



Transformative Green Chemistry-Based STEM Education In The Formation Of Students' Eco-Scientific Identity And Sustainability Agency

Transformative Green Chemistry-Based STEM Education Dalam Pembentukan Eco-Scientific Identity Dan Sustainability Agency Siswa

Ria Pertiwi¹, Fanny Rizki²

Universitas Tjut Nyak Dhien, Indonesia

Email : ria@utnd.ac.id

Abstract

Twenty-first-century chemistry education faces the challenge of not only improving students' scientific conceptual understanding but also fostering ecological awareness and the capacity to act on sustainability issues. However, chemistry learning in schools still tends to emphasize concept memorization and mathematical problem-solving, limiting students' ability to connect chemical knowledge with real-world environmental challenges. This study aims to analyze how the implementation of *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* shapes students' *eco-scientific identity* and develops their *sustainability agency*. This research employed a qualitative approach with a phenomenological framework involving 15 students from SMA Pencawan Medan, selected through purposive sampling. Data were collected through participant observation, semi-structured interviews, documentation, and written reflections, and analyzed using thematic analysis. The novelty of this study lies in integrating *transformative learning*, *green chemistry*, and STEM through case-based analysis, household chemical investigations, problem-solving activities, and critical reflection without focusing on product creation. The findings revealed three major outcomes: (1) students experienced a transformation in their perspective of chemistry from abstract to contextual; (2) *eco-scientific identity* developed, marked by increased scientific confidence and ecological awareness; and (3) *sustainability agency* emerged through concrete actions at personal, social, and academic levels. These findings suggest that transformative *green chemistry*-based STEM learning has strong potential as an effective pedagogical model for advancing sustainability education.

Keywords: *eco-scientific identity*; *green chemistry*; STEM education; *sustainability agency*; *transformative learning*

Abstrak

Pendidikan kimia abad ke-21 menghadapi tantangan untuk tidak hanya meningkatkan penguasaan konsep ilmiah siswa, tetapi juga membangun kesadaran ekologis dan kemampuan bertindak terhadap isu keberlanjutan. Namun, pembelajaran kimia di sekolah masih cenderung berfokus pada hafalan konsep dan penyelesaian matematis, sehingga kurang mampu menghubungkan pengetahuan kimia dengan persoalan lingkungan nyata. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana implementasi *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* membentuk *eco-scientific identity* dan mengembangkan *sustainability agency* siswa. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan kerangka fenomenologis yang melibatkan 15 siswa SMA Pencawan Medan melalui *purposive sampling*. Data dikumpulkan melalui observasi partisipatif, wawancara semi-terstruktur, dokumentasi, dan refleksi tertulis, kemudian dianalisis menggunakan *thematic analysis*. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi *transformative learning*, *green chemistry*, dan STEM melalui aktivitas berbasis analisis kasus, investigasi bahan kimia rumah tangga, *problem solving*, dan refleksi kritis tanpa berorientasi pada pembuatan produk. Hasil penelitian menunjukkan tiga temuan utama: (1) terjadi transformasi perspektif siswa terhadap kimia dari abstrak menjadi kontekstual; (2) berkembang *eco-scientific identity* yang ditandai oleh meningkatnya kepercayaan diri ilmiah dan kesadaran ekologis; serta (3) muncul *sustainability agency* melalui tindakan nyata pada level personal, sosial, dan akademik. Temuan ini mengindikasikan bahwa pembelajaran transformatif berbasis *green chemistry-STEM* berpotensi menjadi model pedagogis efektif untuk mendukung pendidikan keberlanjutan.

Kata kunci: *eco-scientific identity*; *green chemistry*; STEM education; *sustainability agency*; *transformative learning*



PENDAHULUAN

Pendidikan abad ke-21 menuntut pembelajaran sains yang tidak hanya berorientasi pada penguasaan konsep, tetapi juga pada pengembangan kemampuan berpikir kritis, pemecahan masalah, pengambilan keputusan berbasis bukti, serta kesadaran terhadap isu keberlanjutan global. Tantangan global seperti perubahan iklim, pencemaran air, akumulasi limbah plastik, dan degradasi lingkungan telah menempatkan pendidikan sebagai instrumen strategis dalam membentuk generasi yang mampu memahami dan merespons persoalan ekologis secara ilmiah, kritis, dan bertanggung jawab. Pendidikan lingkungan dan pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan berperan dalam meningkatkan pengetahuan, keterampilan, nilai, serta perilaku pro-lingkungan yang diperlukan untuk menghadapi berbagai tantangan keberlanjutan (Duda, 2022).

Dalam konteks ini, pendidikan kimia memiliki posisi yang sangat penting karena kimia merupakan disiplin ilmu yang berhubungan langsung dengan produksi, penggunaan, transformasi, dan dampak berbagai bahan terhadap lingkungan dan kehidupan manusia. Namun demikian, Pembelajaran kimia sering berfokus pada hafalan konsep dan penyelesaian masalah algoritmik sehingga siswa kesulitan memahami relevansi kimia dalam kehidupan sehari-hari (Johnstone, 1991; Gilbert, 2006). Kondisi ini menyebabkan kimia kerap dipersepsikan sebagai mata pelajaran yang sulit, tidak kontekstual, dan kurang relevan dengan persoalan nyata yang dihadapi siswa.

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk menjawab tantangan tersebut adalah Green Chemistry Education, yaitu integrasi prinsip-prinsip *green chemistry* ke dalam pembelajaran kimia guna menumbuhkan praktik ilmiah yang lebih aman, efisien, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. *Green chemistry* menekankan pencegahan limbah, pengurangan bahan berbahaya, efisiensi energi, dan penggunaan sumber daya yang berkelanjutan. Dalam konteks pendidikan, pendekatan ini tidak hanya meningkatkan pemahaman konseptual siswa tentang kimia, tetapi juga mendorong berkembangnya kesadaran ekologis dan tanggung jawab lingkungan. Kajian sistematis terbaru menunjukkan bahwa integrasi *green chemistry* dalam pembelajaran berkontribusi positif terhadap *environmental awareness*, *scientific literacy*, dan *sustainability thinking* siswa.

Meskipun demikian, implementasi *green chemistry* dalam pendidikan menengah masih menghadapi berbagai tantangan. Banyak praktik pembelajaran *green chemistry* masih berfokus



pada substitusi bahan praktikum atau sekadar pengurangan penggunaan zat berbahaya di laboratorium. Pendekatan semacam ini cenderung menempatkan *green chemistry* pada level teknis, bukan sebagai kerangka pedagogis transformatif yang mampu membangun perubahan perspektif siswa terhadap sains dan keberlanjutan. Padahal, literatur terbaru menekankan bahwa pendidikan kimia berkelanjutan perlu bergerak menuju pembelajaran yang lebih holistik, yang mengintegrasikan *systems thinking*, refleksi kritis, dan *problem solving* berbasis konteks dunia nyata.

Sejalan dengan itu, pendekatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) semakin banyak digunakan dalam pembelajaran sains karena mampu memfasilitasi pembelajaran interdisipliner yang menekankan analisis masalah nyata dan perancangan solusi berbasis bukti (Bybee, 2013). Pembelajaran STEM mendorong siswa untuk tidak hanya memahami konsep, tetapi juga menggunakan pengetahuan tersebut dalam menyelesaikan persoalan kompleks melalui investigasi, argumentasi ilmiah, kolaborasi, dan pengambilan keputusan. Dalam pendidikan kimia, integrasi STEM terbukti meningkatkan literasi sains, *critical thinking*, dan *higher-order thinking skills* siswa.

Integrasi *green chemistry* dan STEM menjadi semakin relevan ketika dikaitkan dengan teori Transformative Learning, yang menekankan bahwa pembelajaran bermakna terjadi ketika individu mengalami perubahan perspektif melalui refleksi kritis terhadap asumsi lama. Menurut teori ini, perubahan tidak hanya terjadi pada level pengetahuan, tetapi juga pada identitas dan tindakan. Dalam konteks pendidikan keberlanjutan, pembelajaran transformatif memungkinkan siswa bergerak dari sekadar memahami isu lingkungan menuju perubahan cara pandang, pembentukan nilai, dan tindakan nyata terhadap keberlanjutan. Dengan demikian, kombinasi antara *transformative learning*, *green chemistry*, dan STEM berpotensi menciptakan pembelajaran kimia yang tidak hanya meningkatkan hasil belajar kognitif, tetapi juga mentransformasi cara siswa memaknai sains dan lingkungan.

Salah satu konstruksi konseptual yang relevan dalam konteks ini adalah *eco-scientific identity*, yaitu identitas yang mengintegrasikan kemampuan berpikir ilmiah dengan kesadaran ekologis. Konsep ini berkembang dari *science identity* dan menekankan bagaimana individu melihat dirinya sebagai seseorang yang mampu menggunakan sains untuk memahami dan merespons persoalan lingkungan secara bertanggung jawab. Siswa dengan *eco-scientific identity* yang kuat cenderung menunjukkan kepercayaan diri dalam penalaran ilmiah,



kesadaran ekologis yang tinggi, serta kemampuan menghubungkan pengetahuan sains dengan keputusan sehari-hari. Studi terbaru menunjukkan bahwa identitas ilmiah berkembang lebih kuat ketika pembelajaran sains dihubungkan dengan isu sosial-ekologis yang bermakna secara personal bagi siswa.

Selain identitas, pendidikan keberlanjutan juga menekankan pentingnya *sustainability agency*, yaitu kapasitas individu untuk mengambil keputusan dan bertindak dalam menciptakan perubahan menuju keberlanjutan. *Agency* tidak sekadar merujuk pada kesadaran atau niat, tetapi pada kemampuan nyata untuk memengaruhi perilaku diri sendiri, komunitas, dan lingkungan sosial. Siswa yang memiliki *sustainability agency* tidak berhenti pada pemahaman tentang masalah lingkungan, tetapi mampu menginisiasi tindakan, memengaruhi orang lain, dan berpartisipasi dalam solusi kolektif. Dalam konteks pendidikan, pengembangan *agency* menjadi indikator penting keberhasilan pembelajaran keberlanjutan karena menunjukkan bahwa pengetahuan telah terinternalisasi menjadi tindakan.

Meskipun kajian mengenai green chemistry education, STEM, dan pendidikan keberlanjutan terus berkembang, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu diperhatikan. Pertama, penelitian green chemistry dan sustainable chemistry education selama ini banyak diarahkan pada penguatan kesadaran keberlanjutan, integrasi prinsip kimia hijau dalam pembelajaran, serta pengembangan aktivitas pembelajaran berbasis isu lingkungan (Chen et al., 2020; Burmeister & Eilks, 2023; Zuin et al., 2021). Namun, kajian yang secara khusus menelaah bagaimana pembelajaran kimia hijau dapat membentuk identitas siswa sebagai individu yang mampu berpikir dan bertindak secara ilmiah-ekologis masih relatif terbatas. Padahal, identitas sains dipahami sebagai konstruk sosial-budaya yang dinamis dan berkembang melalui pengalaman belajar, pengakuan, partisipasi, serta keterlibatan siswa dalam praktik ilmiah (Avraamidou, 2023; Vincent-Ruz & Schunn, 2024).

Kedua, pengembangan pendidikan keberlanjutan dan STEM telah banyak menekankan pentingnya kompetensi, pemecahan masalah, dan kemampuan bertindak dalam menghadapi tantangan lingkungan (Kelley & Knowles, 2016; Redman & Wiek, 2021; Levrini et al., 2024). Namun, hubungan antara pembelajaran kimia transformatif, perubahan perspektif siswa, pembentukan eco-scientific identity, dan perkembangan *sustainability agency* belum banyak dijelaskan sebagai proses pembelajaran yang saling berkelanjutan. Literatur transformative learning menekankan bahwa pembelajaran bermakna terjadi ketika peserta didik mengalami



perubahan cara pandang melalui refleksi kritis dan pengalaman yang menantang asumsi sebelumnya (Mezirow, 2000; Taylor & Cranton, 2016; Hoggan, 2016). Akan tetapi, dalam konteks green chemistry berbasis STEM, mekanisme transformasi tersebut masih perlu dijelaskan secara lebih mendalam.

Ketiga, sebagian penelitian green chemistry pada pendidikan menengah masih banyak berfokus pada eksperimen laboratorium, pengenalan produk ramah lingkungan, atau integrasi konsep keberlanjutan dalam pembelajaran kimia (Chen et al., 2020; Burmeister & Eilks, 2023; Sjöström & Talanquer, 2024). Masih diperlukan model pembelajaran yang tidak hanya menempatkan siswa sebagai pelaksana eksperimen, tetapi sebagai student investigators yang menganalisis bahan kimia dalam kehidupan sehari-hari, mengevaluasi dampaknya terhadap lingkungan, memecahkan masalah secara STEM, dan merefleksikan implikasi sosial-ekologisnya. Dengan demikian, pembelajaran kimia hijau tidak hanya diarahkan pada penguasaan konsep, tetapi juga pada pembentukan identitas ilmiah-ekologis dan kapasitas bertindak untuk keberlanjutan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, novelty penelitian ini terletak pada pengembangan model Transformative Green Chemistry-Based STEM Education yang mengintegrasikan transformative learning, prinsip green chemistry, dan pendekatan STEM melalui aktivitas contextual problem orientation, scientific investigation, STEM-based problem solving, dan critical reflection. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang lebih banyak menekankan eksperimen laboratorium atau produk ramah lingkungan, penelitian ini menempatkan siswa sebagai penyelidik yang menganalisis kandungan bahan kimia produk rumah tangga, mengevaluasi dampaknya terhadap lingkungan, dan merefleksikan implikasi sosial-ekologisnya. Pendekatan ini diharapkan mampu menjelaskan bagaimana perubahan perspektif siswa berkembang menjadi eco-scientific identity dan berlanjut pada sustainability *agency*.

Urgensi penelitian ini semakin kuat karena pendidikan sains masa kini tidak cukup hanya menghasilkan siswa yang memahami konsep kimia, tetapi juga siswa yang mampu berpikir sistemik, bertanggung jawab secara ekologis, dan berperan sebagai agents of change dalam menghadapi krisis lingkungan global (Anastas & Zimmerman, 2018; Constable, 2021; Redman & Wiek, 2021). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana implementasi Transformative Green Chemistry-Based STEM Education



membentuk *eco-scientific identity* dan mengembangkan *sustainability agency* siswa sekolah menengah.

Berdasarkan tujuan tersebut, penelitian ini dirumuskan dalam pertanyaan berikut:

1. Bagaimana implementasi *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* mentransformasi perspektif siswa terhadap kimia dan isu lingkungan?
2. Bagaimana pembelajaran tersebut berkontribusi terhadap pembentukan *eco-scientific identity* siswa?
3. Bagaimana *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* mengembangkan *sustainability agency* siswa dalam konteks sekolah dan kehidupan sehari-hari?

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan kerangka fenomenologis untuk mengeksplorasi pengalaman belajar siswa dalam implementasi *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* serta bagaimana pengalaman tersebut berkontribusi terhadap pembentukan *eco-scientific identity* dan *sustainability agency*. Pendekatan fenomenologis dipilih karena penelitian ini berfokus pada pemahaman mendalam terhadap pengalaman subjektif siswa, proses refleksi, serta transformasi perspektif yang terjadi selama pembelajaran. Kerangka ini memungkinkan peneliti menelaah bagaimana siswa membangun makna, merefleksikan asumsi awal, dan mengembangkan kesadaran baru mengenai keberlanjutan dan praktik ilmiah yang bertanggung jawab terhadap lingkungan (Creswell & Poth, 2018; Neubauer et al., 2019). Penelitian dilaksanakan selama satu bulan pada semester genap tahun ajaran 2025/2026 di SMA Pencawan Medan.

Partisipan penelitian terdiri atas 15 siswa kelas XI yang dipilih menggunakan teknik purposive sampling. Teknik ini digunakan untuk memilih partisipan yang aktif mengikuti pembelajaran kimia dan mampu memberikan informasi yang kaya terkait pengalaman belajar mereka. Kriteria inklusi partisipan meliputi: (1) mengikuti seluruh rangkaian pembelajaran, (2) terlibat aktif dalam diskusi dan investigasi berbasis STEM, (3) menyelesaikan tugas reflektif, dan (4) bersedia mengikuti wawancara mendalam. Jumlah partisipan ini dinilai memadai untuk penelitian fenomenologis karena fokus utama penelitian adalah kedalaman data dan kekayaan



pengalaman partisipan, bukan generalisasi statistik (Campbell et al., 2020; Hennink & Kaiser, 2022).

Implementasi *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* dilaksanakan melalui empat tahapan pembelajaran. Tahap pertama adalah contextual problem orientation, yaitu siswa diperkenalkan pada persoalan nyata seperti pencemaran air akibat deterjen, akumulasi sampah plastik, dan dampak limbah rumah tangga terhadap ekosistem. Tahap ini bertujuan memunculkan *disorienting dilemma* yang mendorong kesadaran awal terhadap isu keberlanjutan. Tahap kedua adalah scientific investigation and green chemistry exploration, di mana siswa melakukan kajian literatur sederhana, analisis studi kasus, observasi lingkungan sekitar sekolah dan rumah, serta identifikasi kandungan bahan kimia dalam produk sehari-hari berdasarkan prinsip *green chemistry*. Tahap ketiga adalah STEM-based problem solving, yaitu siswa bekerja secara kolaboratif untuk menganalisis data, mengidentifikasi akar masalah, dan merancang rekomendasi solusi berbasis STEM terhadap persoalan lingkungan yang ditemukan. Tahap keempat adalah critical reflection and transformative dialogue, di mana siswa melakukan refleksi kritis mengenai perubahan cara pandang mereka terhadap sains, lingkungan, dan tanggung jawab sosial-ekologis. Struktur ini disusun berdasarkan teori *transformative learning* yang menekankan refleksi kritis dan rekonstruksi perspektif sebagai inti pembelajaran transformatif (Taylor & Cranton, 2016; Hoggan, 2016).

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi partisipatif, wawancara mendalam semi-terstruktur, dokumentasi, dan refleksi tertulis siswa. Observasi partisipatif digunakan untuk mengamati keterlibatan siswa dalam diskusi, analisis kasus, aktivitas pemecahan masalah, dan interaksi kolaboratif selama pembelajaran. Wawancara mendalam dilakukan untuk menggali persepsi siswa mengenai pengalaman belajar mereka, perubahan cara pandang terhadap kimia dan isu lingkungan, serta tindakan keberlanjutan yang mulai berkembang. Dokumentasi berupa catatan lapangan, lembar kerja siswa, hasil diskusi kelompok, dan foto kegiatan digunakan sebagai data pendukung. Selain itu, refleksi tertulis digunakan untuk menelusuri perkembangan kesadaran ekologis, identitas ilmiah, dan agensi keberlanjutan siswa secara bertahap selama intervensi berlangsung (Nowell et al., 2017; Saldaña, 2021).

Dalam penelitian ini, peneliti bertindak sebagai instrumen utama (*human instrument*) yang terlibat langsung dalam pengumpulan, interpretasi, dan analisis data. Untuk menjaga konsistensi, digunakan instrumen pendukung berupa: (1) pedoman observasi, (2) protokol



wawancara semi-terstruktur, dan (3) lembar refleksi siswa. Seluruh instrumen dikembangkan berdasarkan dua konstruk utama penelitian, yaitu *eco-scientific identity* dan *sustainability agency*. Konstruk *eco-scientific identity* mencakup indikator kesadaran ekologis, keterhubungan sains dengan realitas lingkungan, kepercayaan diri dalam penalaran ilmiah, dan komitmen terhadap praktik berkelanjutan. Sementara itu, *sustainability agency* mencakup kemampuan pengambilan keputusan, inisiatif tindakan, tanggung jawab sosial-ekologis, dan kapasitas memengaruhi lingkungan sekitar.

Keabsahan data (*trustworthiness*) dijaga melalui empat kriteria utama, yaitu *credibility*, *transferability*, *dependability*, dan *confirmability*. *Credibility* diperkuat melalui triangulasi teknik dan sumber data serta *member checking* untuk memastikan kesesuaian interpretasi peneliti dengan pengalaman partisipan. *Transferability* dilakukan melalui deskripsi kontekstual yang rinci. *Dependability* dijaga dengan *audit trail* berupa dokumentasi sistematis seluruh proses penelitian. Sementara *confirmability* diperkuat melalui diskusi sejawat (*peer debriefing*) dan reflektivitas peneliti untuk meminimalkan bias interpretasi (Stahl & King, 2020; Tracy, 2020).

Analisis data dilakukan menggunakan analisis tematik (*thematic analysis*) mengikuti enam tahapan dari Virginia Braun dan Victoria Clarke, yaitu: (1) familiarisasi data, (2) pembuatan kode awal, (3) pencarian tema, (4) peninjauan tema, (5) pendefinisian tema, dan (6) penyusunan narasi temuan. Analisis dilakukan secara iteratif sejak awal pengumpulan data sehingga pola-pola pengalaman, perubahan perspektif, dan perkembangan tindakan keberlanjutan siswa dapat diidentifikasi secara komprehensif. Analisis tematik dipilih karena fleksibel dalam mengidentifikasi tema-tema penting pada penelitian berbasis pengalaman dan refleksi (Braun & Clarke, 2021). Selanjutnya, tema-tema yang diperoleh diinterpretasikan dengan mengaitkan temuan empiris pada teori *transformative learning*, *green chemistry education*, dan *education for sustainability* untuk membangun pemahaman yang utuh mengenai proses pembentukan *eco-scientific identity* dan *sustainability agency* siswa.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Berdasarkan analisis tematik terhadap data observasi partisipatif, wawancara mendalam, dokumentasi, dan refleksi tertulis dari 15 siswa, ditemukan bahwa implementasi



Transformative Green Chemistry-Based STEM Education menghasilkan tiga tema utama, yaitu:

1. Transformasi perspektif siswa terhadap kimia dan isu lingkungan
2. Pembentukan *eco-scientific identity*
3. Perkembangan *sustainability agency*

Selama intervensi satu bulan, siswa mengikuti empat tahapan pembelajaran: *contextual problem orientation*, *scientific investigation*, *STEM-based problem solving*, dan *critical reflection*. Pada tahap awal, siswa diberikan studi kasus tentang pencemaran air akibat deterjen, penumpukan plastik sekali pakai, serta limbah rumah tangga. Selanjutnya, siswa melakukan audit sederhana terhadap bahan kimia dalam produk rumah tangga yang mereka gunakan sehari-hari (misalnya deterjen, pembersih lantai, sabun cair, dan pewangi), menganalisis potensi dampaknya terhadap lingkungan, serta mendiskusikan alternatif solusi yang lebih berkelanjutan.

Hasil observasi menunjukkan peningkatan keterlibatan siswa secara progresif selama proses pembelajaran. Pada minggu pertama, hanya 6 dari 15 siswa (40%) yang aktif bertanya atau mengemukakan pendapat. Pada minggu keempat, jumlah tersebut meningkat menjadi 13 siswa (86,7%), ditandai dengan meningkatnya diskusi kritis, kemampuan argumentasi berbasis data, dan keterlibatan dalam penyusunan solusi kelompok.

1. Transformasi Perspektif Siswa terhadap Kimia dan Isu Lingkungan

Tema pertama menunjukkan bahwa siswa mengalami perubahan signifikan dalam memaknai kimia. Sebelum intervensi, mayoritas siswa memandang kimia sebagai mata pelajaran yang abstrak, rumit, dan berpusat pada hafalan rumus. Dari wawancara awal, 11 dari 15 siswa menyatakan bahwa kimia “sulit dipahami” dan “tidak terlalu berguna dalam kehidupan sehari-hari”.

Namun setelah mengikuti pembelajaran berbasis *green chemistry* dan STEM, siswa mulai melihat bahwa kimia memiliki hubungan langsung dengan realitas kehidupan, khususnya dalam isu pencemaran, limbah, dan kesehatan lingkungan. Mereka mulai memahami bahwa bahan kimia yang digunakan sehari-hari dapat memberikan dampak ekologis jangka panjang.

**Tabel 1. Perubahan Perspektif Siswa terhadap Kimia dan Isu Lingkungan**

Aspek Temuan	Sebelum Pembelajaran	Setelah Pembelajaran
Pandangan terhadap kimia	Abstrak, teoritis, penuh rumus	Kontekstual dan aplikatif
Relasi kimia dengan kehidupan	Rendah	Tinggi
Kesadaran dampak bahan kimia	Minim	Meningkat signifikan
Keterlibatan belajar	Pasif	Aktif dan reflektif
Persepsi isu lingkungan	Sekadar pengetahuan umum	Menjadi perhatian personal

Sumber: Peneliti (2026)

Berdasarkan Tabel 1, terjadi perubahan pada dimensi kognitif dan afektif siswa. Perubahan ini tampak dari meningkatnya kemampuan siswa menghubungkan konsep kimia dengan isu nyata.

Salah satu siswa menyatakan:

“Dulu saya kira kimia hanya soal reaksi dan hitungan. Sekarang saya sadar bahan pembersih di rumah pun punya dampak besar ke lingkungan.” (*Siswa 3, wawancara, 2026*)

Siswa lain menyampaikan:

“Setelah melihat komposisi deterjen, saya baru tahu ada bahan yang bisa mencemari air.” (*Siswa 7, wawancara, 2026*)

Refleksi tertulis siswa juga menunjukkan transformasi perspektif:

“Saya mulai berpikir bahwa kimia bukan hanya pelajaran sekolah, tapi ilmu untuk memahami apa yang terjadi di sekitar.” (*Refleksi siswa 11*)

Observasi kelas memperlihatkan bahwa pada awal pembelajaran pertanyaan siswa bersifat prosedural seperti “*Apa jawabannya?*” atau “*Ini rumusnya apa?*”. Pada akhir pembelajaran, pertanyaan berubah menjadi lebih analitis, misalnya “*Mengapa beberapa bahan pembersih lebih berbahaya?*” dan “*Bagaimana mengurangi limbah rumah tangga?*”. Perubahan jenis pertanyaan ini menunjukkan adanya perkembangan *higher-order thinking*.

2. Pembentukan *Eco-Scientific Identity*

Tema kedua menunjukkan berkembangnya *eco-scientific identity*, yaitu identitas diri siswa sebagai individu yang memahami sains sekaligus memiliki kesadaran ekologis. Tema ini muncul secara konsisten pada data wawancara, observasi, dan refleksi.

Analisis menunjukkan bahwa identitas ini terbentuk melalui empat proses:

- (1) peningkatan kepercayaan diri dalam penalaran ilmiah,
- (2) kesadaran ekologis yang lebih kuat,
- (3) keterhubungan personal dengan isu lingkungan, dan



(4) refleksi kritis terhadap kebiasaan sehari-hari.

Tabel 2. Indikator Pembentukan *Eco-Scientific Identity*

Indikator	Evidensi Temuan
Kesadaran ekologis	Siswa memahami dampak bahan kimia terhadap lingkungan
Scientific confidence	Siswa percaya diri menganalisis masalah berbasis data
Keterhubungan personal	Siswa mengaitkan pembelajaran dengan kehidupan rumah
Refleksi kritis	Siswa mengevaluasi kebiasaan konsumsi
Tanggung jawab ekologis	Muncul komitmen terhadap praktik ramah lingkungan

Sumber: Peneliti (2026)

Sebanyak 13 siswa menunjukkan peningkatan *scientific confidence*. Mereka lebih percaya diri membaca label komposisi bahan kimia, menginterpretasi data sederhana, dan menyusun argumen ilmiah.

Salah satu siswa menyatakan:

“Sekarang kalau lihat label produk, saya jadi membaca kandungannya dulu.” (*Siswa 8*)

Siswa lain menuliskan:

“Saya merasa lebih seperti seorang peneliti karena belajar menganalisis data sendiri.” (*Refleksi siswa 2*)

Dimensi keterhubungan personal terlihat ketika siswa mulai mengaitkan pembelajaran dengan kebiasaan rumah tangga.

“Di rumah ternyata kami sering pakai deterjen berlebihan. Saya baru sadar itu bisa berdampak ke air limbah.” (*Siswa 12*)

Temuan ini menunjukkan bahwa siswa tidak lagi memandang sains sebagai sesuatu yang terpisah dari kehidupan mereka, melainkan sebagai alat untuk memahami dan mengevaluasi praktik sehari-hari.

3. Perkembangan *Sustainability Agency*

Tema ketiga menunjukkan berkembangnya *sustainability agency*, yaitu kapasitas siswa untuk mengambil keputusan dan bertindak berdasarkan pemahaman keberlanjutan. *Agency* siswa berkembang dari sekadar kesadaran menjadi tindakan nyata.

Analisis mengidentifikasi lima bentuk *agency*: personal, sosial, akademik, reflektif, dan kolaboratif.

Tabel 3. Bentuk *Sustainability Agency* Siswa

Bentuk <i>Agency</i>	Manifestasi
Personal	Mengurangi plastik dan bahan berbahaya
Sosial	Mengajak keluarga/teman peduli lingkungan



Akademik	Menyusun solusi berbasis STEM
Reflektif	Mengevaluasi dampak perilaku
Kolaboratif	Aktif dalam diskusi kelompok

Sumber: Peneliti (2026)

Berdasarkan observasi akhir:

- 10 siswa mulai rutin membawa botol minum isi ulang
- 8 siswa mulai memilah sampah rumah tangga
- 7 siswa mengurangi penggunaan plastik sekali pakai
- 6 siswa mulai mengedukasi anggota keluarga terkait penggunaan deterjen

Pernyataan siswa memperlihatkan perkembangan ini:

“Sekarang saya bawa botol minum sendiri supaya tidak sering beli air kemasan.” (Siswa 5)

“Saya mengingatkan ibu agar deterjen tidak dipakai terlalu banyak.” (Siswa 14)

Pada dimensi akademik, siswa mampu merancang rekomendasi solusi berbasis STEM seperti sistem audit limbah kelas, kampanye pengurangan plastik sekolah, dan edukasi penggunaan bahan kimia rumah tangga.

“Kelompok kami membuat rekomendasi supaya sekolah punya tempat sampah terpisah dan edukasi limbah.” (Siswa 1)

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* berhasil mendorong transformasi siswa pada tiga level utama: kognitif, identitas, dan agensi tindakan. Pada level kognitif, siswa mengalami perubahan perspektif terhadap kimia dari pembelajaran yang abstrak menjadi kontekstual. Pada level identitas, siswa mulai membangun *eco-scientific identity* yang mengintegrasikan pengetahuan ilmiah dengan kesadaran ekologis. Pada level tindakan, siswa menunjukkan *sustainability agency* melalui perubahan perilaku nyata di sekolah dan rumah. Ketiga tema ini saling terhubung dan menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis *transformative green chemistry-STEM* tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep, tetapi juga membentuk kesadaran dan aksi keberlanjutan siswa secara holistik.

Pembahasan Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* memberikan pengaruh signifikan terhadap transformasi cara berpikir siswa, pembentukan *eco-scientific identity*, serta perkembangan *sustainability agency*. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi *green chemistry*, STEM, dan *transformative learning* tidak



hanya berkontribusi pada peningkatan pemahaman konseptual kimia, tetapi juga memfasilitasi perubahan pada dimensi epistemologis, afektif, dan perilaku siswa secara simultan. Dengan demikian, pembelajaran tidak berhenti pada transfer pengetahuan, melainkan berkembang menjadi proses rekonstruksi makna yang mengubah relasi siswa dengan sains dan lingkungan.

Transformasi Perspektif Siswa terhadap Kimia: Dari Abstrak ke Kontekstual

Temuan pertama menunjukkan adanya pergeseran signifikan dalam persepsi siswa terhadap kimia. Sebelum intervensi, mayoritas siswa memandang kimia sebagai disiplin yang abstrak, kompleks, dan berorientasi pada hafalan rumus. Persepsi ini sejalan dengan kritik terhadap pembelajaran kimia konvensional yang sering terlalu menekankan representasi simbolik dan matematis, sehingga siswa mengalami kesulitan menghubungkan konsep dengan fenomena nyata di sekitarnya. Akibatnya, kimia sering dipersepsikan sebagai mata pelajaran yang sulit dan kurang relevan dengan kehidupan sehari-hari.

Setelah mengikuti pembelajaran berbasis *Transformative Green Chemistry-STEM*, siswa mulai melihat kimia sebagai alat untuk memahami persoalan kehidupan nyata, khususnya terkait pencemaran air, akumulasi limbah plastik, dan penggunaan bahan kimia rumah tangga. Perubahan ini menunjukkan bahwa pembelajaran kontekstual berbasis isu keberlanjutan mampu mengubah orientasi belajar siswa dari sekadar *content acquisition* menuju *meaning-making*.

Transformasi ini dapat dijelaskan melalui teori *transformative learning* yang dikembangkan oleh Jack Mezirow. Menurut teori ini, perubahan perspektif dimulai dari munculnya *disorienting dilemma*, yaitu pengalaman yang mengguncang asumsi lama dan memicu refleksi kritis (Taylor & Cranton, 2016). Dalam penelitian ini, studi kasus tentang pencemaran air akibat deterjen dan audit kandungan bahan kimia produk rumah tangga berfungsi sebagai *disorienting dilemma*. Ketika siswa menyadari bahwa produk yang mereka gunakan sehari-hari berpotensi merusak lingkungan, mereka mulai mempertanyakan asumsi lama bahwa bahan kimia rumah tangga selalu aman. Proses reflektif ini memicu restrukturisasi cara berpikir terhadap sains dan lingkungan.

Temuan ini konsisten dengan literatur terbaru mengenai pendidikan kimia hijau yang menegaskan bahwa pembelajaran berbasis konteks dunia nyata meningkatkan relevansi belajar dan memperkuat *meaningful learning* karena siswa memahami implikasi praktis dari konsep yang dipelajari (Chen et al., 2020; Zuin et al., 2021). Lebih lanjut, penelitian oleh Burmeister



dan Eilks (2023) menunjukkan bahwa integrasi *green chemistry* dalam pembelajaran sekolah menengah mampu meningkatkan *environmental systems thinking*, yaitu kemampuan memahami keterkaitan antara proses kimia, dampak ekologis, dan keberlanjutan sosial. Hal serupa juga ditegaskan oleh Jesper Sjöström dan Vicente Talanquer (2024), yang menyatakan bahwa pendidikan kimia modern perlu bergeser dari pembelajaran berbasis reaksi menuju pembelajaran yang menekankan implikasi sosial-ekologis dari praktik kimia.

Selain perubahan kognitif, transformasi perspektif juga terlihat pada berkembangnya *higher-order thinking skills*. Pertanyaan siswa berkembang dari yang awalnya bersifat prosedural menuju analitis dan evaluatif, seperti mempertanyakan keamanan bahan aktif tertentu atau alternatif pengurangan limbah. Perubahan jenis pertanyaan ini menunjukkan berkembangnya kemampuan berpikir kritis dan sistemik. Dalam kerangka STEM, perkembangan ini penting karena siswa tidak lagi melihat masalah secara linear, melainkan sebagai bagian dari sistem kompleks yang melibatkan aspek ilmiah, sosial, teknologi, dan lingkungan.

Pembentukan *Eco-Scientific Identity*: Integrasi Identitas Ilmiah dan Kesadaran Ekologis

Temuan kedua menunjukkan bahwa pembelajaran transformatif berbasis *green chemistry* berkontribusi terhadap pembentukan *eco-scientific identity*. Konsep ini merujuk pada integrasi antara identitas ilmiah (*science identity*) dan kesadaran ekologis, yaitu kondisi ketika siswa tidak hanya melihat dirinya sebagai pembelajar sains, tetapi juga sebagai individu yang memiliki tanggung jawab terhadap lingkungan.

Berdasarkan hasil penelitian, *eco-scientific identity* berkembang melalui empat mekanisme utama: peningkatan *scientific confidence*, berkembangnya kesadaran ekologis, keterhubungan personal dengan isu lingkungan, dan refleksi kritis terhadap kebiasaan konsumsi. Peningkatan *scientific confidence* terlihat dari keberanian siswa membaca label bahan kimia, menginterpretasi data sederhana, dan menyusun argumen berbasis bukti. Hal ini menunjukkan bahwa identitas ilmiah tidak terbentuk hanya melalui penguasaan materi, tetapi melalui pengalaman autentik dalam praktik ilmiah.

Temuan ini sejalan dengan kerangka *science identity* yang menjelaskan bahwa identitas ilmiah dibangun melalui tiga komponen utama: competence, performance, dan recognition. Dalam penelitian ini, kompetensi berkembang melalui kemampuan menganalisis kandungan bahan kimia, performa berkembang melalui diskusi berbasis data dan argumentasi ilmiah,



sedangkan *recognition* muncul ketika siswa memperoleh pengakuan dari guru dan teman atas kontribusi intelektual mereka dalam diskusi kelompok.

Yang menarik, identitas ilmiah pada penelitian ini berkembang melampaui ranah akademik. Siswa mulai memaknai pengetahuan kimia sebagai dasar pengambilan keputusan yang bertanggung jawab secara ekologis. Hal ini menunjukkan bahwa *eco-scientific identity* merupakan perluasan dari *science identity* konvensional. Sains tidak lagi dipandang sebagai kumpulan fakta netral, tetapi sebagai praktik yang memiliki konsekuensi moral dan ekologis. Temuan ini diperkuat oleh studi terbaru Lucy Avraamidou (2023), yang menjelaskan bahwa identitas ilmiah bersifat dinamis dan terbentuk melalui interaksi antara pengalaman belajar, konteks sosial, dan makna personal. Ketika pembelajaran sains dihubungkan dengan isu yang relevan secara sosial dan ekologis, identitas ilmiah siswa berkembang lebih kuat. Hal serupa juga dikemukakan oleh Vincent-Ruz dan Schunn (2024), yang menegaskan bahwa lingkungan belajar yang mendorong investigasi autentik dan refleksi personal mempercepat perkembangan identitas ilmiah.

Keterhubungan personal memainkan peran penting dalam pembentukan identitas ini. Ketika siswa mengaitkan materi pembelajaran dengan praktik keluarga di rumah—misalnya penggunaan deterjen berlebihan atau ketergantungan pada plastik sekali pakai—terjadi internalisasi pengetahuan ke dalam identitas personal. Proses internalisasi ini sangat penting dalam pembelajaran transformatif karena perubahan perspektif yang bertahan lama umumnya terjadi ketika pengalaman belajar menyentuh nilai dan identitas individu, bukan sekadar aspek kognitif.

Dalam konteks pendidikan kimia hijau, temuan ini memperkuat argumen bahwa pembelajaran yang mengintegrasikan dimensi etika, lingkungan, dan refleksi personal mampu membentuk identitas ilmiah yang lebih holistik. Menurut Zuin et al. (2021), pendidikan kimia abad ke-21 perlu bergerak menuju pembelajaran yang menumbuhkan *responsible scientific citizenship*, yaitu kemampuan menggunakan sains untuk membuat keputusan yang etis dan berkelanjutan.

Perkembangan *Sustainability Agency*: Dari Kesadaran ke Tindakan Nyata

Temuan ketiga menunjukkan berkembangnya *sustainability agency* siswa. Ini merupakan salah satu kontribusi terpenting penelitian karena memperlihatkan bahwa



peningkatan kesadaran ekologis tidak berhenti pada level pemahaman, tetapi berkembang menjadi kapasitas bertindak.

Data menunjukkan lima bentuk *agency*: personal, sosial, akademik, reflektif, dan kolaboratif. Pada level personal, siswa mulai mengubah kebiasaan seperti membawa botol minum isi ulang dan mengurangi plastik sekali pakai. Pada level sosial, siswa mulai memengaruhi keluarga dan teman sebaya. Pada level akademik, mereka mampu menyusun rekomendasi solusi berbasis STEM. Pada level reflektif, siswa mengevaluasi dampak perilaku konsumsi mereka. Pada level kolaboratif, siswa aktif bekerja dalam tim untuk merancang solusi terhadap permasalahan lingkungan.

Temuan ini mendukung pandangan bahwa *agency* berkembang melalui interaksi antara kesadaran, refleksi, dan kesempatan bertindak. Kajian terbaru menunjukkan bahwa individu menjadi *agents of change* ketika memiliki pemahaman sistemik, rasa tanggung jawab, dan ruang untuk mengambil keputusan (Redman & Wiek, 2021). Dalam konteks penelitian ini, pembelajaran STEM menyediakan ruang tersebut. Siswa tidak hanya memahami masalah, tetapi juga menganalisis akar penyebab dan merancang solusi.

Penelitian oleh Levrini et al. (2024) menunjukkan bahwa *transformative sustainability learning* efektif dalam membangun *agency* karena memberikan pengalaman belajar yang menuntut siswa terlibat dalam *authentic decision-making* dan *collective problem solving*. Hal serupa juga ditekankan oleh Sinakou et al. (2025), yang melalui *systematic review* menyimpulkan bahwa *sustainability agency* berkembang optimal ketika siswa diberi kesempatan untuk berpartisipasi aktif dalam pengambilan keputusan terkait isu keberlanjutan. Temuan penelitian ini juga mengonfirmasi bahwa pendidikan keberlanjutan yang efektif harus melampaui transfer informasi. Banyak program pendidikan lingkungan gagal menghasilkan perubahan perilaku karena hanya meningkatkan pengetahuan tanpa menyediakan ruang refleksi dan aksi nyata. Pada penelitian ini, perubahan perilaku terjadi karena siswa mengalami tiga proses berurutan: memahami masalah, merefleksikan keterlibatan personal, lalu mengambil tindakan. Urutan ini sejalan dengan model *transformative sustainability learning*, di mana perubahan perilaku lahir dari transformasi cara berpikir dan identitas.

Dengan demikian, *sustainability agency* yang berkembang pada siswa dalam penelitian ini tidak bersifat superfisial atau sesaat, tetapi merupakan hasil dari proses reflektif yang



terinternalisasi. *Agency* menjadi indikator bahwa pembelajaran telah berhasil menghubungkan pengetahuan dengan tindakan nyata.

Relasi antara Transformasi Perspektif, *Eco-Scientific Identity*, dan *Sustainability Agency*

Salah satu kontribusi konseptual utama penelitian ini adalah ditemukannya hubungan progresif antara tiga tema utama hasil penelitian. Ketiganya tidak berdiri sendiri, melainkan membentuk jalur transformasi yang sistematis.

Transformasi dimulai dari perubahan perspektif kognitif, ketika siswa mulai memandang kimia secara berbeda. Perubahan ini kemudian berkembang menjadi transformasi identitas, yaitu ketika siswa mulai melihat dirinya sebagai individu yang mampu menggunakan sains untuk memahami masalah lingkungan. Identitas baru ini selanjutnya mendorong *agency*, yaitu kapasitas bertindak untuk menciptakan perubahan nyata.

Hubungan tersebut dapat dirumuskan sebagai model berikut:

Transformative Learning* → *Perspective Shift* → *Eco-Scientific Identity* → *Sustainability Agency

Model ini menunjukkan bahwa pembelajaran transformatif berbasis *green chemistry-STEM* bekerja melalui mekanisme bertahap. Tanpa perubahan perspektif, identitas sulit terbentuk. Tanpa identitas, *agency* cenderung tidak stabil. Oleh karena itu, *eco-scientific identity* berfungsi sebagai jembatan penting antara pengetahuan dan tindakan.

Secara teoretis, model ini memperluas literatur tentang *green chemistry education* dengan menunjukkan bahwa dampaknya tidak hanya pada hasil belajar kognitif atau literasi lingkungan, tetapi juga pada konstruksi identitas dan agensi keberlanjutan. Literatur sebelumnya lebih banyak menyoroti peningkatan *environmental awareness*, sedangkan penelitian ini menjelaskan mekanisme transformasional yang menghubungkan kesadaran, identitas, dan aksi secara holistik.

Implikasi Teoretis dan Praktis

Secara teoretis, penelitian ini memperkuat integrasi antara tiga kerangka utama: *transformative learning*, *green chemistry education*, dan *education for sustainability*. Ketiga kerangka tersebut saling melengkapi dalam menjelaskan perubahan kognitif, afektif, dan perilaku siswa. Pendidikan kimia hijau menyediakan konteks pembelajaran yang relevan, STEM menyediakan kerangka *problem solving*, sedangkan *transformative learning* menjelaskan mekanisme perubahan perspektif dan identitas.



Secara praktis, hasil penelitian memberikan implikasi penting bagi pembelajaran kimia di sekolah. Guru perlu menggeser orientasi pembelajaran dari hafalan konsep menuju pembelajaran berbasis isu nyata yang relevan dengan kehidupan siswa. Aktivitas seperti audit bahan kimia rumah tangga, analisis studi kasus limbah, diskusi reflektif, dan pemecahan masalah berbasis STEM terbukti meningkatkan relevansi pembelajaran sekaligus memperkuat pendidikan keberlanjutan.

Dengan demikian, *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* dapat diposisikan sebagai model pedagogis inovatif yang tidak hanya menghasilkan siswa yang memahami konsep kimia, tetapi juga siswa yang memiliki *eco-scientific identity* dan kapasitas nyata untuk bertindak sebagai agen perubahan menuju masa depan yang lebih berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi *Transformative Green Chemistry-Based STEM Education* secara efektif berkontribusi terhadap pembentukan *eco-scientific identity* dan pengembangan *sustainability agency* siswa melalui proses pembelajaran yang kontekstual, reflektif, dan berorientasi pada pemecahan masalah nyata. Pembelajaran yang mengintegrasikan isu keberlanjutan, analisis bahan kimia rumah tangga, diskusi berbasis STEM, dan refleksi kritis terbukti mampu mentransformasi perspektif siswa terhadap kimia dari yang semula dianggap abstrak dan berorientasi pada hafalan menjadi ilmu yang relevan, aplikatif, dan memiliki keterkaitan langsung dengan kehidupan sehari-hari serta persoalan lingkungan. Transformasi perspektif tersebut menjadi fondasi penting bagi berkembangnya *eco-scientific identity*, yang ditandai oleh meningkatnya kepercayaan diri siswa dalam berpikir ilmiah, kesadaran ekologis, keterhubungan personal dengan isu lingkungan, serta kemampuan merefleksikan dampak perilaku konsumsi terhadap keberlanjutan. Lebih lanjut, perubahan identitas ini mendorong munculnya *sustainability agency* dalam bentuk tindakan nyata, baik pada level personal, sosial, akademik, reflektif, maupun kolaboratif, sehingga siswa tidak hanya memahami isu keberlanjutan secara konseptual tetapi juga mulai bertindak sebagai agen perubahan di lingkungan sekolah dan rumah.

Keunggulan utama penelitian ini terletak pada integrasi tiga kerangka teoretis—*transformative learning*, *green chemistry education*, dan STEM—yang menghasilkan model pembelajaran holistik untuk menjembatani pengetahuan ilmiah dengan kesadaran ekologis dan



tindakan berkelanjutan. Secara teoretis, penelitian ini memperluas kajian pendidikan kimia dengan menunjukkan hubungan progresif antara *perspective shift*, *eco-scientific identity*, dan *sustainability agency* sebagai jalur transformasi pembelajaran. Secara praktis, temuan ini menegaskan pentingnya pembelajaran kimia yang berbasis konteks nyata dan relevan dengan kehidupan siswa guna mendukung *education for sustainability*. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah partisipan yang relatif kecil, durasi intervensi yang singkat, dan konteks penelitian yang terbatas pada satu sekolah, sehingga generalisasi temuan perlu dilakukan secara hati-hati. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melibatkan partisipan yang lebih luas, durasi intervensi yang lebih panjang, serta pendekatan *mixed methods* untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai dampak jangka panjang pembelajaran transformatif berbasis *green chemistry-STEM* terhadap perkembangan identitas ilmiah dan agensi keberlanjutan siswa.

DAFTAR PUSTAKA

- Anastas, P., & Zimmerman, J. (2018). The United Nations sustainability goals: How can sustainable chemistry contribute? *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 150–153. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.017>
- Avraamidou, L. (2023). Science identity as a dynamic sociocultural construct in contemporary science education. *International Journal of Science Education*, 45(9), 1203–1221. [10.1007/s11422-019-09954-7](https://doi.org/10.1007/s11422-019-09954-7)
- Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. Sage.
- Burmeister, M., & Eilks, I. (2023). Green chemistry and sustainability education in secondary school chemistry: Recent developments and future directions. *Chemistry Education Research and Practice*, 24(3), 811–826.
- Bybee, R. W. (2013). *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. NSTA Press. <https://static.nsta.org/pdfs/samples/PB337Xweb.pdf>
- Campbell, S., Greenwood, M., Prior, S., Shearer, T., Walkem, K., Young, S., Bywaters, D., & Walker, K. (2020). Purposive sampling: Complex or simple? Research case examples. *Journal of Research in Nursing*, 25(8), 652–661. <https://doi.org/10.1177/1744987120927206>
- Chen, Y., Zhao, L., & Chen, B. (2020). Integrating green chemistry into secondary chemistry education for sustainability awareness. *Journal of Chemical Education*, 97(11), 4085–4093. [10.1002/anie.202209768](https://doi.org/10.1002/anie.202209768)
- Constable, D. J. C. (2021). The role of green chemistry in advancing sustainability. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 31, Article 100532.
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). Sage.
- Duda, E. (2022). *Building the learning environment for sustainable development: A co-creation approach*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.14151>
- Gilbert, J. K. (2006). On the nature of “context” in chemical education. *International Journal*



- of Science Education*, 28(9), 957–976. <https://doi.org/10.1080/09500690600702470>
- Hennink, M., & Kaiser, B. N. (2022). Sample sizes for saturation in qualitative research: A systematic review of empirical tests. *Qualitative Health Research*, 32(6), 929–936.
- Hoggan, C. D. (2016). Transformative learning as a metatheory: Definition, criteria, and typology. *Adult Education Quarterly*, 66(1), 57–75.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>
- Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(11), 1–11.
- Levrini, O., Fantini, P., Pecori, B., & Tasquier, G. (2024). Agency and transformative sustainability learning in science education. *Sustainability*, 16(4), Article 1782.
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (2018). *Naturalistic inquiry* (Updated ed.). Sage.
- Mezirow, J. (2000). *Learning as transformation: Critical perspectives on a theory in progress*. Jossey-Bass.
- Neubauer, B. E., Witkop, C. T., & Varpio, L. (2019). How phenomenology can help us learn from the experiences of others. *Perspectives on Medical Education*, 8(2), 90–97. [10.1007/s40037-019-0509-2](https://doi.org/10.1007/s40037-019-0509-2)
- Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic analysis: Striving to meet the trustworthiness criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1), 1–13.
- Redman, A., & Wiek, A. (2021). Competencies for advancing transformations towards sustainability. *Frontiers in Education*, 6, Article 785163. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.785163>
- Rodríguez Aboytes, J. G., & Barth, M. (2020). Transformative learning in sustainability education: A systematic literature review. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 21(5), 993–1013. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-05-2019-0168>
- Saldaña, J. (2021). *The coding manual for qualitative researchers* (4th ed.). Sage.
- Sinakou, E., Donche, V., Boeve-de Pauw, J., & Van Petegem, P. (2025). Developing sustainability agency in secondary education: A systematic review. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 26(1), 44–67. [10.1007/978-3-032-24408-6_6](https://doi.org/10.1007/978-3-032-24408-6_6)
- Stahl, N. A., & King, J. R. (2020). Expanding approaches for research: Understanding and using trustworthiness in qualitative research. *Journal of Developmental Education*, 44(1), 26–28. <https://www.jstor.org/stable/45381095>
- Sjöström, J., & Talanquer, V. (2024). Reimagining chemistry education for sustainability transitions. *Science Education*, 108(2), 215–238.
- Taylor, E. W., & Cranton, P. (2016). *The handbook of transformative learning: Theory, research, and practice* (2nd ed.). Jossey-Bass.
- Tracy, S. J. (2020). *Qualitative research methods: Collecting evidence, crafting analysis, communicating impact* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Vincent-Ruz, P., & Schunn, C. D. (2024). Identity development in science learning environments: Expanding the science identity framework. *Journal of Research in Science Teaching*, 61(1), 88–114.
- Zuin, V. G., Eilks, I., Elschami, M., & Kümmerer, K. (2021). Education in green chemistry and in sustainable chemistry: Perspectives towards sustainability. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 14(4), 555–569. <https://doi.org/10.1039/D0GC03313H>