

BAB 2

TINJAUAN TEORITIS

2.1 Kajian Pustaka

2.1.1 Pembelajaran Abad 21

Pembelajaran abad ke-21 menuntut peserta didik untuk memiliki keterampilan komprehensif yang mencakup aspek kognitif, afektif, dan psikomotorik guna menghadapi tantangan global. OECD (2022) menegaskan bahwa sistem pendidikan harus menumbuhkan kompetensi kunci, dengan pergeseran peran guru dari sekadar pengajar menuju fasilitator yang mendorong berkembangnya keterampilan esensial. Sejalan dengan itu, Indonesia mengintegrasikan keterampilan abad ke-21 dalam kurikulumnya, dari Kurikulum 2013 hingga Kurikulum Merdeka (Bulkis *et al.*, 2025). Oleh karena itu, saat ini pendidikan sudah seharusnya mencetak lulusan yang tidak hanya berfokus pada kompetensi akademik, tetapi juga pada pembentukan etika, integritas, dan tanggung jawab sosial (Indra *et al.*, 2025). Untuk mewujudkan keterampilan abad ke-21, salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah melalui penguatan *sustainability literacy*. *Sustainability literacy* memiliki relevansi erat dengan keterampilan abad ke-21 karena keduanya menuntut peserta didik untuk dapat berpikir kritis, kreatif, serta memiliki kesadaran sosial dan etis dalam menghadapi persoalan nyata (Salamanca *et al.*, 2020).

2.1.2 *Sustainability Literacy*

2.1.2.1 Pengertian *Sustainability Literacy*

Pada dasarnya, *sustainability literacy* merujuk pada kemampuan individu untuk memahami sekaligus merespons kompleksitas permasalahan global yang berhubungan dengan keberlanjutan. Décamps *et al.*, (2017) mendefinisikan *sustainability literacy* sebagai pengetahuan dan pemahaman inti tentang isu-isu keberlanjutan yang diperlukan untuk menghadapi tantangan multidimensional serta berkontribusi pada proses debat maupun pencarian solusi atas masalah tersebut. Melalui *Education for Sustainable Development* (ESD), *sustainability literacy* tidak hanya menekankan pada aspek pengetahuan, tetapi juga pada pengembangan

keterampilan berpikir sistemik dan multidisipliner agar individu mampu melihat keterkaitan antara berbagai dimensi pembangunan, seperti kualitas tanah, kesehatan hutan, hingga isu sosial.

Sementara itu, Campbell *et al.*, (2021) menjelaskan bahwa *sustainability literacy* dapat dipahami sebagai kapasitas individu untuk memahami dan terlibat secara bermakna dalam hubungan antara manusia dengan lingkungan serta dunia di luar manusia. Konsep ini menekankan bahwa *sustainability literacy* bukan hanya penguasaan pengetahuan faktual atau keterampilan teknis, melainkan keterlibatan aktif dalam memahami dan merespons isu-isu keberlanjutan. Dengan perspektif ini, maka *sustainability literacy* meliputi pemahaman yang utuh dan mendalam, melibatkan pengalaman, sikap serta kesadaran diri akan peran serta dampak yang dimiliki dalam ekosistem sosial maupun ekologis.

Sejalan dengan perkembangan pemahaman tentang keberlanjutan, Hernández *et al.*, (2021) menegaskan bahwa istilah *sustainability literacy* berakar dari gagasan dasar tentang tiga dimensi utama pembangunan berkelanjutan, yaitu lingkungan, sosial, dan ekonomi, sebagaimana dirumuskan dalam *Our Common Future* yang merupakan laporan Brundtland tahun 1987. Konsep ini kemudian berkembang dan diintegrasikan ke dalam berbagai bidang pendidikan sebagai kompetensi lintas disiplin yang harus dimiliki lulusan perguruan tinggi, seperti yang diterapkan dalam model pendidikan Tec21 di Tecnológico de Monterrey. Lebih lanjut, sejak adanya Perjanjian Paris (2015) dan penerapan SDGs, konsep keberlanjutan semakin kuat masuk ke ranah kebijakan publik dan diperluas ke pendidikan sehingga *sustainability literacy* menjadi kompetensi penting yang perlu dimiliki oleh peserta didik.

Selain itu, Ardoin *et al.*, (2023) menjelaskan bahwa *sustainability literacy* tidak dapat dilepaskan dari akar konsep *environmental literacy* yang telah berkembang selama lebih dari lima dekade. Awalnya, *environmental literacy* identik dengan keterampilan dasar membaca dan menulis, lalu mengalami perluasan makna menjadi kesadaran dan perilaku bertanggung jawab terhadap lingkungan yang mencakup aspek kognitif, afektif, dan tindakan nyata. Namun, seiring berjalannya waktu konsep tersebut meluas dari level individu menuju

tingkat kelompok dan lebih menyeluruh, sejalan dengan tantangan keberlanjutan yang semakin kompleks dan lintas skala. Oleh karena itu, *sustainability literacy* kini dipahami secara lebih luas, yaitu sebagai kemampuan kelompok untuk saling berkolaborasi, mengoptimalkan sumber daya bersama, dan membentuk sinergi untuk menyelesaikan isu keberlanjutan yang terkait dengan dimensi sosial maupun lingkungan.

Berdasarkan berbagai pandangan tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa *sustainability literacy* merupakan seperangkat pengetahuan, keterampilan, sikap, dan kesadaran yang memungkinkan individu maupun kelompok untuk memahami sekaligus merespons isu-isu keberlanjutan secara utuh. Konsep ini tidak menekankan pada penguasaan aspek kognitif saja, tetapi juga keterampilan berpikir sistemik, keterlibatan aktif, serta tanggung jawab sosial-lingkungan. Dengan demikian, *sustainability literacy* berkembang dari pemahaman yang berakar pada dimensi lingkungan, sosial, dan ekonomi, menjadi sebuah kompetensi multidisipliner yang penting dimiliki untuk menghadapi kompleksitas tantangan global di era sekarang.

2.1.2.2 Indikator *Sustainability Literacy*

Dalam mengukur *sustainability literacy*, diperlukan seperangkat indikator yang mampu menggambarkan sejauh mana individu maupun kelompok dapat memahami sekaligus terlibat dalam isu keberlanjutan. Secara umum, indikator tersebut mencakup tiga aspek utama, yaitu pengetahuan, keterampilan, dan sikap. Ketiga aspek ini dianggap mewakili dimensi kognitif, psikomotor, dan afektif yang berperan penting dalam membentuk kemampuan seseorang untuk merespons tantangan keberlanjutan secara utuh (Ardoin *et al.*, 2023; Umbara & Handayani, 2023; Chen *et al.*, 2022).

Menurut Décamps *et al.*, (2017), indikator *sustainability literacy* mencakup *knowledge* (pengetahuan), *knowledge of skills* (keterampilan), dan *mindset* (pola pikir). Adapun penjelasan dan sub indikator tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Indikator *Sustainability Literacy*

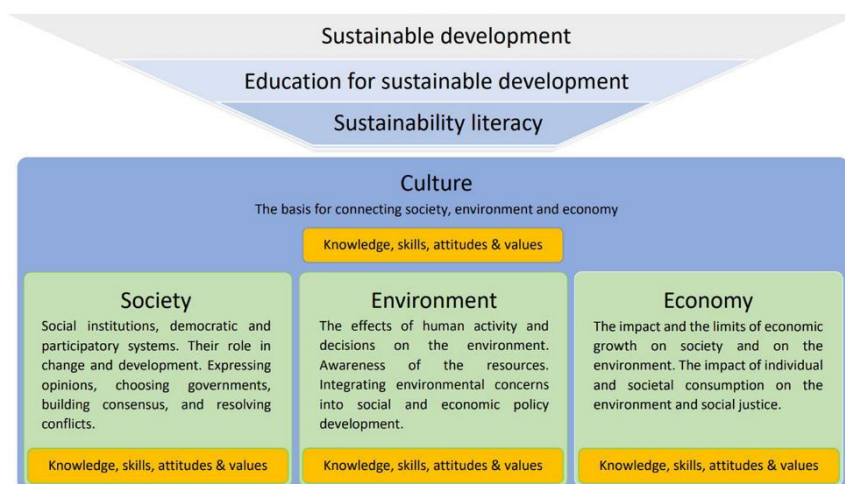
No.	Indikator	Sub Indikator
1.	<i>Knowledge</i>	Pengetahuan tentang kemanusiaan dan ekosistem berkelanjutan di planet Bumi.
		Pengetahuan tentang sistem yang dibangun manusia secara global dan lokal untuk menjawab kebutuhan masyarakat.
		Pengetahuan tentang transisi menuju keberlanjutan.
		Pengetahuan tentang memiliki peran untuk menciptakan dan mempertahankan perubahan individual dan sistemik.
2.	<i>Knowledge of Skills</i>	Keterampilan bekerja sama dengan orang lain.
		Keterampilan pribadi.
		Keterampilan dalam berpikir dan bertindak secara sistematis.
3.	<i>Mindset</i>	Pola pikir dalam masalah keberlanjutan.

Sumber: Décamps *et al.*, (2017)

Tabel 2.1 menunjukkan bahwa *sustainability literacy* tidak hanya berkaitan dengan penguasaan pengetahuan faktual mengenai isu-isu keberlanjutan, tetapi juga mencakup keterampilan praktis serta pola pikir yang mendukung terciptanya perubahan. Aspek pengetahuan menekankan pada pemahaman tentang ekosistem, sistem sosial, serta dinamika transisi menuju keberlanjutan. Aspek keterampilan berkaitan dengan kemampuan individu untuk saling bekerja sama, mengelola diri, dan berpikir serta bertindak secara sistematis dalam merancang solusi berdasarkan pada permasalahan nyata. Sementara itu, aspek pola pikir menekankan pada kesadaran, nilai, dan orientasi individu terhadap tindakan keberlanjutan (Décamps *et al.*, 2017).

Lebih lanjut, terdapat penelitian terbaru oleh Saarna & Laius (2025) yang mengkaji berbagai instrumen penilaian *sustainability literacy* yang digunakan dalam pendidikan tinggi. Hasilnya menunjukkan bahwa indikator *sustainability literacy* secara umum mencakup tiga domain utama, yaitu *society*, *environment*, dan *economy*, yang dihubungkan melalui dimensi *culture* sebagai basis integrasi. Namun, keempat domain tersebut tetap menekankan aspek *knowledge*, *skills*, *attitudes*, dan *values* sebagai inti dari *sustainability literacy*, sebagaimana

ditunjukkan pada Gambar 2.1. Model ini menunjukkan bahwa *sustainability literacy* dipandang secara holistik, tidak hanya dari aspek kognitif, tetapi juga sosial, budaya dan ekologis.



Gambar 2.1 Indikator *Sustainability Literacy* dengan Tiga Domain Utama
Sumber: (Saarna & Laius, 2025)

Namun, meskipun hasil kajian Saarna & Laius (2025) memperkaya pemahaman tentang ragam indikator yang digunakan, indikator yang paling luas diadopsi dalam penelitian hingga saat ini tetap mengacu pada kerangka yang dikembangkan oleh Décamps *et al.*, (2017). Hal ini disebabkan karena kerangka tersebut telah diuji secara internasional melalui Sulitest, yang melibatkan lebih dari 42 ribu mahasiswa dan staf dari 260 universitas di 35 negara, dan distandarisasi oleh UNESCO dalam *Global Education Monitoring Report*. Selain itu, indikator yang ditawarkan bersifat jelas, komprehensif, dan relatif mudah diadaptasi sesuai dengan konteks dan kebutuhan masing-masing negara atau lembaga pendidikan, sehingga menjadikannya lebih relevan dan aplikatif. Sub-indikator yang menjadi bagian dari indikator *knowledge*, *knowledge of skills*, dan *mindset* mampu merepresentasikan tiga dimensi utama keberlanjutan, yaitu lingkungan, sosial, dan ekonomi.

Menurut Décamps *et al.*, (2017), dimensi lingkungan tampak pada indikator *knowledge* dengan sub-indikator *pengetahuan tentang kemanusiaan dan ekosistem berkelanjutan di planet Bumi* serta *pengetahuan tentang transisi menuju keberlanjutan* karena keduanya menekankan keterkaitan manusia dengan alam dan

pentingnya perubahan menuju sistem yang ramah lingkungan. Sementara itu, dimensi sosial tercermin pada indikator *knowledge* dengan sub-indikator *pengetahuan tentang sistem global dan lokal untuk menjawab kebutuhan masyarakat* serta *pengetahuan tentang memiliki peran untuk menciptakan dan mempertahankan perubahan individual dan sistemik* karena keduanya berhubungan dengan struktur sosial, keadilan, serta partisipasi individu dalam kehidupan bermasyarakat. Dimensi sosial juga tercermin dari indikator *knowledge of skills* dengan sub-indikator *keterampilan bekerja sama dengan orang lain* dan *keterampilan pribadi* karena menekankan terhadap pentingnya kolaborasi, komunikasi, empati, dan refleksi diri dalam mendukung keberlanjutan. Selain itu, indikator *mindset* juga termasuk ke dalam dimensi sosial karena berkaitan dengan nilai, kepedulian, dan komitmen individu untuk berkontribusi dalam menyelesaikan masalah keberlanjutan.

Adapun dimensi ekonomi tercermin dalam indikator *knowledge* dengan sub-indikator *pengetahuan tentang sistem global dan lokal untuk menjawab kebutuhan masyarakat* karena sub-indikator ini juga meliputi aktivitas produksi, distribusi, dan konsumsi dalam sistem ekonomi. Selain itu, indikator *knowledge of skills* dengan sub-indikator *keterampilan dalam berpikir dan bertindak secara sistematis* termasuk ke dalam dimensi ekonomi karena mendukung kemampuan untuk melakukan perencanaan strategis dan pengambilan keputusan yang bijak dalam konteks keberlanjutan ekonomi (Décamps *et al.*, 2017).

2.1.2.3 Urgensi *Sustainability Literacy* dalam Menghadapi Isu Lingkungan

Sustainability literacy memiliki peran penting dalam menghadapi isu-isu lingkungan yang semakin kompleks. Literasi ini tidak hanya berperan sebagai sarana transfer pengetahuan, tetapi juga sebagai kemampuan yang dapat mendorong peserta didik untuk membentuk identitas pro-lingkungan, memahami permasalahan lingkungan secara kritis, dan mampu mencari solusi yang relevan (Riyadi *et al.*, 2025; Wheaton *et al.*, 2024). Melalui *sustainability literacy*, peserta didik pun tidak hanya diajak untuk mengetahui isu-isu seperti perubahan iklim atau kerusakan ekosistem, tetapi juga untuk mengembangkan kesadaran serta

keterampilan yang diperlukan agar dapat terlibat aktif dalam menjaga keberlanjutan lingkungan (Ardoïn *et al.*, 2023; Sani *et al.*, 2025).

Lebih lanjut, *sustainability literacy* menjadi sangat penting karena isu lingkungan yang dihadapi saat ini menuntut peserta didik untuk mampu mengambil keputusan yang tepat dan bertanggung jawab. Filho *et al.*, (2020) menegaskan bahwa kompleksitas permasalahan global, mulai dari perubahan iklim, keterbatasan sumber daya, hingga degradasi ekosistem, tidak bisa dipahami secara terpisah dan membutuhkan cara pandang yang sistemik. Hal ini menunjukkan bahwa peserta didik tidak cukup hanya mengenali permasalahan secara umum, tetapi juga perlu dilatih untuk melihat hubungan antarfaktor yang saling memengaruhi dalam sebuah sistem keberlanjutan.

Menurut Losa *et al.*, (2025), *sustainability literacy* dapat ditingkatkan dengan mengintegrasikan aspek kognitif dan konatif dalam proses pembelajaran. Dari sisi kognitif, pemahaman yang memadai tentang isu keberlanjutan dapat diperoleh melalui kurikulum maupun kegiatan belajar yang menekankan keterlibatan langsung dengan tantangan keberlanjutan di dunia nyata. Sementara itu, dari sisi konatif diperlukan juga kemauan dan kesiapan peserta didik untuk bertindak sesuai dengan kemampuan tersebut. Oleh karena itu, pembelajaran seperti *experiential learning* dapat menjadi faktor penting dalam membantu menghubungkan konsep keberlanjutan dengan praktik nyata. Nasrudin *et al.*, (2022) juga menegaskan bahwa dukungan berupa mata pelajaran khusus, pengembangan bahan ajar, dan penerapan model pembelajaran yang mengangkat *socioscientific issues* juga terbukti efektif dalam memperkuat *sustainability literacy*. Dengan demikian, kombinasi antara pengetahuan, pengalaman praktis, dan keterlibatan dalam isu-isu nyata di lingkungan sekitar dapat secara signifikan meningkatkan *sustainability literacy* yang penting dimiliki oleh peserta didik.

2.1.3 Keterampilan Argumentasi Ilmiah

2.1.3.1 Pengertian Keterampilan Argumentasi Ilmiah

Keterampilan argumentasi ilmiah (*scientific argumentation*) merupakan salah satu kompetensi penting yang perlu dikembangkan dalam proses pembelajaran sains. Menurut Toulmin (2003), keterampilan argumentasi ilmiah

merupakan kemampuan individu untuk memahami, menyusun, dan mengevaluasi argumen yang digunakan dalam ilmu pengetahuan dengan melibatkan aspek empiris, logis, dan historis. Keterampilan ini tidak hanya mengandalkan logika formal, tetapi juga memperhatikan konteks dan penalaran yang sah dalam sains. Toulmin menegaskan bahwa argumen ilmiah memiliki struktur yang mencakup *claim*, *data/evidence*, *warrant*, *backing*, *qualifier*, dan *rebuttal*. Struktur tersebut memungkinkan individu untuk dapat menilai kekuatan maupun keterbatasan sebuah argumen secara kritis dan terbuka terhadap revisi sesuai perkembangan pengetahuan ilmiah.

Lebih lanjut, Öztürk & Doğanay (2019) menegaskan bahwa keterampilan argumentasi ilmiah merupakan proses sistematis yang mencakup beberapa tahap fundamental. Proses ini dimulai dengan mengajukan suatu klaim (*claim*), kemudian disertai oleh alasan atau jaminan yang mendukung klaim tersebut (*warrant*), dan dilanjutkan dengan penyajian bukti (*evidence*) yang menguatkan alasan itu. Tidak hanya itu, keterampilan ini juga melibatkan kemampuan untuk merancang kontra-klaim dan kontra-jaminan (*counter-claim and counter-warrant*), serta menyusun sanggahan atau tanggapan (*rebuttal*) atas kontra argumentasi tersebut.

Namun, konsep keterampilan argumentasi ilmiah seringkali disamakan dengan keterampilan penjelasan ilmiah. Hal ini terbukti dari hasil penelitian Aydeniz & Ozdilek (2015) yang menunjukkan 85% guru belum memahami secara tepat perbedaan kedua konsep tersebut. Pada penelitian yang sama, dijelaskan bahwa keterampilan argumentasi ilmiah merupakan keterampilan untuk mempertahankan suatu klaim ketika terdapat lebih dari satu klaim atau hipotesis muncul lalu saling bersaing untuk diakui sebagai pengetahuan ilmiah. Dalam situasi ini, individu memanfaatkan bukti dan teori yang relevan untuk memperkuat sekaligus menolak berbagai klaim, sehingga hanya klaim yang paling valid yang dapat diterima. Sementara itu, keterampilan penjelasan ilmiah merujuk pada keterampilan untuk menjelaskan pengetahuan yang sudah diterima secara luas sebagai fakta yang valid karena telah dibuktikan melalui metode ilmiah dan dukungan bukti yang kuat.

Berdasarkan uraian di atas, maka keterampilan argumentasi ilmiah dapat dipahami sebagai kemampuan berpikir kritis yang menuntut peserta didik untuk menyusun klaim yang didukung dengan bukti, alasan, serta sanggahan yang relevan. Keterampilan ini berperan penting dalam proses pembelajaran karena membantu peserta didik untuk mengontruksi pengetahuan dan mengevaluasi berbagai perspektif. Dengan demikian, argumentasi ilmiah bukan sekadar menyampaikan pendapat, melainkan merupakan rangkaian langkah berpikir yang terstruktur, dinamis, dan berbasis bukti, yang memungkinkan pengembangan, pembelaan, dan revisi argumen secara rasional dan valid.

2.1.3.2 Indikator Keterampilan Argumentasi Ilmiah

Keterampilan argumentasi ilmiah merupakan kemampuan individu dalam menyusun, menyampaikan, serta mengevaluasi argumen berdasarkan bukti dan penalaran ilmiah yang logis (Erduran & Jiménez-Aleixandre, 2007). Untuk mengetahui kualitas argumentasi ilmiah, diperlukan indikator yang dapat dijadikan acuan dalam mengukur setiap komponen penyusunnya. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa indikator keterampilan argumentasi ilmiah telah banyak mengacu pada model TAP. Model ini diperkenalkan oleh Toulmin (2003) dengan enam komponen utama yang saling berkaitan serta memberikan gambaran bagaimana sebuah argumen dibangun dan dinilai yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Indikator Keterampilan Argumentasi Ilmiah dengan Model TAP

No.	Indikator	Deskripsi Indikator
1.	<i>Claim</i>	Kesimpulan atau pernyataan yang ingin dibuktikan atau diterima.
2.	<i>Data</i>	Fakta, bukti, atau informasi yang mendukung <i>claim</i>
3.	<i>Warrant</i>	Alasan atau prinsip yang menghubungkan <i>data</i> dengan <i>claim</i> . <i>Warrant</i> juga berfungsi untuk menjelaskan mengapa <i>data</i> memberikan dukungan yang valid pada <i>claim</i> .
4.	<i>Backing</i>	Dukungan tambahan atau justifikasi bagi <i>warrant</i> , misalnya melalui teori, prinsip ilmiah, atau otoritas yang memberikan kekuatan pada pembedaan dalih tersebut.
5.	<i>Qualifier</i>	Ekspresi yang menunjukkan tingkat kekuatan atau kepastian <i>claim</i> dengan menunjukkan batasan atau kondisi tertentu di mana <i>claim</i> berlaku.
6.	<i>Rebuttal</i>	Kemungkinan kondisi atau pengecualian yang dapat menolak atau melemahkan <i>claim</i> yang dibuat. Komponen ini adalah

No.	Indikator	Deskripsi Indikator
		pengakuan bahwa <i>claim</i> tidak mutlak dan ada situasi di mana <i>claim</i> bisa jadi tidak benar atau tidak berlaku.

Sumber: Toulmin (2003)

Lebih lanjut, model TAP menekankan bahwa argumen tidak selalu bersifat deduktif dan pasti, melainkan banyak argumen yang bersifat sangat bergantung pada konteks, probabilitas, dan kualifikasi. Indikator dalam model ini mampu menangani argumen yang bersifat praktis dan empiris, seperti dalam ilmu pengetahuan, hukum, dan debat sosial, dengan mengakui bahwa argumen sering dihadapkan pada kondisi ketidakpastian serta pengecualian. Oleh karena itu, Toulmin mengkritik model logika formal tradisional yang terlalu kaku dan tidak memperhitungkan aspek-aspek operasional serta kontingensi dalam argumen nyata (Toulmin, 2003).

Penelitian oleh Zairina & Hidayati (2022) menunjukkan bahwa model TAP dapat digunakan sebagai dasar analisis keterampilan argumentasi ilmiah pada peserta didik di jenjang SMP. Sementara itu, penelitian terbaru oleh Darang *et al.*, (2023) menunjukkan bahwa indikator yang digunakan dalam mengukur keterampilan argumentasi ilmiah peserta didik SMA di Filipina juga merujuk pada model TAP. Hasil penelitian tersebut menegaskan bahwa TAP efektif digunakan untuk memprofilkan tingkat keterampilan argumentasi ilmiah peserta didik, sekaligus memberikan gambaran tentang bagaimana peserta didik membangun argumen ilmiah mereka. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa indikator keterampilan argumentasi ilmiah dalam berbagai penelitian sains konsisten merujuk pada model TAP.

2.1.3.3 Urgensi Keterampilan Argumentasi Ilmiah dalam Menghadapi Isu-isu Sosial dan Ilmiah

Keterampilan argumentasi ilmiah merupakan kompetensi penting dalam menghadapi isu-isu sosial dan ilmiah yang semakin kompleks. Pengembangan keterampilan argumentasi ilmiah menjadi semakin mendesak karena dapat membantu peserta didik untuk menganalisis dan menyelesaikan permasalahan nyata yang berkaitan dengan isu-isu ilmiah maupun sosial di masyarakat (Dawson & Carson, 2020). Hal ini karena keterampilan argumentasi ilmiah mampu

mendorong peserta didik untuk menggunakan teori, data, dan bukti ilmiah untuk mendukung, menolak, atau mengonfirmasi sebuah klaim (Illahi *et al.*, 2024). Keterampilan argumentasi ilmiah juga dapat membekali peserta didik dengan kemampuan berpikir kritis dan reflektif yang sangat dibutuhkan dalam pengambilan keputusan terkait isu-isu sosio-ilmiah (Christenson *et al.*, 2014; Sadler *et al.*, 2016). Oleh karena itu, keterampilan argumentasi ilmiah memiliki peran yang sangat penting dalam membekali peserta didik untuk menghadapi isu-isu sosial dan ilmiah secara kritis sehingga mereka mampu mengambil keputusan yang bertanggung jawab dalam kehidupan nyata.

Menurut Illahi *et al.*, (2024) keterampilan argumentasi ilmiah dapat ditingkatkan melalui penerapan model pembelajaran seperti *SMART-Problem Solving* dalam konteks *socioscientific issues* karena memungkinkan peserta didik untuk dapat berlatih menyampaikan argumen secara lisan maupun tulisan, melakukan refleksi, dan menguji pemahaman konseptualnya, sehingga keterampilan argumentasi ilmiah bisa berkembang secara bertahap. Sejalan dengan penelitian tersebut, Sulistina *et al.*, (2024) menegaskan bahwa penggunaan konteks *socioscientific issues* terbukti mampu meningkatkan relevansi pembelajaran, mendorong peserta didik untuk menyusun argumen berbasis bukti, serta memperdalam pemahaman epistemik mereka tentang sifat ilmu pengetahuan. Dengan demikian, penerapan model pembelajaran yang terintegrasi dengan konteks *socioscientific issues* dapat meningkatkan keterampilan argumentasi ilmiah yang penting dimiliki oleh peserta didik.

2.1.4 Model Problem Based Learning Berbasis Socioscientific Issues

2.1.4.1 Pengertian Model Problem Based Learning

Menurut Barrows & Tamblyn (1980), model *problem based learning* adalah sebuah model pembelajaran di mana proses belajar dimulai dengan dihadapkan pada sebuah masalah yang belum terselesaikan, membingungkan, atau belum dipahami. Masalah tersebut menjadi fokus dan rangsangan bagi peserta didik untuk mengembangkan keterampilan pemecahan masalah dan penalaran, serta melakukan pencarian atau studi informasi yang diperlukan untuk memahami mekanisme penyebab masalah dan bagaimana cara menyelesaikannya. Lebih lanjut, model

problem based learning juga bukan sekadar menjawab pertanyaan atau menerapkan prinsip yang sudah diketahui, melainkan proses belajar aktif yang berpusat pada peserta didik.

Sementara itu, menurut Rahmayanti (2017), *problem based learning* merupakan suatu model yang berlandaskan pada pandangan konstruktivistik dengan ciri utama kontekstual, kolaboratif, menumbuhkan kesadaran metakognitif, serta mendorong keterampilan pemecahan masalah. Melalui *problem based learning*, maka peserta didik berkesempatan untuk memperoleh pengalaman belajar yang bermakna sehingga kemampuan berpikir tingkat tinggi dapat berkembang melalui aktivitas pemecahan masalah. *Problem based learning* juga menempatkan peserta didik pada situasi yang menantang berupa permasalahan nyata yang bersifat tidak terstruktur (*ill-structured*) atau terbuka (*open-ended*) yang dihadirkan sebagai stimulus dalam proses pembelajaran.

Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa model *problem based learning* merupakan model pembelajaran yang berlandaskan pada paradigma konstruktivistik dengan menekankan keterlibatan aktif peserta didik dalam memecahkan permasalahan nyata yang bersifat kompleks, tidak terstruktur, atau terbuka. Model ini tidak hanya berfokus pada pencarian jawaban, tetapi juga pada proses berpikir kritis, pengembangan keterampilan pemecahan masalah, kolaborasi, serta kesadaran metakognitif. Dengan demikian, *problem based learning* dapat dipandang sebagai salah satu strategi pembelajaran yang efektif untuk meningkatkan kualitas pendidikan, mengembangkan kemampuan berpikir tingkat tinggi, serta mempersiapkan peserta didik dalam menghadapi tantangan dan dinamika kehidupan di dunia nyata.

2.1.4.2 Karakteristik dan Sintaks Model *Problem Based Learning*

Menurut Barret (2017), terdapat beberapa karakteristik utama yang menegaskan keunikan sekaligus kekuatan *problem based learning*:

- 1) Masalah sebagai pemicu pembelajaran;

Problem Based Learning selalu diawali dengan penyajian masalah nyata yang bersifat autentik sebelum peserta didik menerima materi dari kurikulum lainnya. Barret menekankan bahwa masalah dalam *problem based learning*

berperan sebagai “*provoker of a liminal space*”, yakni ruang transisi yang mendorong peserta didik untuk bergerak dari pengetahuan lama menuju pengetahuan baru, sekaligus dari identitas yang ada menuju identitas akademik maupun profesional yang lebih berkembang. Oleh karena itu, supaya lebih bermakna, masalah harus dirancang sedekat mungkin dengan praktik profesional, sehingga peserta didik dapat menghubungkan dan mengingat kembali pembelajaran mereka dalam konteks kehidupan nyata.

- 2) Diskusi kelompok dalam *problem based learning* sebagai ruang dialog untuk belajar;

Diskusi kelompok berperan penting dalam keseluruhan proses *problem based learning* karena menjadi wadah utama peserta didik untuk membahas permasalahan yang diberikan. Pada awal diskusi, peserta didik dapat memanfaatkan pengetahuan awal mereka untuk menganalisis masalah sekaligus merumuskan isu-isu pembelajaran yang perlu ditelusuri lebih lanjut secara mandiri. Selanjutnya, peserta didik dapat mempresentasikan hasil studi independen, saling melengkapi informasi, serta membangun pemahaman bersama atau *co-elaboration*. Peserta didik juga dapat melakukan kegiatan refleksi dan evaluasi, baik terhadap jalannya proses maupun pengetahuan yang telah diperoleh.

- 3) Proses *problem based learning* yang terstruktur dan memberikan *scaffolding*;

Penerapan model *problem based learning* bukan hanya memberikan masalah untuk dikerjakan oleh peserta didik, melainkan melibatkan mekanisme yang sistematis. Setiap masalah dalam *problem based learning* minimal memerlukan dua sesi diskusi kelompok yang disertai studi mandiri. Struktur ini berfungsi sebagai *scaffolding* yang memungkinkan peserta didik keluar dari zona nyaman mereka, kemudian berkembang menuju penguasaan pengetahuan dan keterampilan yang lebih kompleks.

- 4) Pembelajaran berpusat pada peserta didik sebagai fokus utama.

Esensi dari *problem based learning* adalah menempatkan pembelajaran yang berpusat pada peserta didik, bukan hanya aktivitas pengajaran oleh guru. Belajar dipandang sebagai kegiatan yang menantang sekaligus menyenangkan,

atau disebut Barret sebagai *hard fun*. Melalui proses ini, maka peserta didik tidak hanya dilatih secara kognitif, tetapi juga didorong untuk menumbuhkan kreativitas, kesadaran penuh (*mindfulness*), serta keterlibatan aktif dalam pembelajaran.

Berdasarkan uraian di atas, karakteristik model *problem based learning* tidak hanya menekankan pada penggunaan masalah, tetapi juga menuntut ada tahapan pembelajaran yang sistematis. Oleh karena itu, diperlukan sintaks *problem based learning* yang dapat menjadi acuan dalam mengorganisasi langkah-langkah pembelajaran. Menurut Arends (2012) terdapat lima tahapan *problem based learning*.

1) Orientasi peserta didik pada masalah;

Pada tahap awal, guru menyampaikan tujuan pembelajaran sekaligus memperkenalkan masalah yang akan dikaji. Masalah tersebut sebaiknya menarik, autentik, dan mampu menumbuhkan rasa ingin tahu. Guru juga perlu menekankan bahwa tujuan utama bukan sekadar menghafal informasi, melainkan melatih peserta didik untuk berpikir kritis, mampu memecahkan masalah, serta mampu belajar secara mandiri.

2) Mengorganisasi peserta didik untuk belajar;

Arends menjelaskan bahwa pada tahap ini, peserta didik dibagi ke dalam kelompok belajar dan dibimbing untuk merencanakan penyelidikan. Guru membantu peserta didik untuk mendefinisikan sub-topik, membagi tugas, serta menyusun alur kegiatan dengan jadwal yang jelas. Tahap ini menekankan pentingnya kerjasama, tanggung jawab, dan pembagian peran dalam kelompok.

3) Membantu investigasi mandiri dan kelompok;

Dalam bukunya, Arends menegaskan bahwa tahap inti dari model *problem based learning* adalah penyelidikan. Peserta didik mengumpulkan data dari berbagai sumber, melakukan eksperimen, hingga menyusun hipotesis dan solusi. Sementara itu, guru berperan sebagai fasilitator yang mendorong peserta didik untuk aktif bertanya, berpikir kritis, dan menguji kelayakan solusi yang diajukan, baik secara individu maupun kelompok.

4) Mengembangkan dan mempresentasikan hasil;

Pada tahap ini, hasil penyelidikan kemudian diwujudkan dalam bentuk produk atau karya, seperti laporan, poster, model, video, atau presentasi. Produk ini dipamerkan melalui pameran, presentasi kelas, maupun media lain agar peserta didik dapat berbagi hasil temuannya dan memperoleh umpan balik dari guru maupun teman sebaya.

5) Menganalisis dan mengevaluasi proses pemecahan masalah.

Tahap terakhir adalah refleksi, di mana peserta didik menganalisis kembali proses berpikir dan langkah-langkah penyelidikan yang telah dilakukan. Selain itu, peserta didik diajak untuk mengevaluasi pemahaman, alasan dibalik pilihan solusi, serta perbaikan yang bisa dilakukan di masa mendatang.

Berdasarkan uraian di atas, kelima tahapan tersebut menunjukkan bahwa model *problem based learning* tidak hanya berfokus pada pemecahan masalah, tetapi juga menekankan proses kolaboratif, investigatif, dan reflektif. Dengan demikian, peserta didik tidak hanya memperoleh pengetahuan, tetapi juga mengembangkan keterampilan berpikir kritis, kerja sama, serta kemandirian belajar.

2.1.4.3 Kelebihan Model *Problem Based Learning*

Model *problem based learning* memiliki beberapa kelebihan, salah satunya yaitu dapat meningkatkan hasil belajar. Dalam model ini, peserta didik ditempatkan sebagai pusat proses pembelajaran sehingga mereka tidak hanya menerima informasi dari guru, tetapi juga aktif terlibat dalam kegiatan belajar (Nurhayati *et al.*, 2025). Keterlibatan tersebut diwujudkan melalui aktivitas pemecahan masalah yang memberikan kesempatan bagi peserta didik untuk mencari, mengevaluasi, dan mengolah informasi. Oleh karena itu, dalam proses pembelajaran menggunakan model *problem based learning*, peserta didik tidak hanya menerima pengetahuan, tetapi juga membangun pemahaman yang lebih mendalam, bermakna, dan aplikatif (Utami & Setyaningsih, 2022).

Lebih lanjut, model *problem based learning* dapat meningkatkan motivasi, kemandirian, dan melatih keterampilan abad ke-21 yang mencakup 4C (*critical thinking, creativity, collaboration, dan communication*). Melalui tahapan

pembelajaran yang menekankan pada masalah nyata, peserta didik dapat termotivasi untuk aktif, bertanggung jawab, dan bersemangat dalam mencari solusi secara mandiri (Meilasari & Yelianti, 2020). Dalam prosesnya, peserta didik juga dapat mengembangkan keterampilan berpikir kritis, kreatif, dan kemampuan pemecahan masalah yang penting dalam menghadapi tantangan kehidupan nyata (Aripin *et al.*, 2021). Selain itu, peserta didik dilatih untuk berkolaborasi dalam kelompok, berbagi gagasan, serta mengomunikasikan hasil pemikirannya secara jelas kepada orang lain (Youna *et al.*, 2023). Dengan demikian, penerapan model *problem based learning* dapat memberikan dasar yang kuat bagi peserta didik agar dapat menjadi generasi adaptif, inovatif, dan mampu berkompetisi secara global.

2.1.4.4 Kekurangan Model *Problem Based Learning*

Meskipun memiliki kelebihan, model *problem based learning* juga memiliki sejumlah keterbatasan. Salah satu keterbatasannya terletak pada jenis permasalahan yang diangkat dalam proses pembelajaran. Masalah yang digunakan dalam model *problem based learning* umumnya masih bersifat akademis dan cenderung jauh dari permasalahan sosial nyata yang dihadapi oleh masyarakat (Smith *et al.*, 2022). Selain itu, model *problem based learning* sering kali dibatasi oleh kerangka disiplin ilmu tertentu, sehingga ruang untuk mengintegrasikan pengetahuan lintas bidang menjadi lebih sempit. Kondisi ini berpotensi mengurangi kesempatan peserta didik untuk belajar meninjau permasalahan dari berbagai perspektif (Guerra, 2017). Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengembangkan penerapan model *problem based learning* dengan menyajikan masalah yang lebih kontekstual, dekat dengan kehidupan sehari-hari, serta terbuka untuk dikaji melalui berbagai sudut pandang.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah dengan menerapkan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues*. Pendekatan *socioscientific issues* dalam model *problem based learning* memungkinkan penyajian masalah yang lebih kontekstual, kompleks, dan mengandung dimensi lingkungan, sosial, ekonomi, budaya, politik, dan etika (Viehmann *et al.*, 2024). Dengan demikian, melalui integrasi pendekatan *socioscientific issues* dalam model *problem based learning*, peserta didik tidak

hanya diarahkan untuk memecahkan masalah secara konseptual, tetapi juga dilatih supaya dapat mempertimbangkan berbagai sudut pandang dalam berargumen dan menyikapi sebuah masalah keberlanjutan.

2.1.4.5 Pengertian *Socioscientific Issues*

Socioscientific issues merupakan topik-topik ilmiah yang sengaja digunakan dalam pembelajaran untuk mendorong peserta didik terlibat dalam dialog, diskusi, dan debat. Topik ini biasanya bersifat kontroversial dan tidak terstruktur sehingga menuntut adanya penalaran moral atau evaluasi aspek etis dalam mengambil keputusan mengenai penyelesaian isu tersebut (Zeidler & Nichols, 2009). Adapun tujuan dari penggunaan isu semacam ini adalah supaya peserta didik merasa terhubung secara personal, tertarik, menggunakan penalaran berbasis bukti, serta memperoleh konteks untuk memahami informasi ilmiah (Sadler, 2004; Zeidler, 2003). Oleh karena itu, *socioscientific issues* tidak hanya dipandang sebagai isu sains yang bersifat kontroversial, tetapi juga sebagai sarana pembelajaran yang menekankan keterkaitan antara aspek ilmiah, moral, dan etika.

Sejalan dengan penelitian sebelumnya, Rubini *et al.*, (2019) menjelaskan bahwa *socioscientific issues* adalah konteks masalah yang menggabungkan pengetahuan ilmiah dan kesadaran sosial sehingga menimbulkan konflik mental yang membutuhkan literasi sains untuk membuat keputusan yang bertanggung jawab. Lebih lanjut, dalam konteks pembelajaran Purwaningrum & Fauziah (2021) menegaskan bahwa *socioscientific issues* merupakan salah satu pendekatan dalam pembelajaran sains yang menghubungkan konsep-konsep ilmiah dengan permasalahan nyata di masyarakat. Melalui pendekatan ini, peserta didik dapat dilatih untuk memahami sains secara konseptual, memecahkan permasalahan sosial yang berhubungan dengan sains, serta mengemukakan argumentasi secara tepat.

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa *socioscientific issues* merupakan salah satu pendekatan pembelajaran sains yang memanfaatkan isu-isu nyata dan kontroversial di masyarakat sebagai konteks untuk belajar. Pendekatan ini tidak hanya mengintegrasikan aspek ilmiah dengan dimensi sosial, moral, dan etika, tetapi juga mendorong peserta didik untuk dapat berpikir kritis,

mengambil keputusan secara bertanggung jawab, serta melatih keterampilan argumentasi berbasis bukti.

2.1.4.6 Karakteristik *Socioscientific Issues*

Socioscientific issues memiliki sejumlah karakteristik utama yang menjadikannya berbeda dari topik pembelajaran sains biasa. *Socioscientific issues* bersifat kontroversial dan terbuka untuk diperdebatkan karena tidak memiliki jawaban tunggal, sehingga mendorong terjadinya dialog dan diskusi yang mendalam. Selain itu, isu ini menghubungkan aspek ilmiah dengan dimensi sosial, etika, dan politik, sehingga menuntut pemahaman lintas disiplin (Zeidler, 2003). *Socioscientific issues* juga memiliki konsekuensi yang nyata, baik pada tingkat individu maupun masyarakat. Tidak hanya itu, *socioscientific issues* mendorong keterlibatan aktif peserta didik sekaligus mengasah keterampilan berpikir kritis dan reflektif, sehingga peserta didik lebih siap menghadapi isu-isu nyata dalam kehidupan sehari-hari (Zeidler & Nichols, 2009).

Selanjutnya, *socioscientific issues* memiliki dasar ilmiah yang kuat, sehingga isu yang diangkat selalu berlandaskan pada konsep sains yang relevan. Isu-isu ini juga sering menjadi sorotan media, sehingga lebih kontekstual dengan kehidupan peserta didik. Lebih lanjut, *socioscientific issues* memberikan konteks yang menghubungkan konsep sains dengan kehidupan sehari-hari sehingga pembelajaran menjadi lebih bermakna (Ratcliffe & Millar, 2009). Sejalan dengan hal itu, Rahayu (2019) menegaskan bahwa *socioscientific issues* bersifat dilematis karena mengandung pertimbangan moral dan etika yang harus dipertimbangkan dalam mengambil keputusan. Dengan demikian, karakteristik *socioscientific issues* yang diterapkan dalam proses pembelajaran tidak hanya dapat menjadi sarana yang efektif untuk menumbuhkan kepekaan sosial peserta didik, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan yang bertanggung jawab.

2.1.4.7 Model *Problem Based Learning* Berbasis *Socioscientific Issues*

Model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* merupakan model pembelajaran berbasis masalah yang dipadukan dengan isu sosial-ilmiah yang kontroversial, aktual, dan relevan. Model ini mendorong peserta didik untuk secara aktif terlibat dalam proses pembelajaran dengan mengidentifikasi,

menganalisis, dan memecahkan masalah yang berkaitan dengan isu-isu sosial ilmiah (Handayani *et al.*, 2024). Proses pembelajaran menggunakan model dan pendekatan ini dilakukan secara aktif dan interaktif, sehingga membuat pembelajaran menjadi lebih kontekstual, bermakna, dan menarik. Integrasi model *problem based learning* dengan *socioscientific issues* dianggap lebih unggul dibandingkan penggunaan model *problem based learning* atau pendekatan *socioscientific issues* yang dilakukan secara terpisah karena peserta didik dapat dilatih untuk berpikir kritis serta peduli terhadap permasalahan lingkungan yang berkaitan dengan bidang ekonomi serta sosial dalam kehidupan sehari-hari (Rery & Rahmasari, 2023).

Dalam proses pembelajaran dengan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues*, isu-isu sosial ilmiah sebagai konteks atau masalah dunia nyata digunakan sepanjang proses pembelajaran. Artinya, *socioscientific issues* menjadi fokus utama dalam setiap tahapan atau sintaks model *problem based learning*, sehingga peserta didik didorong untuk menganalisis, menyimpulkan, dan memecahkan permasalahan terkait isu sosial ilmiah tersebut dalam kelompoknya (Sintika, Hidayat, & Nugraha, 2024). Hal tersebut tercermin dalam proses pembelajaran yang menuntut peserta didik untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis dengan menggunakan isu-isu sosial sebagai konteks pembelajaran secara keseluruhan, bukan hanya pada satu tahap tertentu saja. Dengan demikian, pendekatan *socioscientific issues* tidak berdiri sendiri dalam proses pembelajaran, melainkan diterapkan secara menyeluruh pada semua sintaks model *problem based learning* (Permatasari & Aji, 2024). Adapun sintaks model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sintaks *Problem Based Learning* Berbasis *Socioscientific Issues*

Sintaks	<i>Problem Based Learning</i> Berbasis <i>Socioscientific Issues</i>
Orientasi peserta didik pada masalah	Guru menyajikan isu sosial-ilmiah yang kontroversial, aktual, relevan, serta terkait aspek moral dan etika.
Mengorganisasi peserta didik untuk belajar	Guru memberikan kebebasan kepada peserta didik untuk membentuk kelompok dan peserta didik menyusun rencana penyelidikan isu sosial-ilmiah secara kolaboratif serta mempertimbangkan aspek sosial dan etis.

Membimbing penyelidikan mandiri maupun kelompok	Peserta didik menyelidiki isu sosial-ilmiah melalui data/literatur, kemudian menyusun argumen berbasis bukti.
Mengembangkan dan menyajikan hasil karya	Peserta didik menyajikan solusi ilmiah beserta implikasi sosial, moral, dan etika, serta berargumentasi di forum diskusi kelas.
Menganalisis dan mengevaluasi proses pemecahan masalah	Refleksi terhadap argumen dan keputusan dengan mempertimbangkan berbagai perspektif dan tanggung jawab sosial.

Sumber: (Arends, 2012; Purwaningrum & Fauziah, 2021; Rahayu, 2019; Sadler, 2004; Zeidler, 2003; Zeidler & Nichols, 2009)

2.1.5 Deskripsi Materi Ekosistem

2.1.5.1 Pengertian Ekosistem

Ekosistem merupakan hubungan timbal balik antara komponen biotik (hidup) dan abiotik (tak hidup) di mana hubungan antarkomponen itu membentuk suatu sistem di alam. Konsep ini menegaskan bahwa makhluk hidup bukanlah entitas yang berdiri sendiri, melainkan merupakan bagian dari suatu jaringan interaksi yang kompleks dengan lingkungannya (Odum, 1996). Sejalan dengan hal tersebut, Soemarwoto (2018) menjelaskan bahwa ekosistem merupakan suatu sistem ekologi yang bekerja secara teratur sebagai suatu kesatuan. Keteraturan tersebut terjadi oleh adanya arus materi dan energi yang terkendalikan oleh arus informasi antara komponen dalam ekosistem tersebut. Masing-masing komponen tersebut memiliki fungsi atau relung. Selama setiap komponen tersebut melakukan fungsinya dan bekerja sama dengan baik, maka keteraturan ekosistem itu pun terjaga.

2.1.5.2 Komponen Ekosistem

Menurut Smith & Smith (2014), komponen utama ekosistem meliputi komponen biotik dan abiotik. Komponen biotik dalam ekosistem meliputi seluruh makhluk hidup yang terlibat dalam interaksi di dalamnya. Komponen ini mencakup beragam organisme, mulai dari tumbuhan, hewan, hingga mikroorganisme seperti bakteri dan jamur (Campbell *et al.*, 2008). Sementara itu, komponen abiotik merujuk pada unsur-unsur non-hidup dalam suatu ekosistem yang memengaruhi

terhadap keberlangsungan hidup organisme dan interaksi di dalamnya. Beberapa komponen abiotik dalam ekosistem yaitu air, suhu dan kelembaban, udara, cahaya matahari, serta tanah (Campbell *et al.*, 2008).

2.1.5.3 Interaksi Antar Komponen Ekosistem

Komponen biotik dan abiotik dalam ekosistem saling berinteraksi dan membentuk suatu sistem yang seimbang. Secara umum, interaksi ekosistem dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu interaksi biotik-biotik, biotik-abiotik, dan abiotik-abiotik.

1) Interaksi Biotik-Biotik

Interaksi biotik-biotik merupakan hubungan antar organisme hidup dalam suatu ekosistem. Bentuk interaksi ini meliputi kompetisi, predasi, dan simbiosis.

a. Kompetisi

Kompetisi antar spesies merupakan interaksi yang terjadi ketika individu-individu dari spesies yang berbeda bersaing untuk memperebutkan sumber daya yang membatasi pertumbuhan dan kesintasan mereka (Campbell *et al.*, 2008). Contoh dari kompetisi ini dapat dilihat dari interaksi antar populasi, yaitu ketika populasi gulma bersaing dengan populasi tumbuhan kebun untuk memperebutkan sumber daya yang sama, seperti nutrisi tanah dan air sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Gulma di Perkebunan Sawit
Sumber: (Admingnewstv, 2023)

b. Predasi

Predasi pada dasarnya merupakan interaksi antar populasi dari dua spesies yang berbeda, yaitu populasi predator dan populasi mangsa. Meskipun secara fisik interaksi tersebut tampak seperti interaksi antar individu, seperti singa yang menyerang dan memakan sapi liar yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, tetapi dampaknya secara ekologis terjadi pada tingkat populasi. Konsep predasi juga berlaku untuk berbagai macam interaksi, termasuk hewan yang membunuh tumbuhan dengan memakan jaringan tumbuhan juga dapat dianggap memangsa (Campbell *et al.*, 2008).



Gambar 2.3 Singa Menyerang dan Memakan Sapi Liar sebagai Mangsanya
Sumber: (Pchoui, 2018)

c. Simbiosis

Menurut Campbell *et al.*, (2008), simbiosis merupakan interaksi ketika individu dari dua atau lebih spesies hidup dalam kontak langsung dan akrab satu sama lain. Hubungan interaksi tersebut bisa berbahaya, bermanfaat, atau netral. Berikut ini merupakan macam-macam simbiosis:

a) Simbiosis Mutualisme

Simbiosis mutualisme merupakan interaksi antarspesies yang menguntungkan kedua spesies. Hubungan mutualistik terkadang melibatkan evolusi adaptasi-adaptasi yang terkait pada kedua spesies, dengan perubahan pada masing-masing spesies mungkin memengaruhi kesintasan dan reproduksi spesies yang satu lagi (Campbell *et al.*, 2008). Contoh hubungan simbiosis mutualisme adalah interaksi antara populasi lebah dengan populasi bunga yang bisa dilihat pada Gambar 2.4. Lebah hinggap pada bunga untuk memperoleh

nektar sebagai makanannya, sedangkan bunga yang dihinggapi terbantu dalam proses penyerbukan karena serbuk sarinya menempel pada kaki lebah yang berpindah-pindah hinggap ke bunga lain.



Gambar 2.4 Interaksi Lebah dan Bunga
Sumber: (Visual Econophysics, 2013)

b) Simbiosis Komensalisme

Simbiosis komensalisme merupakan interaksi antar populasi dari spesies yang berbeda, di mana interaksi tersebut hanya menguntungkan satu populasi tetapi tidak merugikan atau memberikan manfaat bagi populasi lainnya. Salah satu contoh simbiosis komensalisme dapat dilihat pada Gambar 2.5, di mana anggrek menempel pada batang pohon untuk mendapatkan cahaya dan udara, tetapi pohon tidak dirugikan (Puspitasari *et al.*, 2021).



Gambar 2.5 Anggrek yang Menempel pada Pohon
Sumber: (Ross, 2021)

c) Simbiosis Parasitisme

Simbiosis parasitisme merupakan interaksi antar populasi dari dua spesies yang berbeda, di mana organisme parasit memperoleh manfaat dari organisme lain, sedangkan organisme yang menjadi inangnya dirugikan dalam proses tersebut (Campbell *et al.*, 2008). Salah satu contoh interaksi parasitisme yaitu cacing pita yang berada pada tubuh manusia, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Cacing pita tersebut dapat memperoleh keuntungan dengan hidup di dalam inang, sementara inang mengalami kerugian karena terganggu fungsinya dan berisiko mengalami berbagai komplikasi kesehatan (Kaunang *et al.*, 2022).



Gambar 2.6 Cacing Pita pada Tubuh Manusia
Sumber: (Inspiredpencil, 2021)

2) Interaksi Biotik-Abiotik

Interaksi biotik-abiotik merupakan hubungan antara mikroorganisme hidup (tumbuhan, hewan, dan mikroba) dengan faktor lingkungan tak hidup (air, tanah, cahaya, suhu, mineral). Contoh interaksi ini yaitu tumbuhan yang memerlukan air, cahaya matahari, dan mineral tanah untuk melakukan proses fotosintesis dan pertumbuhan (Chamard *et al.*, 2024). Selain itu, hewan dan manusia juga memerlukan oksigen dari udara untuk melakukan respirasi (Smith & Smith, 2014). Interaksi antar komponen biotik dan abiotik ini sangat penting karena dapat menentukan kelangsungan hidup suatu organisme di dalam ekosistem.

3) Interaksi Abiotik-Abiotik

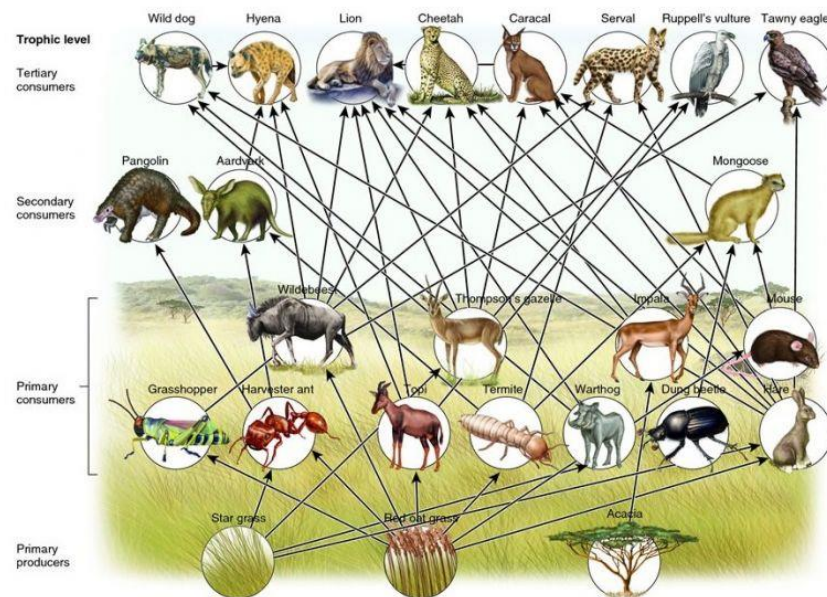
Interaksi abiotik-abiotik merupakan hubungan antar faktor fisik atau kimia dalam ekosistem. Contoh interaksi ini adalah proses pelapukan batuan yang dipengaruhi oleh suhu, air, dan angin. Selain itu, contoh interaksi antar komponen abiotik adalah siklus air yang melibatkan penguapan (evaporasi), pengembunan (kondensasi), dan presipitasi (hujan) (Salsabila & Nugraheni, 2020). Walaupun interaksi ini tidak melibatkan makhluk hidup, tetapi interaksi antar komponen abiotik dapat memengaruhi kelangsungan kehidupan organisme.

2.1.5.4 Aliran Energi dalam Ekosistem

Energi merupakan elemen penting dalam suatu ekosistem. Sumber energi tersebut berasal dari makanan dan aktivitas makan pada dasarnya merupakan proses perpindahan energi. Aliran energi antarorganisme dalam ekosistem digambarkan dengan rantai makanan dan jaring-jaring makanan (Smith & Smith, 2014).

1) Rantai Makanan dan Jaring-Jaring Makanan

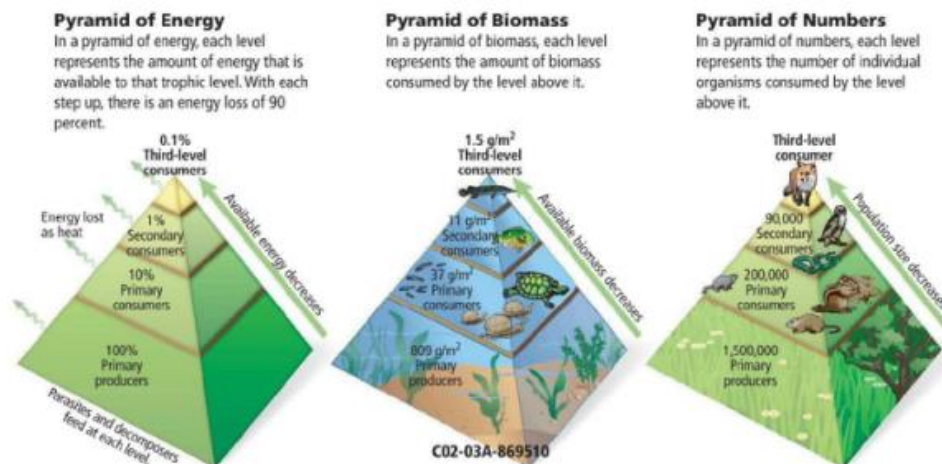
Rantai makanan merupakan proses perpindahan energi dalam ekosistem yang terjadi melalui hubungan makan dan dimakan antarorganisme (Smith & Smith, 2014). Rantai makanan pada dasarnya bukan merupakan urutan-urutan yang terpisah, melainkan bersambungan dengan satu dan yang lainnya. Pola yang saling berkaitan tersebut sering kali dikatakan sebagai jaring-jaring makanan (Odum, 1996). Adapun jaring-jaring makanan dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Jaring-Jaring Makanan
Sumber: (The Savana Biome, 2020)

2) Piramida Ekologi

Piramida ekologi adalah struktur trofik ekosistem yang menunjukkan distribusi energi, biomassa, atau jumlah organisme (Odum, 1996). Piramida ekologi terdiri dari tiga bentuk utama. Pertama, piramida jumlah yang menggambarkan jumlah individu organisme dalam setiap tingkat trofik, berbentuk tegak karena jumlah produsen sangat banyak, jumlah herbivora lebih sedikit, dan jumlah karnivora semakin sedikit (Odum, 1996). Kedua, piramida biomassa yang memberikan gambaran dari total massa hidup atau bahan organik (berat kering/gram atau kalori) pada setiap trofik, umumnya berbentuk tegak di mana produsen memiliki biomassa terbesar, diikuti oleh herbivora, lalu karnivora. Ketiga, piramida energi menunjukkan laju aliran energi atau produktivitas pada setiap tingkat trofik per satuan luas per satuan waktu (Campbell *et al.*, 2008). Ketiga bentuk piramida ekologi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Berbagai piramida ekologi: a) piramida energi; b) piramida biomassa; c) piramida jumlah.

Sumber: (Ansor, 2024)

Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa piramida jumlah menekankan pada populasi organisme, piramida biomassa menekankan pada materi hidup yang tersimpan, dan piramida energi menekankan pada fungsi ekosistem (aliran energi). Ketiga piramida ini saling melengkapi dalam menggambarkan bagaimana energi, materi, dan individu organisme terdistribusi dalam ekosistem.

2.1.5.5 Tipe-Tipe Ekosistem

1) Ekosistem Daratan/Terrestrial

Ekosistem daratan/terrestrial merupakan salah satu bentuk ekosistem utama di bumi yang dicirikan oleh dominasi tumbuhan sebagai produsen utama. Perbedaan kondisi iklim, terutama suhu dan curah hujan, menjadi faktor utama yang menentukan jenis vegetasi dominan serta keanekaragaman makhluk hidup di dalamnya (Smith & Smith, 2014). Oleh karena itu, ekosistem darat dapat dibedakan menjadi beberapa tipe utama, masing-masing dengan karakteristik khasnya.

a) Ekosistem Hutan Tropis

Hutan tropis terdapat di wilayah sekitar garis khatulistiwa, yaitu di antara 10° LU dan 10° LS. Di wilayah ini, suhu udara hangat sepanjang tahun dan hujan hampir turun setiap hari (Widodo *et al.*, 2021). Hutan tropis di bumi memiliki keanekaragaman tertinggi dibandingkan dengan bioma darat manapun. Hal ini karena hutan tropis menjadi rumah bagi jutaan spesies, termasuk spesies serangga, laba-laba, serta arthropoda yang belum

dideskripsikan dan diestimasi berjumlah 5-30 juta. Selain itu, terdapat pula berbagai jenis amfibia, burung dan reptil lain, arthropoda, serta mamalia teradaptasi terhadap lingkungan berlapis vertikal dan seringkali tersamarkan (Campbell *et al.*, 2008). Adapun ekosistem hutan tropis ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Ekosistem Hutan Tropis

Sumber: (Handoutset, 2025)

Hutan tropis memiliki lima lapisan tumbuhan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Lapisan pertama adalah lapisan pohon tertinggi (*emergent trees*) yang merupakan pohon-pohon raksasa menjulang. Lapisan kedua yaitu kanopi atas (*upper canopy*) yang membentuk atap hutan. Lalu, terdapat lapisan kanopi bawah (*lower canopy*) yang merupakan tumbuhan lebih pendek di bawah kanopi utama. Setelah itu, terdapat lapisan semak (*shrub understory*) yang merupakan semak dan tumbuhan kecil serta lapisan dasar (*ground layer*) yaitu tumbuhan bawah seperti pakis dan herba (Smith & Smith, 2014).



Gambar 2.10 Lima Lapisan Tumbuhan Hutan Tropis
Sumber: (Smith & Smith, 2014)

b) Ekosistem Hutan Gugur

Ekosistem hutan gugur memiliki ciri khas pepohonannya meranggas atau menggugurkan daun saat musim dingin tiba (Zid & Hadi, 2018). Hewan yang banyak ditemui di hutan gugur misalnya burung, serangga, bajing, dan rakun. Ketika musim gugur tiba, maka suhu dan cahaya matahari mulai berkurang sehingga daun berubah warna menjadi merah atau cokelat kemudian berguguran karena kekurangan air. Selanjutnya, saat musim dingin intensitas cahaya rendah dan kelembaban meningkat sehingga tumbuhan berhenti berfotosintesis. Beberapa mamalia pun melakukan hibernasi untuk bertahan hidup pada kondisi tersebut. Ketika musim semi tiba, maka suhu kembali menghangat, salju mencair, dan tumbuhan mulai bertunas kembali (Widodo *et al.*, 2021). Adapun ekosistem hutan gugur ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Ekosistem Hutan Gugur
Sumber: (Amin, 2018)

c) Ekosistem Sabana

Ekosistem sabana merupakan ekosistem khas daerah tropis dan subtropis kering yang memiliki curah hujan musiman. Ekosistem ini memiliki variasi bentuk vegetasi, mulai dari padang rumput terbuka hingga, semak belukar, dan sedikit pohon (Campbell *et al.*, 2008; Smith & Smith, 2014). Di ekosistem sabana, pepohonan biasanya teradaptasi dengan duri dan berdaun kecil karena menyesuaikan dengan kondisi yang relatif kering. Predator besar juga banyak ditemukan di sabana, misalnya singa, macan tutul, cheetah, hyena, dan anjing liar. Hewan pemakan bangkai seperti burung nasar dan serigala kecil juga hidup bergantung pada sisa-sisa mangsa tersebut (Smith & Smith, 2014). Adapun ekosistem sabana dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Ekosistem Sabana
Sumber: (Davies, 2012)

d) Ekosistem Taiga

Ekosistem taiga adalah ekosistem hutan yang luas dan berada di daerah beriklim dingin, tepatnya di antara zona subtropis dan kutub. Ekosistem ini memiliki ciri khas perbedaan suhu yang cukup ekstrem antara musim panas dan musim dingin. Saat musim panas, suhu bisa cukup tinggi, sedangkan pada musim dingin suhunya bisa sangat rendah (Zid & Hadi, 2018). Tumbuhan khas ekosistem ini yaitu pohon berdaun jarum atau pohon konifer, seperti pinus. Adapun hewan yang hidup di taiga antara lain beruang hitam, serigala, dan beberapa jenis burung migran. Selain itu, ada juga mamalia kecil seperti tupai yang biasanya melakukan hibernasi ketika musim dingin datang untuk bertahan

hidup dalam suhu yang sangat rendah (Widodo *et al.*, 2021). Adapun ekosistem taiga dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Ekosistem Taiga
Sumber: (Ecosostenibile, 2017)

e) Ekosistem Tundra

Ekosistem tundra merupakan dataran beku yang tersebar luas di kawasan Arktik dan mencakup sekitar 20% dari total permukaan dataran Bumi (Campbell *et al.*, 2008). Sebagian besar vegetasi tundra adalah herba, terdiri atas campuran lumut, rumput, *forb*, semak-semak kerdil, pohon, dan liken. Sementara itu, hewan yang ada di ekosistem tundra meliputi beruang, serigala, dan rubah yang merupakan pemangsa. Selain itu, ada karibu dan *reindeer* yang merupakan hewan pemigrasi. Banyak juga spesies burung bermigrasi ke tundra untuk bersarang di musim panas (Campbell *et al.*, 2008). Adapun ekosistem tundra dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Ekosistem Tundra
Sumber: (Portillo, 2024)

f) Ekosistem Gurun

Ekosistem gurun tersebar di beberapa wilayah dunia, seperti Australia, Amerika Utara, Asia Barat, dan Afrika Utara (Zid & Hadi, 2018). Vegetasi gurun didominasi oleh tumbuhan xerofit, yaitu tumbuhan yang mampu beradaptasi dengan kondisi kekeringan ekstrem seperti kaktus dan semak berakar dalam. Sementara itu, hewan yang ada di ekosistem ini antara lain jenis kadal dan ular, kalajengking, semut, unta, kumbang, burung pemigrasi dan penetap, serta pengerat pemakan biji (Campbell *et al.*, 2008). Adapun ekosistem gurun ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Ekosistem Gurun

Sumber: (Freepik, 2020)

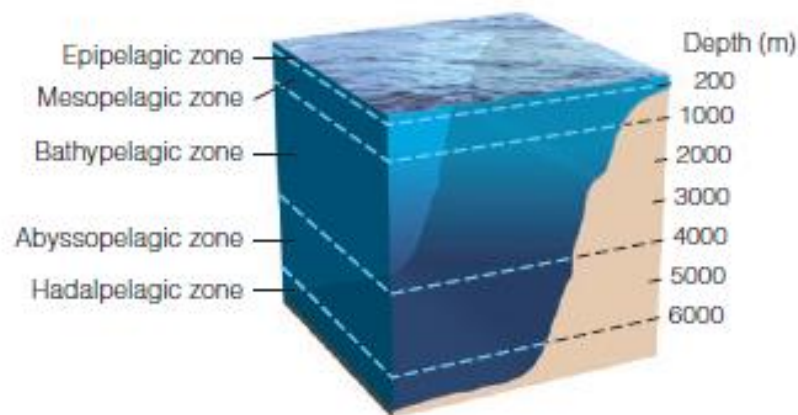
2) Ekosistem Perairan/Akuatik

Ekosistem perairan/akuatik merupakan sistem kehidupan yang berada di lingkungan perairan, tempat organisme berinteraksi dengan faktor fisik maupun biologis di sekitarnya. Ekosistem perairan terbagi menjadi dua kelompok utama, yaitu ekosistem air laut dan ekosistem air tawar (Smith & Smith, 2014).

a) Ekosistem Air Laut

Ekosistem air laut merupakan ekosistem yang terdapat di perairan asin dengan wilayah yang sangat luas, sehingga menjadi habitat utama bagi beragam biota laut, termasuk ganggang, terumbu karang, dan berbagai jenis hewan laut. Berdasarkan lapisan horizontalnya, laut dibagi menjadi beberapa zona, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16. Zona epipelagik merupakan lapisan permukaan hingga kedalaman 200 meter, tempat cahaya matahari masih cukup

banyak sehingga mendukung kehidupan tumbuhan laut. Zona mesopelagik terletak di kedalaman 200-1.000 meter, dihuni oleh organisme seperti ikan hiu. Lebih dalam lagi, terdapat zona batiopelagik yang berada di lereng benua dengan kedalaman 250-2.500 meter dan dapat menjadi habitat gurita. Selanjutnya, zona abisal pelagik yang mencapai kedalaman 4.000 meter, tidak menerima cahaya matahari sehingga tidak terdapat tumbuhan, tetapi tetap menjadi tempat hidup bagi beberapa jenis hewan. Terakhir, zona terdalam adalah hadal pelagik, yaitu lebih dari 7.000 meter, di mana ditemukan spesies ikan laut yang mampu menghasilkan cahaya sendiri (bioluminesensi) serta lele laut (Mitra & Zaman, 2016).



Gambar 2.16 Lapisan Zona Horizontal Laut
Sumber: (Smith & Smith, 2014)

(1) Ekosistem Pantai

Ekosistem pantai merupakan ekosistem peralihan yang terletak di antara ekosistem darat, wilayah pasang surut, dan laut (Mitra & Zaman, 2016). Ekosistem pantai memiliki hutan pantai dengan tingkat keanekaragaman tumbuhan yang cukup tinggi, seperti tumbuhan pandan laut (*Pandanus tectorius*), babakoan (*Scaevola frutescens*), dan bakung (*Crinum asiaticum*) (Widodo *et al.*, 2021). Selain hutan pantai, pada daratan pasang surut yang lebih dekat dengan laut terdapat hutan bakau (mangrove) (Widodo *et al.*, 2021). Adapun ekosistem pantai ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Ekosistem Pantai

Sumber: (Saragih, 2019)

(2) Ekosistem Terumbu Karang

Terumbu karang merupakan ekosistem kompleks yang tumbuh di perairan tropis dangkal dan hangat, terutama di sekitar pulau-pulau dan tepian benua (Odum, 1996). Karang sendiri merupakan hewan sederhana berbentuk polip silindris mirip anemon laut. Hidupnya berkoloni di atas kerangka karang mati dan bersimbiosis dengan *zooxanthellae* untuk menunjang pertumbuhannya. Kerangka karang juga menjadi habitat bagi berbagai organisme lain, seperti ganggang merah, hijau, filamen, bakteri, kerang raksasa, bulu babi, krustasea, cacing polychaeta, spons, serta beragam jenis ikan, sehingga membentuk ekosistem yang sangat kaya dan kompleks (Smith & Smith, 2014). Adapun ekosistem terumbu karang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Ekosistem Terumbu Karang
Sumber: (Cinoby, 2016)

(3) Ekosistem Estuari

Ekosistem estuari atau muara merupakan kawasan transisi antara sungai dan lautan (Campbell *et al.*, 2008). Hewan yang ditemukan di ekosistem ini antara lain spesies endemik seperti kerang, kepiting, dan berbagai jenis ikan, serta spesies yang hanya tinggal sementara seperti larva, udang, dan ikan dewasa yang bermigrasi ke laut, termasuk salmon dan ikan sidat. Sementara itu, tumbuhan yang mendominasi ekosistem ini meliputi lamun (*sea grass*), mangrove, alga di dasar perairan, serta fitoplankton (Widodo *et al.*, 2021). Adapun ekosistem estuari dapat dilihat pada Gambar 2.19.



(a)



(b)

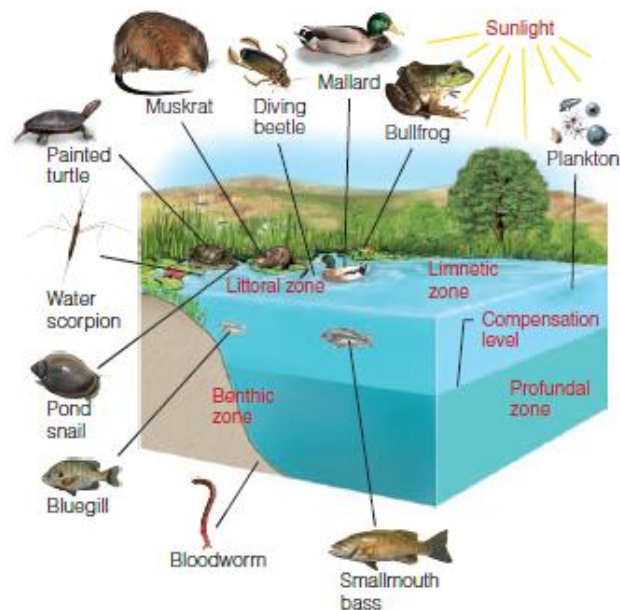
Gambar 2.19 Eksosistem Estuari: a) Mangrove sebagai salah satu tumbuhan khas ekosistem estuari; b) Lamun pada ekosistem estuari
Sumber: (Wahyu, 2022)

b) Ekosistem Air Tawar

Ekosistem air tawar merupakan ekosistem dengan kadar salinitas rendah. Berdasarkan kondisi perairannya, ekosistem air tawar dibedakan menjadi dua yaitu perairan air tenang dan perairan mengalir. Perairan air tenang meliputi danau dan rawa, sedangkan perairan mengalir meliputi sungai (Juniper, 2019).

(1) Danau

Danau merupakan cekungan di daratan yang terisi air tenang (Campbell *et al.*, 2008). Danau terbagi menjadi beberapa zona antara lain zona litoral yang merupakan bagian tepi danau yang dangkal di mana cahaya dapat mencapai dasar sehingga tumbuhan berakar bisa tumbuh, zona limnetik yaitu perairan terbuka hingga kedalaman yang masih mendapatkan cahaya. Di zona ini hidup fitoplankton, zooplankton, dan ikan. Zona profundal, yaitu perairan dalam yang tidak mendapat cahaya cukup. Energi utamanya berasal dari materi organik yang jatuh dari zona limnetik, serta zona bentik yang merupakan dasar danau tempat utama terjadinya penguraian (Smith & Smith, 2014). Adapun berbagai zona pada danau ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Pembagian Zona pada Ekosistem Danau
Sumber: Smith & Smith (2014)

(2) Rawa

Rawa merupakan salah satu ekosistem perairan tenang yang umumnya terbentuk di dataran rendah atau cekungan dengan kondisi air selalu jenuh. Genangan air pada rawa dapat bersifat musiman, yang dipengaruhi oleh curah hujan tinggi dan limpahan sungai, maupun permanen karena kedekatannya dengan sumber air (Juniper, 2019). Sebagai ekosistem, rawa memiliki fungsi ekologis penting, antara lain menyimpan dan menyalurkan air, menyerap kelebihan air, menyimpan karbon, serta menjadi habitat bagi berbagai spesies tumbuhan dan hewan (Campbell *et al.*, 2008). Adapun ekosistem rawa dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Ekosistem Rawa
Sumber: (Photographers, 2017)

(3) Sungai

Sungai merupakan ekosistem perairan mengalir (*flowing-water ecosystem*) yang terbentuk dari berbagai sumber, seperti mata air, rembesan tanah, lelehan gletser, maupun aliran keluar dari danau (Smith & Smith, 2014). Ciri fisik yang paling menonjol dari sungai adalah arus (Campbell *et al.*, 2008). Oleh karena itu, sungai dihuni oleh organisme dengan beragam bentuk adaptasi terhadap arus yang terus bergerak, seperti alga dan lumut melekat pada substrat kokoh seperti batu atau batang kayu, serta siput dan cacing pipih yang memiliki permukaan bawah tubuh lengket sehingga memungkinkan mereka hidup menempel (Odum, 1996). Adapun ekosistem sungai dapat dilihat pada Gambar 2.22.

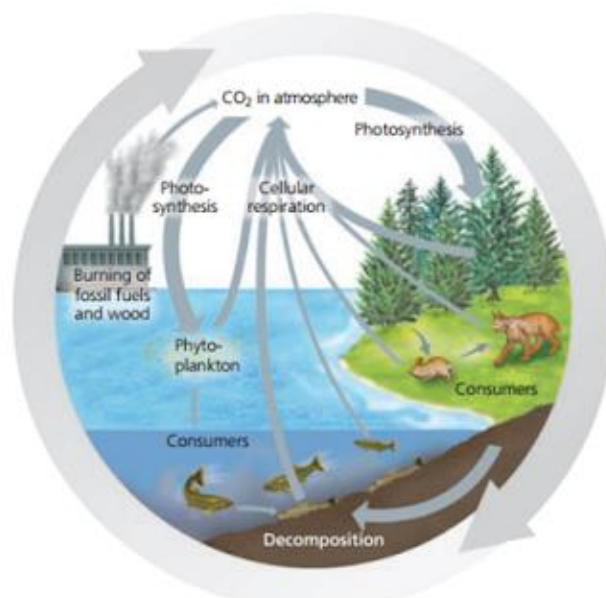


Gambar 2.22 Ekosistem Sungai
Sumber: (Photographers, 2016)

2.1.5.6 Siklus Biogeokimia dalam Ekosistem

1) Siklus Karbon

Siklus karbon merupakan proses biogeokimia yang melibatkan karbon di antara biosfer, geosfer, hidrosfer, dan atmosfer. Siklus karbon diawali dari CO_2 di atmosfer yang diserap tumbuhan untuk fotosintesis, lalu berpindah ke hewan dan manusia melalui rantai makanan dan kembali ke atmosfer lewat respirasi (Widodo *et al.*, 2021). Di perairan, karbon juga masuk melalui difusi udara dan air, kemudian digunakan oleh organisme akuatik. Selanjutnya, karbon kembali ke atmosfer atau mengendap sebagai sedimen. Aktivitas manusia seperti pembakaran fosil dapat mempercepat pelepasan CO_2 sehingga siklus karbon akan terus terulang. Namun, jika terlalu banyak CO_2 di atmosfer, maka akan meningkatkan efek rumah kaca yang dapat menyebabkan fenomena pemanasan global (Campbell *et al.*, 2008; Smith & Smith, 2014). Adapun proses siklus karbon dapat dilihat pada Gambar 2.23.

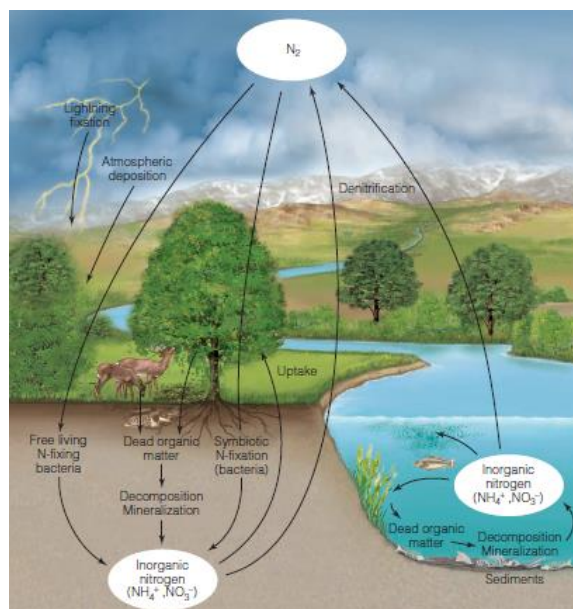


Gambar 2.23 Siklus Karbon
Sumber: (Campbell *et al.*, 2008)

2) Siklus Nitrogen

Siklus nitrogen dimulai dari gas N_2 yang melimpah di atmosfer tetapi tidak bisa langsung digunakan oleh organisme (Campbell *et al.*, 2008). Nitrogen tersebut kemudian masuk ke ekosistem melalui dua jalur, yaitu deposisi atmosfer dan fiksasi nitrogen. Pada jalur deposisi atmosfer, nitrogen turun bersama hujan dalam bentuk

NH_4^+ atau NO_3^- . Sementara itu, fiksasi nitrogen terjadi dengan energi tinggi melalui petir atau kosmik, maupun secara biologis oleh bakteri simbiotik, bakteri bebas, dan sianobakteri. Jalur biologis ini menjadi jalur penyumbang nitrogen terbesar yang masuk ke dalam ekosistem (Smith & Smith, 2014). Selanjutnya, tumbuhan menyerap nitrogen dalam bentuk NH_4^+ atau NO_3^- sedangkan hewan memperolehnya dengan memakan tumbuhan atau organisme lain (Widodo *et al.*, 2021). Ketika organisme mati, maka dekomposisi menghasilkan NH_4^+ melalui proses amonifikasi. NH_4^+ ini dapat diubah oleh bakteri nitrifikasi menjadi NO_2^- lalu NO_3^- yang kembali diserap tumbuhan. Sebagian nitrogen lalu hilang melalui volatilisasi atau dikembalikan ke atmosfer oleh bakteri denitrifikasi, sehingga siklus kembali ke bentuk N_2 di udara (Campbell *et al.*, 2008; Smith & Smith, 2014). Proses siklus nitrogen dapat dilihat pada Gambar 2.24.

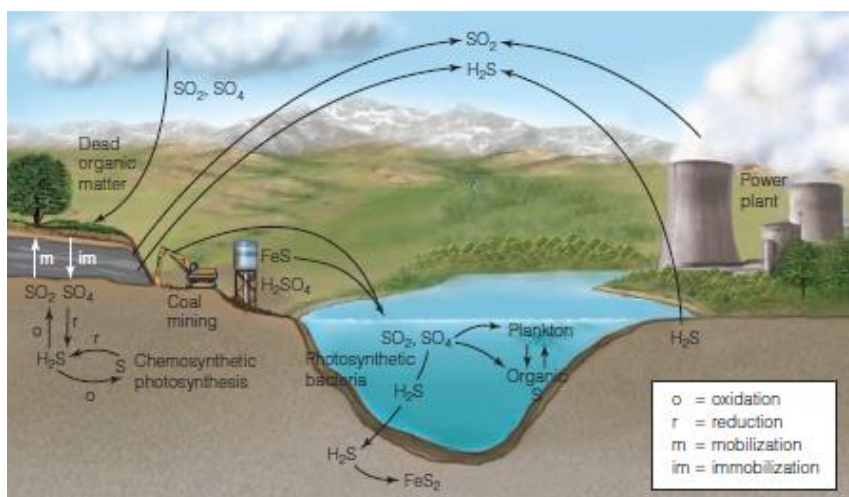


Gambar 2.24 Siklus Nitrogen
Sumber: Smith & Smith (2014)

3) Siklus Sulfur

Siklus sulfur merupakan siklus biogeokimia yang menggambarkan perubahan sulfur dari hidrogen sulfida (H_2S) menjadi sulfur dioksida (SO_2), lalu sulfat, dan kembali lagi menjadi H_2S (Widodo *et al.*, 2021). Siklus ini berlangsung melalui fase gas yang memungkinkan sirkulasi global, serta fase sedimenter di mana sulfur tersimpan dalam bentuk endapan lalu dilepaskan melalui proses pelapukan serta dekomposisi. Sulfur tersebut masuk ke atmosfer melalui letusan

gunung, pembakaran fosil, pertukaran laut, dan dekomposisi. Di udara, H_2S dengan cepat teroksidasi menjadi SO_2 , kemudian larut dalam air sehingga membentuk asam sulfat lemah (H_2SO_4) yang turun bersama hujan. Dalam bentuk larut, sulfur dapat diserap oleh tumbuhan, lalu masuk ke rantai makanan, dan kembali ke tanah atau perairan melalui ekskresi serta kematian organisme di mana bakteri dapat mengubahnya lagi menjadi H_2S (Smith & Smith, 2014). Adapun proses siklus sulfur dapat dilihat pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Siklus Sulfur

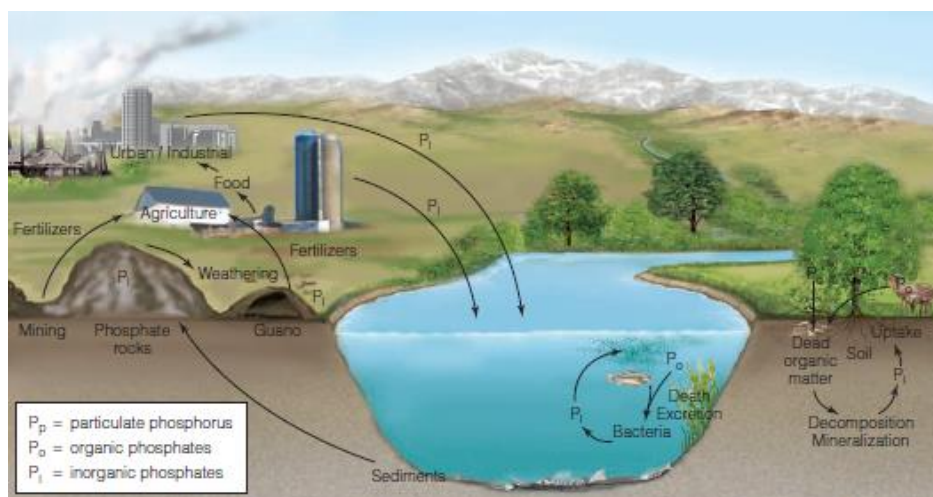
Sumber: (Smith & Smith, 2014)

4) Siklus Fosfor

Siklus fosfor diawali dengan proses pelapukan batuan fosfat yang melepaskan PO_4^{3-} ke dalam tanah. Fosfat yang tersedia sebagian besar diserap oleh tumbuhan dan digunakan dalam pembentukan senyawa organik penting, kemudian berpindah ke hewan atau organisme lain melalui rantai makanan. Selanjutnya, fosfor dikembalikan ke tanah melalui proses dekomposisi sisa organisme yang mati maupun melalui ekskresi hewan. Selain tetap berputar dalam ekosistem darat, sebagian fosfat juga terbawa aliran air permukaan dan air tanah untuk menuju ke ekosistem perairan, sehingga melanjutkan peredarannya di lingkungan akuatik (Campbell *et al.*, 2008).

Di perairan, fosfor dapat ditemukan dalam tiga bentuk utama, yaitu fosfor organik partikular (P_p), fosfat organik terlarut (P_o), dan fosfat anorganik (P_i). Fitoplankton menyerap fosfat anorganik untuk fotosintesis, kemudian dimakan oleh zooplankton yang pada akhirnya mengembalikan sebagian besar fosfor ke

lingkungan dalam bentuk anorganik sehingga dapat dimanfaatkan kembali. Proses ini memungkinkan daur ulang fosfor berlangsung secara internal di ekosistem perairan. Namun, sebagian fosfor mengalami pengendapan di dasar perairan lalu membentuk sedimen. Fosfor yang tersimpan di lapisan sedimen atau perairan dalam hanya dapat kembali ke siklus aktif melalui proses *upwelling* atau dalam skala waktu geologi melalui pengangkatan dan pelapukan batuan. Hal tersebut menunjukkan bahwa siklus fosfor tidak memiliki fase atmosfer yang signifikan sehingga ini yang menyebabkan siklusnya berlangsung lebih lambat, terbatas, serta menjadikannya unsur pembatas dalam produktivitas ekosistem, terutama di perairan (Smith & Smith, 2014). Adapun proses siklus fosfor ditunjukkan pada Gambar 2.26.

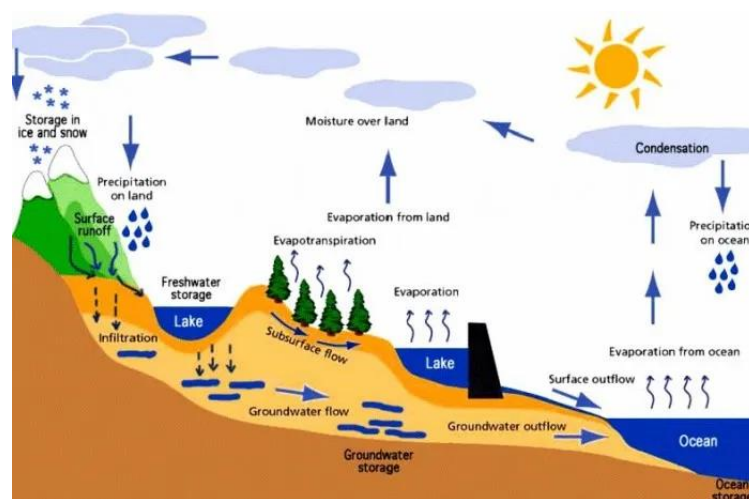


Gambar 2.26 Siklus Fosfor
Sumber: (Smith & Smith, 2014)

5) Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi dimulai dengan evaporasi, yaitu penguapan air dalam bentuk cair dari permukaan laut, sungai, danau, serta tanah akibat energi matahari. Selain itu, tumbuhan darat juga turut menyumbangkan sejumlah besar uap air ke atmosfer. Proses penguapan air yang berasal dari tumbuhan disebut transpirasi. Setelah uap air terbentuk, maka uap tersebut akan mengalami kondensasi dan membentuk awan. Ketika awan mulai jenuh, akhirnya air jatuh kembali ke permukaan bumi melalui presipitasi dalam bentuk hujan, salju, atau butiran es. Proses-proses tersebut menjaga air supaya tetap tersedia bagi organisme hidup di darat maupun perairan (Campbell *et al.*, 2008; Widodo *et al.*, 2021).

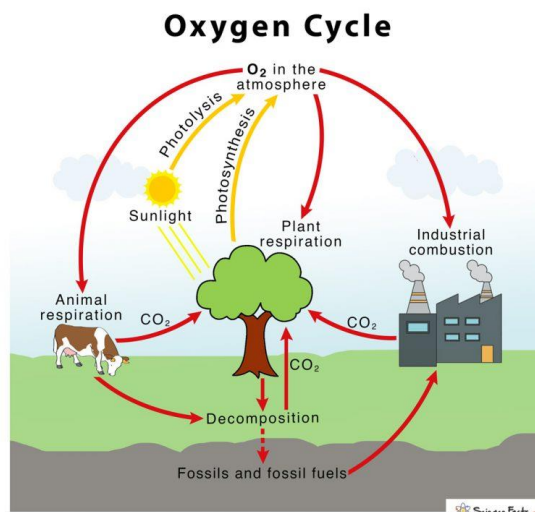
Air yang jatuh ke permukaan bumi melalui presipitasi dapat mengalami beberapa jalur perjalanan. Sebagian air meresap ke dalam tanah sebagai infiltrasi dengan mengisi lapisan air tanah yang berperan penting dalam ketersediaan air bagi tumbuhan, serta menjadi cadangan untuk ekosistem darat. Sementara itu, sebagian lainnya mengalir di permukaan sebagai *runoff* menuju sungai, danau, serta lautan. Dari ekosistem darat, air kemudian kembali ke atmosfer melalui transpirasi tumbuhan dan evaporasi dari permukaan tanah maupun perairan (Salsabila & Nugraheni, 2020). Adapun proses siklus hidrologi ditunjukkan pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 Siklus Hidrologi
Sumber: (Salamadian, 2023)

6) Siklus Oksigen

Siklus oksigen dimulai dari proses pembentukan melalui dua sumber utama oksigen di atmosfer, yaitu fotolisis uap air oleh sinar matahari dan fotosintesis oleh organisme autotrof. Pada fotolisis, molekul air (H_2O) dipecah menjadi hidrogen dan oksigen, di mana hidrogen dilepaskan ke luar angkasa sedangkan oksigen dilepaskan ke atmosfer. Sementara itu, pada fotosintesis oleh tumbuhan, alga, dan bakteri fotosintetik dihasilkan oksigen sebagai hasil samping dari pemecahan molekul organik untuk membentuk senyawa organik. Selanjutnya, oksigen yang ada di atmosfer dimanfaatkan dalam berbagai proses biologis terutama respirasi seluler yang dilakukan oleh tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme untuk menghasilkan energi, dengan hasil akhir berupa H_2O dan CO_2 (Smith & Smith, 2014; Tolangara *et al.*, 2022). Adapun proses siklus oksigen ditunjukkan pada Gambar 2.28.



Gambar 2.28 Siklus Oksigen
Sumber: (Sciencefacts.net, 2021)

2.2 Hasil Penelitian yang Relevan

Penelitian yang relevan dengan penelitian ini antara lain penelitian oleh Hestiana & Rosana (2020) menunjukkan bahwa pembelajaran biologi yang menerapkan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* berpengaruh terhadap literasi sains dan kemampuan pemecahan masalah. Melalui desain *quasi experiment* yang terdiri dari dua kelas, yaitu kelas eksperimen dan kelas kontrol, nilai rata-rata literasi sains pada *posttest* kelas eksperimen sebesar 76,67. Rata-rata nilai tersebut lebih besar dibandingkan kelas kontrol yang memperoleh sebesar 72,12. Sementara itu, nilai rata-rata *posttest* kemampuan pemecahan masalah pada kelas eksperimen mencapai 85,15 sedangkan kelas kontrol memperoleh nilai rata-rata sebesar 65,76. Dengan demikian, penerapan model dan pendekatan ini terbukti berpengaruh signifikan dalam meningkatkan literasi sains sekaligus kemampuan pemecahan masalah karena peserta didik tidak hanya dilatih untuk memahami konsep biologi, tetapi juga mengaitkannya dengan isu-isu nyata yang terjadi di lingkungan sosial mereka.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Naibaho *et al.*, (2025) yang menguji pengaruh *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* melalui penyajian masalah sosial-ilmiah dalam LKPD. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa terdapat peningkatan nilai rata-rata literasi lingkungan yang lebih tinggi pada kelas

eksperimen dibandingkan dengan kelas kontrol. Nilai rata-rata literasi lingkungan pada kelas eksperimen semula sebesar 46 saat *pretest*, kemudian naik menjadi 77,30 pada saat *posttest*. Sementara itu, nilai rata-rata literasi lingkungan pada kelas kontrol saat *pretest* sebesar 43,30 sedangkan pada saat *posttest* meningkat menjadi 61,60. Perbedaan tingkat literasi lingkungan peserta didik disebabkan karena adanya perbedaan perlakuan, di mana kelas kontrol menggunakan LKPD standar dari sekolah, sedangkan kelas eksperimen memanfaatkan LKPD dalam penerapan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues*. Oleh karena itu, tingkat literasi lingkungan kelas kontrol lebih rendah dibandingkan dengan kelas eksperimen karena pembelajaran berbasis masalah sosial-ilmiah yang disajikan dalam LKPD pada kelas eksperimen mendorong peserta didik untuk lebih aktif memecahkan masalah yang relevan dengan kehidupan sehari-hari.

Sementara itu, penelitian oleh Albab *et al.*, (2025) menunjukkan bahwa penerapan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* berpengaruh dalam meningkatkan keterampilan argumentasi peserta didik. Melalui desain *one group pretest-posttest*, hasil penelitiannya menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kemampuan berargumentasi yang signifikan setelah perlakuan, di mana nilai rata-rata peserta didik saat *pretest* sebesar 57,21 meningkat menjadi 82,69 pada saat *posttest*. Peningkatan kemampuan berargumentasi ini disebabkan oleh penerapan sintaks model *problem based learning* yang memfasilitasi peserta didik untuk menyusun struktur argumen secara utuh, mulai dari *claim* (pendapat), *data/evidence* (bukti), *warrant* (penalaran), hingga *rebuttal* (sanggahan). Pembelajaran berbasis isu sosial-ilmiah ini terbukti efektif karena menyajikan permasalahan kontekstual tentang keseimbangan ekosistem, sehingga mendorong peserta didik untuk aktif berdiskusi secara berkelompok serta merumuskan solusi logis berdasarkan bukti nyata di lingkungan sekitar mereka.

Berdasarkan uraian penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa penerapan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* berpengaruh dalam meningkatkan literasi sains yang relevan dengan *sustainability literacy*. Selain itu, penerapan model dan pendekatan tersebut dapat mengembangkan keterampilan argumentasi ilmiah peserta didik secara bertahap

karena mendorong aktivitas penyelidikan, diskusi, dan analisis terhadap permasalahan nyata. Dengan demikian, penelitian tersebut dapat menjadi rujukan bagi peneliti serta menjadi acuan dalam melaksanakan penelitian.

2.3 Kerangka Konseptual

Pada abad ke-21, kondisi bumi ditandai dengan krisis multidimensional seperti perubahan iklim, degradasi lingkungan, ketimpangan sosial, dan pergeseran ekonomi global. Kompleksitas permasalahan tersebut menuntut lahirnya generasi yang memiliki keterampilan berpikir kritis, reflektif, serta mampu mengambil keputusan yang bertanggung jawab dengan berdasarkan data dan pertimbangan etis. Dalam bidang pendidikan, tuntutan tersebut selaras dengan tujuan keempat dalam agenda *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang menekankan pentingnya peran pendidikan berkualitas dalam membekali peserta didik dengan wawasan keberlanjutan. Oleh karena itu, *sustainability literacy* dan keterampilan argumentasi ilmiah dapat menjadi kompetensi yang sangat penting untuk dikembangkan sebagai bekal generasi muda dalam menghadapi tantangan lokal dan global.

Namun, berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat *sustainability literacy* peserta didik masih tergolong rendah, baik pada aspek *knowledge*, *knowledge of skills*, maupun *mindset*. Hasil uji internasional seperti Sulitest maupun penelitian lokal di Indonesia menunjukkan bahwa peserta didik belum sepenuhnya memahami keterkaitan antara isu lingkungan, sosial, dan ekonomi. Peserta didik bahkan belum mampu mengaitkan isu-isu tersebut dengan tindakan nyata dalam kehidupan sehari-hari. Kondisi serupa juga terjadi pada keterampilan argumentasi ilmiah. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa mayoritas peserta didik hanya mampu menyusun klaim sederhana tanpa didukung oleh data, alasan, atau sanggahan yang logis.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, maka diperlukan model dan pendekatan pembelajaran yang mampu mengintegrasikan kemampuan pemecahan masalah dengan konteks nyata. Salah satu model dan pendekatan yang dapat diterapkan yaitu model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues*.

Integrasi model dan pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan *sustainability literacy* peserta didik dengan cara mengaitkan konsep-konsep sains pada isu keberlanjutan yang dekat dengan kehidupan sehari-hari. Selain itu, melalui diskusi terkait *socioscientific issues* yang bersifat terbuka, diharapkan peserta didik dapat terdorong untuk mengembangkan keterampilan argumentasi ilmiah. Kedua kemampuan ini akan menjadi bekal penting dalam mewujudkan generasi yang kritis, peduli lingkungan, serta mampu mengambil keputusan berbasis data.

Selaras dengan permasalahan dan solusi di atas, materi ekosistem dipandang sesuai untuk diterapkan dalam penelitian ini. Pada materi tersebut, peserta didik tidak hanya mempelajari konsep-konsep ekosistem, tetapi juga dapat mengeksplorasi berbagai permasalahan nyata yang berkaitan dengan keberlanjutan, seperti alih fungsi lahan, pencemaran lingkungan eksploitasi sumber daya alam, yang berbenturan dengan kepentingan ekonomi, sosial, politik, dan etika. Melalui *socioscientific issues* yang terkandung dalam topik ekosistem, maka pembelajaran dapat dihubungkan dengan konteks kehidupan sehari-hari, sehingga lebih dekat dan bermakna bagi peserta didik. Dengan demikian, penerapan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* pada materi ekosistem diharapkan dapat mengoptimalkan proses pembelajaran untuk mewujudkan penguasaan *sustainability literacy* dan keterampilan argumentasi ilmiah.

Berdasarkan uraian di atas, maka peneliti menduga bahwa penerapan model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* memiliki pengaruh terhadap *sustainability literacy* dan keterampilan argumentasi ilmiah peserta didik. Model dan pendekatan ini tidak hanya relevan dengan kebutuhan pembelajaran pada abad ke-21, tetapi juga sesuai dengan upaya untuk mewujudkan pendidikan berkualitas yang mendukung tercapainya tujuan pembangunan berkelanjutan.

2.4 Hipotesis Penelitian

Hipotesis dalam penelitian dirumuskan sebagai berikut:

H₀ : Tidak ada pengaruh model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* terhadap *sustainability literacy* dan keterampilan argumentasi

ilmiah peserta didik pada materi ekosistem di kelas X SMAN 2 Tasikmalaya tahun ajaran 2025/2026.

H_a : Ada pengaruh model *problem based learning* berbasis *socioscientific issues* terhadap *sustainability literacy* dan keterampilan argumentasi ilmiah peserta didik pada materi ekosistem di kelas X SMAN 2 Tasikmalaya tahun ajaran 2025/2026.