembelajaran ekologi. Keduanya memberikan landasan kritis dan praktis untuk memahami, mengatasi, dan mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem dan masyarakat. Pemecahan masalah memungkinkan individu, terutama calon guru biologi, untuk menganalisis masalah lingkungan secara mendalam, menemukan solusi yang efektif, dan mengimplementasikannya secara praktis (Rasis *et al.*, 2023). Sementara itu, literasi lingkungan memberikan pemahaman menyeluruh tentang bagaimana aktivitas manusia mempengaruhi ekosistem (Durmuş & Kinaci, 2021). Secara umum keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan dapat membantu membentuk pemahaman yang mendalam, kritis, dan praktis tentang isu-isu lingkungan yang kompleks pada pembelajaran ekologi yang tidak hanya melibatkan pemahaman tentang proses alam dan ekosistem, tetapi juga bagaimana manusia memengaruhi dan dipengaruhi oleh lingkungan (Koçak *et al.*, 2023).

Keterampilan pemecahan masalah merupakan salah satu keterampilan esensial yang diperlukan untuk menghadapi persaingan di abad 21. *Partnership for 21st Century Skills* mengidentifikasi berbagai *soft skill* yang disebut sebagai Keterampilan Abad 21, meliputi keterampilan berpikir kritis, pemecahan masalah, berkolaborasi, berkomunikasi, dan berpikir kreatif (*Partnership for 21st Century Learning*, 2015). Keterampilan-keterampilan ini menjadi pondasi penting dalam mempersiapkan generasi yang mampu beradaptasi dengan berbagai perubahan serta melanjutkan estafet pembangunan. Namun, salah satu kesenjangan utama

dalam pendidikan biologi saat ini adalah kurangnya pengalaman praktis di lapangan, terutama dalam menangani isu-isu lingkungan yang nyata (Aripin *et al.*, 2021). Sesuai dengan temuan tersebut, hasil penelitian pendahuluan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pembelajaran ekologi belum menyediakan pengalaman belajar yang mendukung peningkatan kompetensi sesuai dengan ekspektasi mahasiswa (Susbiyanto *et al.*, 2024). Banyak pembelajaran yang disediakan bagi calon guru biologi masih terbatas pada konteks teoritis di kelas ataupun praktek yang hanya mengikuti struktur panduan, sehingga konsep-konsep ekologi, seperti pencemaran dan perubahan iklim, sering kali dipelajari tanpa konteks aplikasi langsung di lapangan (Schumacher *et al.*, 2021). Akibatnya, calon guru kurang terampil dalam menganalisis masalah lingkungan secara holistik serta kesulitan menghubungkan teori dengan penerapannya di lapangan. Padahal kemampuan ini merupakan inti dari keterampilan pemecahan masalah yang diperlukan untuk menjawab tantangan abad 21.

UNESCO, melalui program *Education for Sustainable Development* (ESD), telah menggarisbawahi pentingnya literasi lingkungan sebagai elemen dasar dalam menciptakan masyarakat yang sadar lingkungan dan berkelanjutan. Menurut UNESCO, literasi lingkungan harus ditanamkan pada pendidikan formal dan nonformal agar mahasiswa dan masyarakat dapat berpartisipasi aktif dalam mengurangi kerusakan lingkungan serta melestarikan ekosistem (Martínez-Ventura *et al.*, 2021). OECD, dalam laporannya tentang *Green Growth*, menyoroti pentingnya literasi lingkungan dalam membantu generasi muda memahami dampak perubahan iklim, degradasi sumber daya alam, dan pentingnya keberlanjutan dalam perekonomian masa depan. Literasi ini menjadi fondasi penting untuk membentuk kebijakan dan praktik yang mendukung pembangunan berkelanjutan (Wilujeng *et al.*, 2019). Dukungan untuk peningkatan literasi lingkungan bagi calon guru sangat besar. Oleh karena itu peningkatan literasi lingkungan di kalangan calon guru, khususnya biologi masih perlu diperhatikan dengan serius, terutama dalam hal pemahaman kontekstual, penerapan praktis, dan keterlibatan aktif dalam isu-isu lingkungan (Dada *et al.*, 2017). Banyak calon guru biologi cenderung memiliki pemahaman teoritis tentang konsep-konsep

ekologi dan keberlanjutan, tetapi belum mampu mengaitkannya dengan masalah lingkungan yang nyata di sekitar mereka (Kidman & Casinader, 2019). Masalah lain yang ditemukan adalah keterbatasan dalam pemahaman interdisipliner (Martínez-Ventura *et al.*, 2021).

Kesenjangan antara harapan dan realita dalam pembelajaran ekologi di lapangan terlihat jelas ketika hasil penelitian pendahuluan mengungkapkan bahwa sebagian besar mahasiswa merasa perkuliahan ekologi yang telah mereka ikuti belum memadai dalam membekali mereka dengan keterampilan esensial abad 21, khususnya keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan. Meskipun UNESCO dan OECD telah menekankan pentingnya literasi lingkungan sebagai fondasi pembangunan berkelanjutan, serta *Partnership for 21st Century Skills* menyoroti keterampilan pemecahan masalah sebagai salah satu kompetensi kunci di abad 21, implementasinya di lapangan masih jauh dari ideal. Sebanyak 75% mahasiswa menyatakan bahwa perkuliahan ekologi belum membantu mereka dalam menumbuhkan kesadaran tentang peran mereka terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar. Selain itu, 75% mahasiswa juga merasa bahwa perkuliahan tersebut belum cukup efektif dalam menumbuhkan sikap kepedulian terhadap lingkungan. Lebih lanjut, 81,6% mahasiswa mengaku bahwa perkuliahan belum membantu mereka dalam menggali pemahaman dan kemampuan analisis kasus secara mendalam, serta 86,8% merasa belum terbantu dalam membangun kemampuan mengambil keputusan dan memecahkan masalah dengan baik. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan pembelajaran yang selama ini digunakan cenderung menitik beratkan pada penguasaan teoritis dan kurang menyentuh aspek praktis serta kontekstual, sehingga mahasiswa kesulitan menginternalisasi nilai-nilai lingkungan, menganalisis masalah secara holistik, dan mengembangkan keterampilan pemecahan masalah yang dibutuhkan untuk menjawab tantangan abad 21.

Karakteristik perkuliahan ekologi yang selama ini diikuti mahasiswa cenderung lebih dominan pada kegiatan presentasi dan penyusunan tugas makalah, yang lebih berfokus pada aspek teoritis. Implementasi pembelajaran ekologi selama ini didominasi oleh tugas dalam bentuk makalah dan diskusi di

kelas, dengan sedikit porsi untuk kegiatan praktik atau penerapan langsung di lapangan. Hasil penelitian pendahuluan juga mengungkapkan bahwa pendekatan kontekstual, yang seharusnya mengaitkan teori dengan masalah lingkungan nyata, jarang digunakan dalam pembelajaran. Mahasiswa sering kali mempelajari konsep-konsep ekologi, seperti pencemaran lingkungan, perubahan iklim, dan keanekaragaman hayati, secara abstrak tanpa dikaitkan dengan konteks nyata di sekitar mereka. Di sisi lain, mahasiswa mengharapkan perkuliahan ekologi dapat menintegrasikan praktik ke dalam teori, sehingga mereka tidak hanya memahami konsep-konsep tersebut secara teoritis, tetapi juga mampu mengaplikasikannya dalam situasi nyata. Kesenjangan antara harapan mahasiswa dan realita pembelajaran ini menunjukkan bahwa pendekatan pembelajaran yang selama ini digunakan belum memadai dalam membekali mahasiswa dengan keterampilan praktis dan kontekstual yang diperlukan untuk menghadapi tantangan lingkungan di dunia nyata.

Hasil penelitian pendahuluan tersebut menggambarkan pandangan yang sama dengan temuan Helga dalam artikelnya yang menyatakan bahwa calon guru biologi secara umum masih memiliki kecenderungan melihat masalah lingkungan dari sudut pandang biologis saja (Helga, 2023), tanpa mempertimbangkan faktor sosial, ekonomi, dan budaya yang juga berperan besar dalam keberlanjutan lingkungan. Hal ini juga sejalan dengan indikasi yang muncul dari penelitian Koçak *et al.* yang menjadi salah satu penyebab rendahnya kemampuan untuk mengembangkan solusi holistik dalam melibatkan berbagai aspek yang mempengaruhi ekosistem (Koçak *et al.*, 2023). Beberapa penelitian lainnya yang dilakukan oleh Rasis juga menunjukkan bahwa calon guru biologi belum sepenuhnya memahami konsep literasi lingkungan yang memiliki peran sentral dalam membentuk kesadaran dan pemahaman terhadap isu-isu lingkungan (Rasis *et al.*, 2023). Literasi ini penting dalam membangun kesadaran mahasiswa tentang tanggung jawab jangka panjang dalam menjaga lingkungan (Koçak *et al.*, 2023). Literasi lingkungan yang kuat, dapat dengan mudah memahami secara mendalam konsep-konsep lingkungan, seperti siklus alam, perubahan iklim, pencemaran, dan konservasi sumber daya alam, serta mampu mengaitkannya dengan tantangan

lokal dan global yang dihadapi saat ini (Dada *et al.*, 2017). Penelitian Kidman & Casinader telah menunjukkan bahwa guru yang memiliki tingkat literasi lingkungan yang lebih tinggi, akan lebih siap untuk membimbing siswa mereka dalam memahami isu-isu lingkungan (Kidman & Casinader, 2019). Keterbatasan dalam memahami literasi lingkungan di kalangan calon guru biologi ini menimbulkan hambatan yang signifikan untuk menumbuhkan generasi baru yang tidak hanya memiliki pengetahuan tentang lingkungan tetapi juga termotivasi untuk mengambil tindakan yang berarti dalam melestarikan dan memulihkan ekosistem (Koçak *et al.*, 2023).

Sejalan dengan berbagai penjelasan sebelumnya, mengintegrasikan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan dalam pembelajaran ekologi dapat membangun pemahaman yang mendalam, kritis, serta praktis, khususnya terkait isu-isu lingkungan yang kompleks (Bowser & Cid, 2021). Proses ini tidak hanya melibatkan pengetahuan tentang ekosistem dan proses alam, tetapi juga menekankan pada bagaimana peran masyarakat dalam memengaruhi dan dipengaruhi oleh lingkungan (Örs, 2022). Masyarakat memiliki peran penting dalam ekologi karena mereka berinteraksi langsung dengan ekosistem melalui pemanfaatan sumber daya alam, seperti air, tanah, dan keanekaragaman hayati, untuk memenuhi kebutuhan hidup sehari-hari (Bowser & Cid, 2021). Selain sebagai pengguna, masyarakat juga berperan sebagai penjaga ekosistem, di mana tindakan mereka sehari-hari dapat mempengaruhi kelestarian atau kerusakan lingkungan. Misalnya, praktik pertanian, industri, atau penambangan yang dilakukan tanpa memperhatikan keseimbangan ekosistem, dapat mengakibatkan penurunan kualitas lingkungan (Bendt *et al.*, 2013).

Kompleksitas komunitas ekologi, khususnya terkait keanekaragaman spesies, menjadi alasan penting untuk memahami peran keanekaragaman hayati dalam pemeliharaan ekosistem. Penelitian telah menunjukkan bahwa stabilitas komunitas dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk interaksi antar spesies dan konteks lingkungan tempat mereka berada (Botta-Dukát *et al.*, 2022). Pentingnya keterlibatan masyarakat dalam praktik ekologi ditegaskan oleh penelitian yang menunjukkan bagaimana inisiatif penghijauan masyarakat, seperti

kebun masyarakat dapat meningkatkan pembelajaran lingkungan dan menumbuhkan rasa tanggung jawab di antara para peserta (Bendt *et al.*, 2013). Lebih jauh lagi, peran masyarakat sebagai penjaga ekosistem telah terbukti, dimana kapasitas yang dimiliki oleh masyarakat dapat memengaruhi kondisi ekosistem mereka, yang dilakukan melalui praktik berkelanjutan atau, sebaliknya, melalui tindakan yang mengarah pada degradasi lingkungan (Martin-Albarracin *et al.*, 2015).

Masyarakat yang memahami fungsi ekosistem dengan baik, akan melibatkan diri dalam praktik pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan dan membantu memelihara keseimbangan ekosistem, melindungi habitat alami, serta memperpanjang umur sumber daya alam (Song *et al.*, 2019). Dalam ekosistem, masyarakat tidak hanya berperan sebagai aktor yang memengaruhi, tetapi juga sebagai penerima dampak langsung dari perubahan lingkungan. Ketika ekosistem terganggu, seperti dalam kasus pencemaran sungai akibat penambangan emas, masyarakat yang tinggal di daerah tersebut akan menghadapi risiko kesehatan, penurunan kualitas hidup, dan hilangnya mata pencaharian yang bergantung pada sumber daya alam. Oleh karena itu, keterlibatan aktif masyarakat dalam menjaga ekosistem sangatlah penting untuk memastikan keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan sosial dan ekonomi (Kanda *et al.*, 2017).

Literasi keberlanjutan masyarakat menjadi salah satu elemen kunci karena memungkinkan individu dan komunitas untuk memahami interaksi antara aktivitas manusia dan ekosistem, serta dampak dari tindakan manusia terhadap keberlanjutan sumber daya alam. Melalui literasi keberlanjutan yang kuat, masyarakat dapat terlibat aktif dalam pemantauan lingkungan, seperti yang dilakukan melalui proyek *citizen science*, di mana masyarakat dilatih untuk mengumpulkan data ilmiah yang relevan dan mendukung upaya mitigasi terhadap ancaman lingkungan (Pitman & Daniels, 2016). Selain itu, literasi keberlanjutan memberikan kemampuan kepada masyarakat untuk mengidentifikasi masalah lokal, seperti kerusakan ekosistem sungai, dan mencari solusi berkelanjutan yang mempertimbangkan aspek sosial, ekonomi, dan ekologis secara holistik. Pendekatan ini, tidak hanya memfasilitasi masyarakat dalam memahami tantangan

lingkungan, tetapi juga diberdayakan untuk mengambil tindakan dalam menjaga dan memulihkan lingkungan mereka, sehingga menjadi agen perubahan yang aktif dalam melestarikan ekosistem dan mendukung pembangunan berkelanjutan (Claudet *et al.*, 2020). Literatur dari Ogbonnaya juga menekankan bahwa melalui peningkatan literasi, masyarakat dapat menavigasi kompleksitas tantangan lingkungan dengan lebih baik dan berkontribusi pada tujuan keberlanjutan yang lebih luas (Ogbonnaya & Ann E., 2023).

UNESCO melalui program ESD telah menyoroti pentingnya literasi keberlanjutan sebagai sarana untuk meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan terkait keberlanjutan (Kioupi & Voulvoulis, 2022). UNESCO menekankan bahwa partisipasi masyarakat yang didukung oleh pemahaman keberlanjutan membantu menggerakkan proyek-proyek berbasis sains dan aksi lingkungan yang lebih efektif (UNESCO, 2019). *The World Bank*, dalam laporan mereka terkait *Environmental and Social Sustainability*, juga menekankan bahwa literasi keberlanjutan diperlukan untuk mendorong partisipasi masyarakat dalam pemantauan proyek-proyek lingkungan (*World Bank*, 2017). Berbagai hasil penelitian telah mendukung konsep *citizen science* sebagai alat yang dapat memfasilitasi keterlibatan masyarakat dalam pengelolaan lingkungan dan menyatakan bahwa masyarakat yang memahami isu-isu keberlanjutan akan lebih efektif dalam mendukung kebijakan dan proyek yang menjaga ekosistem serta mengurangi dampak negatif dari aktivitas industri, seperti penambangan (Chari *et al.*, 2019). Dengan literasi keberlanjutan yang kuat, masyarakat dapat memahami dengan baik hubungan antara aktivitas ekonomi lokal, seperti penambangan emas skala kecil dan dampak ekologi yang ditimbulkan, sehingga mereka lebih siap untuk berpartisipasi dalam pengambilan keputusan yang lebih bijaksana terkait pengelolaan sumber daya alam di wilayah mereka.

Hasil penelitian pendahuluan memberikan informasi terkait kecenderungan yang terjadi di lapangan, dimana masyarakat yang tidak terlibat dalam kegiatan penambangan emas cenderung lebih mudah memberikan keputusan proaktif dalam menjaga lingkungan. Mereka lebih responsif terhadap inisiatif pelestarian ekosistem, seperti pengetahuan tentang pembuangan merkuri hasil pemisahan

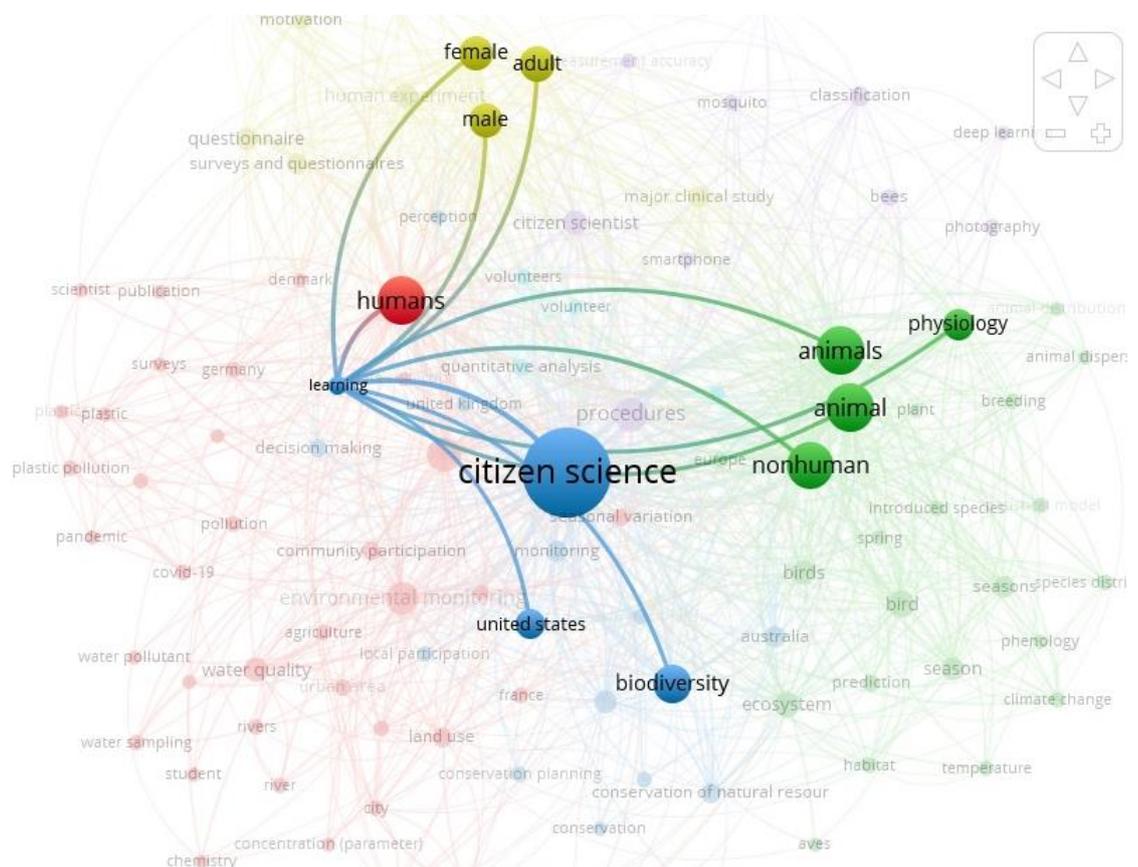
emas ke alam bebas yang akan berdampak pada kesehatan masyarakat di sekitar desa. Selain itu masyarakat tersebut juga setuju untuk menggunakan bahan kimia alternatif yang lebih aman terhadap lingkungan dalam proses pemisahan emas (Susbiyanto, 2025). Hal ini sejalan dengan modal literasi keberlanjutan yang mereka miliki. Literasi tersebut memungkinkan mereka untuk memahami dampak aktivitas manusia terhadap ekosistem dan mengambil tindakan preventif sebagai upaya pencegahan (Pitman & Daniels, 2016; Claudet *et al.*, 2020). Sebaliknya, masyarakat yang terlibat langsung dalam kegiatan penambangan emas sering kali menghadapi dilema antara kepentingan ekonomi dan pelestarian lingkungan. Keterlibatan mereka dalam aktivitas penambangan, yang menjadi sumber penghidupan utama, membuat mereka lebih sulit untuk mengambil keputusan yang proaktif terhadap pelestarian lingkungan (Susbiyanto, 2025). Seperti yang digambarkan oleh Kanda *et al.* dalam artikelnya bahwa, tekanan ekonomi dapat mendesak masyarakat yang terlibat aktivitas penambangan untuk cenderung mengabaikan dampak ekologis dari aktivitas mereka, seperti pencemaran sungai dan kerusakan habitat (Kanda *et al.*, 2017). Fenomena ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan yang holistik dan inklusif dalam meningkatkan literasi keberlanjutan, khususnya bagi masyarakat yang bergantung pada aktivitas ekonomi yang berpotensi merusak lingkungan. Kondisi ini membutuhkan berbagai program edukasi masyarakat yang mampu meningkatkan kesadaran ekologis, serta memberikan masukan bagi masyarakat tentang penambangan emas dengan menggunakan bahan kimia alternatif yang lebih aman terhadap lingkungan dalam proses pemisahan emas yang berkelanjutan bagi masyarakat penambangan emas.

Uraian dari berbagai paragraph sebelumnya memberikan gambaran jelas tentang pentingnya mengintegrasikan *citizen science* dalam pembelajaran ekologi, khususnya bagi calon guru biologi dan masyarakat di sekitar area penambangan emas. Perubahan lingkungan global yang semakin cepat telah menjadi factor utama perubahan paradigma pembelajaran tentang lingkungan khususnya pada mata kuliah ekologi. Melalui pendekatan *citizen science*, calon guru tidak hanya mempelajari konsep-konsep teoretis, tetapi juga secara langsung terlibat dalam

menjalankan proyek pengumpulan data ilmiah (Aripin *et al.*, 2022; Queiruga-Dios *et al.*, 2020), seperti pemantauan pencemaran sungai akibat penambangan emas, serta menganalisis dampak ekologis pada ekosistem dan masyarakat. Pada proses tersebut, mahasiswa melakukan elaborasi dengan masyarakat dan saling mentransfer pengetahuan serta mengembangkan keterampilan pemecahan masalah, serta membantu mereka mengidentifikasi masalah lingkungan, menganalisis data secara kritis, dan merumuskan solusi efektif yang berkelanjutan, sehingga dapat meningkatkan literasi lingkungan mereka (Merenlender *et al.*, 2016). Literasi lingkungan yang diperoleh melalui pengalaman praktis ini memberi pemahaman menyeluruh tentang hubungan antara aktivitas manusia dan ekosistem, kemudian mereka memahami bagaimana tindakan manusia dapat mempengaruhi keseimbangan ekologi secara global maupun lokal (Hsu *et al.*, 2019). Selain itu, literasi keberlanjutan masyarakat yang dikembangkan dalam proyek *citizen science* mempersiapkan calon guru untuk memberdayakan komunitas lokal dalam upaya menjaga lingkungan dan mengambil tindakan nyata dalam melindungi ekosistem. Partisipasi aktif mereka dalam proyek-proyek ini melatih kesiapan mereka untuk mengambil tindakan yang berarti yang berkontribusi pada konservasi ekosistem dan pembangunan berkelanjutan (Scheuch *et al.*, 2018). Dengan demikian, integrasi *citizen science* dalam perkuliahan ekologi tidak hanya memperkaya pemahaman teoritis, tetapi juga membekali calon guru dengan keterampilan praktis dan kemampuan untuk mengaplikasikan konsep keberlanjutan, sekaligus membentuk generasi yang siap terlibat aktif dalam pelestarian lingkungan dan pembangunan berkelanjutan (Ayar & Özalp, 2021; Brown & Williams, 2019).

Landasan lain yang digunakan untuk menekankan pentingnya mengintegrasikan *citizen science* dalam pembelajaran ekologi diperoleh dari hasil analisis bibliometrik menggunakan aplikasi VOSviewer (Gambar 1.1). Analisis tersebut menggunakan kata kunci “*citizen science*” sebagai pencariannya, hasil yang diperoleh menginformasikan bahwa ada kata kunci *learning* (pembelajaran) sebagai elemen dari *citizen science*. Pengorganisasian spesifik pada kata *learning* sebagai pusat penghubung, membentuk 4 kluster utama yaitu: kluster biru (*citizen*

*science*), kluster merah (manusia sebagai pusat dari kegiatan *citizen science*), dan kluster hijau (fauna sebagai objek *citizen science*) dan kluster kuning (umur dan gender yang terlibat dalam *citizen science*).



Gambar 1.1: Analisis Bibliometrik dengan Kata Kunci *Citizen Science*

Hasil analisis tersebut juga memberi informasi bahwa kata kunci “*learning*” tampak menghubungkan *citizen science* dengan manusia. Hubungan ini menunjukkan bahwa pembelajaran adalah elemen penting dalam melibatkan masyarakat dalam proyek-proyek *citizen science*. Seluruh artikel yang digunakan sebagai sumber data pada analisis bibliometrik, berasal dari laman scopus dengan rentang tahun 2015 hingga 2022. Artikel yang diperoleh berjumlah 594, dimana didalamnya tidak ditemukan kata kunci ekologi. Sebagaimana yang diketahui, pada umumnya ekologi memiliki hubungan yang erat dengan studi tentang lingkungan dan pelestarian sumber daya alam. Hal ini menjadi indikasi yang

menarik, mengingat *citizen science* sering kali diterapkan dalam konteks ekologi, terutama dalam hal pemantauan lingkungan, keanekaragaman hayati, dan konservasi alam. Absennya kata kunci ekologi menunjukkan bahwa dalam *text corpus* artikel yang dianalisis, mengindikasikan bahwa kajian ekologi secara khusus belum dieksplorasi secara signifikan atau tidak muncul sebagai tema utama dalam berbagai publikasi yang ada di dalam 594 artikel tersebut. Selain itu, tidak adanya hubungan langsung antara kata kunci pembelajaran dengan isu-isu spesifik seperti pencemaran sungai ataupun polusi air, juga menjadi temuan penting dalam analisis ini. Meskipun *citizen science* sering digunakan untuk memantau kualitas air dan polusi, terutama di daerah sungai dan ekosistem perairan lainnya, dalam data yang dianalisis ini, tema tersebut tampaknya belum banyak mendapatkan perhatian. Hal ini mungkin menunjukkan adanya celah dalam literatur terkait, dimana kajian pembelajaran ekologi dalam konteks *citizen science* yang berfokus pada masalah polusi air atau pencemaran sungai masih jarang dieksplorasi atau dibahas.

Berdasarkan latar belakang yang dipaparkan, perlu disusun pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* tentang pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai yang diharapkan dapat meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan calon guru biologi serta literasi keberlanjutan masyarakat. Perkuliahan ekologi berbasis *citizen science project* dalam konteks ini menggunakan desain yang di susun dengan mengadaptasi dari berbagai literatur yang teruji secara khusus untuk berbagai kasus yang terkait dengan permasalahan lingkungan dan ekologi. Desain tersebut menjadi kerangka kerja bagi mahasiswa dalam menjalankan proyek *citizen science*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini berkaitan erat dengan pertanyaan “bagaimana program pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* tentang pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai yang digunakan untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan calon guru serta literasi keberlanjutan

masyarakat?”. Agar penelitian ini memberikan konstruksi penjelasan yang terstruktur, rumusan masalah utama diuraikan kembali kedalam beberapa pertanyaan penelitian berikut:

1. Bagaimanakah karakteristik program pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* pada pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai yang digunakan untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan calon guru serta literasi keberlanjutan masyarakat?
2. Bagaimanakah peningkatan keterampilan pemecahan masalah calon guru biologi pada perkuliahan ekologi berbasis *citizen science project* pada pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai?
3. Bagaimanakah peningkatan literasi lingkungan calon guru biologi pada perkuliahan ekologi berbasis *citizen science project* pada pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai?
4. Bagaimanakah literasi keberlanjutan masyarakat yang ikut serta dalam program pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* pada pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai?
5. Bagaimanakah keunggulan dan keterbatasan pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* dengan isu pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang sudah dipaparkan, maka tujuan penelitian ini adalah menghasilkan program pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* tentang pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai yang digunakan untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan calon guru biologi serta literasi keberlanjutan masyarakat.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat/signifikansi penelitian ini dapat dilihat dari salah satu atau beberapa aspek yang meliputi:

1. Manfaat Teoritis
  - a. Penelitian ini mengkonfirmasi literatur relevan yang digunakan untuk menyusun tahapan pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* pada pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai.
  - b. Penelitian ini akan menghasilkan tahapan pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* pada pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai yang digunakan untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan calon guru serta literasi keberlanjutan masyarakat.

2. Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini diharapkan memiliki manfaat diantaranya:

- a. Bagi program studi yang menghasilkan lulusan calon guru biologi, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk mengembangkan pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* yang mengangkat permasalahan kontekstual
- b. Bagi program studi yang menghasilkan lulusan calon guru biologi, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk melaksanakan pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* yang digunakan untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan calon guru serta mendukung peningkatan profesionalisme calon guru.
- c. Bagi dosen, hasil penelitian ini dapat digunakan dan diterapkan pada mata kuliah ekologi untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan calon guru.
- d. Bagi calon guru, dapat digunakan sebagai acuan untuk melaksanakan proses belajar ekologi berbasis *citizen science project* pada pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai melalui

media lingkungan dan masyarakat serta untuk mengembangkan keterampilan pemecahan masalah serta literasi lingkungan.

- e. Bagi masyarakat, dapat digunakan sebagai sarana edukasi untuk menambah wawasan dan juga pengetahuan bagi untuk meningkatkan kesadaran lingkungan serta literasi keberlanjutan.

## 1.5 Definisi Operasional

1. Metode pengembangan program pembelajaran merupakan suatu prosedur atau tata cara sistematis yang digunakan untuk mengembangkan Program pembelajaran yang memiliki karakteristik untuk mencapai tujuan tertentu. Dalam penelitian ini metode pengembangan program yang digunakan mengacu pada pendekatan konstruktivisme dimana program ini nantinya akan membangun pengetahuannya sendiri dengan cara mengalami dan mengerjakannya, dalam proses masuk ke dunia nyata secara terus-menerus, sehingga fakta dan keterampilan dipelajari secara holistic.

### 2. *Citizen Science Project*

*Citizen science project* merupakan kegiatan proyek yang melibatkan mahasiswa, praktisi dan juga masyarakat sebagai sukarelawan untuk mengumpulkan data penelitian ilmiah. Subjek yang terlibat dalam proyek ini adalah praktisi, mahasiswa dan masyarakat. Dalam penelitian ini, proyek *citizen science* yang disusun berbasis kurikulum dengan mata kuliah ekologi sebagai kajian sainsnya, dimana permasalahan yang dibahas merupakan permasalahan lingkungan sungai di area pertambangan emas. Pengintegrasian lintas bidang ini membutuhkan kecermatan dalam perencanaan dan pengelolaan proyek, dengan harapan tujuan dari proyek ini dapat tercapai dengan baik. Oleh karena itu di dalam penelitian ini juga akan memberikan gambaran tentang kerangka teoritis yang mendukung proyek *citizen science* yang disusun dalam metode pengembangan program pembelajaran.

3. Program pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* tentang pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai adalah suatu program edukasi yang menjadi bagian mata kuliah ekologi dimana program tersebut dirancang dalam 4 kali pertemuan dengan target yaitu untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan peserta (mahasiswa maupun masyarakat) tentang ekologi, khususnya dampak pencemaran limbah tambang emas terhadap ekosistem sungai. Program ini mengintegrasikan pendekatan *citizen science*, di mana peserta terlibat aktif dalam pengumpulan data, pemantauan, dan analisis kualitas air serta dampak lingkungan di DAS yang terpengaruh oleh aktivitas penambangan emas. Komponen program ini meliputi: pembelajaran teoritis terkait konsep ekologi sungai, dampak pencemaran limbah tambang emas, dan prinsip-prinsip keberlanjutan. Komponen penting lainnya yaitu *Focus Group Discussion* bersama ahli yang kompeten, pelatihan praktis terkait teknik pengambilan sampel air, pengukuran parameter kualitas air (seperti pH, kadar logam berat, dan tingkat kekeruhan), serta penggunaan alat pemantauan lingkungan. Diskusi dan refleksi terkait temuan lapangan, mengaitkannya dengan teori, dan merumuskan solusi berbasis komunitas untuk mengurangi dampak pencemaran. Penyusunan rekomendasi terkait kebijakan atau tindakan praktis yang dapat diimplementasikan oleh pemangku kepentingan lokal untuk mengatasi pencemaran limbah tambang emas dalam bentuk kegiatan mini proyek,
4. Keterampilan pemecahan masalah adalah proses berpikir memahami, merencanakan, menerapkan rencana dan mengevaluasi rencana masalah. Pada penelitian pemecahan masalah yang mengukur beberapa aspek, terdiri dari aspek pertama: *Problem Schema* (Ps) yaitu setiap masalah membutuhkan representasi dari masalah, yang dikenal sebagai ruang masalah, skema masalah atau model masalah. Kedua: *Analogy* (A) adalah proses pemecahan masalah dengan mentransfer (memetakan) informasi dari subjek tertentu (sumber) ke subjek tertentu lainnya (target). Ketiga:

*Causal* (C) yaitu menghubungkan sebab akibat dari masalah yang terdiri dari faktor atau elemen masalah yang saling berkaitan secara kausal jenis hubungan konseptual ini yang paling umum yang mendasari semua pemikiran. Empat: *Argumentation* (Ar) merupakan cara rasional dalam menyelesaikan pertanyaan, masalah, Argumen terdiri dari solusi yang didukung oleh prinsip-prinsip, bukti, dan bantahan. Berdasarkan empat aspek tersebut, pengukuran keterampilan pemecahan masalah dalam penelitian ini dirumuskan kedalam 4 tahapan tindakan dalam menyelesaikan studi kasus yang diberikan. Empat tahapan tersebut meliputi: memahami masalah, identifikasi akar masalah, alternatif solusi, dan menetapkan solusi terbaik, sehingga kegiatan tersebut dapat menekankan pada refleksi dan tindakan kolaboratif untuk membantu mahasiswa dalam mengatasi masalah ekosistem sungai secara sistematis dan berkelanjutan. Data dikumpulkan dengan menggunakan instrumen tes uraian berbasis studi kasus yang dirancang untuk menjangkau informasi mendalam mengenai kemampuan mahasiswa dalam menyelesaikan permasalahan lingkungan nyata, khususnya pencemaran akibat tambang emas di daerah aliran sungai. Instrumen ini terdiri dari lima soal yang disusun berdasarkan prinsip-prinsip pemecahan masalah dan selaras dengan empat aspek berpikir, yaitu *Problem Schema* (Ps), *Analogy* (A), *Causal* (C), dan *Argumentation* (Ar). Setiap soal mengandung konteks permasalahan riil yang mencerminkan dinamika sosial-lingkungan di sekitar area penambangan.

5. Literasi Lingkungan merupakan kemampuan individu untuk memahami dan menganalisis dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan, khususnya ekosistem sungai, melalui pengetahuan mendalam tentang sistem ekologi, keterampilan berpikir kritis dalam mengevaluasi masalah lingkungan, sikap bertanggung jawab terhadap perlindungan lingkungan, serta perilaku nyata dalam mengambil tindakan yang berkelanjutan guna meminimalkan kerusakan ekosistem. Literasi lingkungan yang dikembangkan dalam penelitian ini mencakup berbagai elemen penting

yang meliputi: kompetensi pengetahuan, keterampilan analitis, keterlibatan emosional dalam bentuk sikap tanggung jawab terhadap lingkungan, dan perilaku nyata dalam mengambil tindakan yang berkelanjutan untuk mempromosikan keputusan yang berdasarkan informasi dan tindakan kepedulian terhadap lingkungan. Data literasi lingkungan dalam penelitian ini dijangking melalui dua jenis instrumen utama, yaitu tes pilihan ganda dan angket sikap, perilaku. Instrumen ini dikembangkan untuk mengukur literasi lingkungan mahasiswa secara holistik, mencakup aspek kognitif, afektif, dan konatif yang relevan dengan pemahaman serta tanggapan terhadap permasalahan ekosistem sungai akibat aktivitas manusia, khususnya penambangan emas. Tes pilihan ganda terdiri dari 50 soal yang dirancang untuk mengukur dua kompetensi utama, yakni pengetahuan mendalam tentang sistem ekologi dan keterampilan berpikir kritis dalam mengevaluasi masalah lingkungan. Soal-soal tersebut mencerminkan pemahaman mahasiswa terhadap berbagai tema seperti indikator pencemaran, hubungan sosial-politik dan budaya terhadap lingkungan, metode pemantauan kualitas air, hingga solusi dan pendekatan restoratif berbasis masyarakat. Selain itu, kemampuan untuk menganalisis data, menghubungkan fakta ilmiah dengan fenomena lingkungan, serta mengevaluasi dan memilih solusi yang relevan juga menjadi bagian integral dalam instrumen ini. Dengan demikian, instrumen ini tidak hanya menjangking tingkat pengetahuan konseptual mahasiswa, tetapi juga kemampuan analitis mereka dalam mengaitkan teori dengan permasalahan nyata di lapangan. Selain tes objektif, pengukuran aspek sikap dan perilaku mahasiswa dilakukan melalui angket literasi lingkungan yang terdiri dari 50 pernyataan dalam skala Likert empat poin. Pernyataan-pernyataan dalam angket ini dikembangkan untuk menjangking sikap bertanggung jawab terhadap perlindungan lingkungan dan perilaku nyata dalam mengambil tindakan yang berkelanjutan. Instrumen ini mencakup indikator seperti kepekaan terhadap dampak aktivitas manusia, kesadaran tanggung jawab individu

dan kolektif, efikasi diri dalam menghadapi tantangan lingkungan, serta niat dan motivasi untuk bertindak. Di samping itu, angket ini juga menjangkau data mengenai perilaku nyata mahasiswa dalam mengelola sumber daya alam, berpartisipasi dalam kegiatan pelestarian lingkungan, mengubah pola konsumsi, dan mendorong penerapan teknologi ramah lingkungan.

6. Literasi keberlanjutan masyarakat merupakan kemampuan masyarakat untuk memahami, menafsirkan, dan menerapkan pengetahuan tentang keberlanjutan dalam kehidupannya. Lingkup literasi ini tidak hanya mencakup kesadaran tentang isu-isu lingkungan seperti perubahan iklim, deforestasi, dan polusi, tetapi juga bagaimana aspek-aspek sosial dan ekonomi berperan dalam menciptakan dunia yang lebih berkelanjutan. Data literasi keberlanjutan masyarakat dalam penelitian ini diperoleh melalui instrumen angket tertutup yang disusun secara sistematis untuk menggambarkan tingkat pemahaman, nilai dan sikap, keterampilan, serta pola pikir dan perilaku masyarakat dalam mendukung keberlanjutan lingkungan, sosial, dan ekonomi secara terpadu. Angket literasi keberlanjutan ini terdiri dari 50 pernyataan tertutup, yang dikembangkan berdasarkan tiga dimensi utama, yaitu: (1) kecerdasan ekologis yang berbasis pada pengetahuan keberlanjutan, (2) keterampilan yang berbasis pada pengetahuan, dan (3) pola pikir yang membangun kemampuan adaptasi sosial serta tindakan keberlanjutan. Ketiga dimensi ini dijabarkan ke dalam 27 indikator pernyataan yang merepresentasikan kesadaran terhadap isu ekologi, kemampuan bekerja dalam tim, efikasi diri, serta komitmen terhadap perubahan berkelanjutan. Pernyataan-pernyataan dalam angket mencakup berbagai aspek, seperti pemahaman terhadap dampak aktivitas penambangan emas terhadap lingkungan dan sosial ekonomi desa, kesadaran terhadap peran budaya lokal dalam menjaga keseimbangan ekosistem, kemampuan menggunakan teknologi ramah lingkungan, hingga motivasi individu untuk terlibat dalam advokasi serta inisiatif pelestarian lingkungan. Selain itu, indikator dalam

instrumen ini juga menjangkau kemampuan masyarakat dalam mengembangkan solusi berbasis komunitas, membangun kolaborasi dengan lembaga formal maupun informal, serta mempertimbangkan keberlanjutan dalam pengambilan keputusan sehari-hari.

7. Karakteristik program dalam penelitian ini merupakan serangkaian indikator yang memuat ciri khusus dari program pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* tentang pencemaran limbah tambang emas di daerah aliran sungai. Adapun indikatornya meliputi: komponen-komponen sistem pembelajaran yang digunakan; pendekatan dan orientasi yang digunakan untuk mencapai tujuan pembelajaran; metode ilmiah, ketelibatan sains, teknologi, dan masyarakat serta lingkungan di dalam pembelajaran; serta indikator ketercapaian keterampilan pemecahan masalah dan literasi lingkungan serta literasi keberlanjutan masyarakat.
8. Keunggulan perkuliahan yang dimaksudkan dalam penelitian ini adalah berbagai kelebihan yang muncul saat perkuliahan dilakukan dengan menggunakan program yang dikembangkan sehingga menyebabkan perkuliahan lebih baik (efektif) dan (efisien) dalam mencapai berbagai tujuan pembelajaran.

## 1.6 Struktur Organisasi Disertasi

Disertasi ini disusun mengikuti Pedoman Penulisan Karya Ilmiah Universitas Pendidikan Indonesia Tahun 2024, yang terdiri dari enam bab.

Bab I memuat latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, definisi operasional, dan struktur organisasi disertasi. Bab II berisi kajian pustaka terkait dengan variabel-variabel penelitian dan konsep-konsep dalam pengembangan pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project*.

Bab II berisi uraian tentang: ekologi, *citizen science*, keterampilan pemecahan masalah, literasi lingkungan, literasi keberlanjutan masyarakat, serta teori-teori yang relevan dengan variabel-variabel penelitian, dan kemudian diakhiri dengan kerangka pikir penelitian.

Bab III memaparkan metode penelitian yang digunakan dalam disertasi ini. Metode penelitian dimulai dengan uraian metode penelitian, subjek penelitian, lokasi dan waktu penelitian, instrumen penelitian yang digunakan, paparan desain dan prosedur pengembangan pembelajaran ekologi berbasis *citizen science project* beserta konstruksi instrument penelitian, dan teknik analisis data penelitian.

Bab IV memaparkan hasil penelitian. Hasil penelitian ditampilkan dalam bentuk tabel, grafik, dan narasi dari pertanyaan-pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan.

Bab V memaparkan pembahasan. Pembahasan penelitian dalam disertasi ini disajikan dengan mengkaji berbagai teori dan hasil penelitian relevan terdahulu yang mendukung dan memperkuat temuan penelitian.

Bab VI memaparkan simpulan penelitian, implikasi, dan rekomendasi. Simpulan merupakan hasil analisis penelitian sebagai jawaban pertanyaan penelitian. Impikasi dan rekomendasi diperuntukkan kepada pengguna hasil penelitian, peneliti berikutnya untuk penelitian lanjutan.