

BAB I

PENDAHULUAN

Bab ini memaparkan mengenai rasional dan latar belakang mengapa penelitian ini perlu dilakukan, rumusan masalah dan pertanyaan penelitian yang perlu dijawab melalui penelitian ini. Pada bab ini juga dirumuskan tujuan, manfaat, ruang lingkup penelitian, definisi operasional, signifikansi penelitian dan kontribusinya terhadap bidang ilmu kimia, serta struktur organisasi disertasi sebagai gambaran bagaimana sistematika penulisan disertasi ini.

1.1 Latar Belakang Masalah

Sustainable Development (SD) yang digagas oleh *World Commission on Environment and Development* (WCED) pada tahun 1981 menjadi perhatian global hingga saat ini (Smyth, 1995). SD mengedepankan pentingnya keseimbangan antara tiga pilar utama, yaitu lingkungan, sosial, dan ekonomi, sebagai upaya menciptakan keberlanjutan pada berbagai bidang kehidupan (Gericke *et al.*, 2019). *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) mengusulkan tujuh belas subtema bagi ketiga pilar atau dimensi SD yang dituangkan dalam *Sustainable Development Goals* (SDGs). Berbagai upaya perlu dilakukan untuk mencapai SDGs tersebut, termasuk dalam bidang pendidikan. Pendidikan memegang posisi strategis dalam upaya pencapaian SDGs, karena melalui pendidikan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat akan pentingnya menjaga keberlanjutan kehidupan makhluk hidup di dunia. Upaya implementasi pendidikan berkelanjutan, yang dikenal dengan istilah *Education for Sustainable Development* (ESD), telah banyak diteliti.

ESD merupakan pendekatan pendidikan komprehensif yang bertujuan untuk membekali individu dengan pengetahuan, keterampilan, nilai, dan sikap yang diperlukan untuk berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan. Dengan

menggunakan pendekatan ESD diharapkan akan terbentuk generasi muda yang sadar dan bertanggung jawab terhadap keberlanjutan (Paristiowati *et al.*, 2022). Perguruan tinggi sebagai institusi pendidikan tinggi memiliki tanggung jawab untuk membentuk generasi muda sebagai lulusan yang tidak hanya menguasai ilmu pengetahuan, tetapi juga memiliki kesadaran akan pentingnya keberlanjutan dalam kehidupan profesional mereka (Amador *et al.*, 2015; Milama *et al.*, 2019; Pike *et al.*, 2003). Oleh sebab itu, penerapan ESD perlu diperluas dan diperkuat pada berbagai disiplin ilmu di perguruan tinggi, termasuk bidang kimia, guna menyiapkan mahasiswa yang memahami dan siap mendukung tujuan-tujuan akan keberlanjutan (Elschami & Kümmerer, 2020; Paristiowati *et al.*, 2022).

Pendidikan kimia memegang peranan penting pada implementasi ESD dalam membekali pemahaman mahasiswa terhadap kehidupan berkelanjutan (Burmeister *et al.*, 2012; Elschami & Kümmerer, 2020). Kimia organik yang merupakan salah satu materi yang dipelajari pada pendidikan kimia, memiliki kaitan erat dengan kehidupan sehari-hari (Lopez *et al.*, 2011; O'Dwyer & Childs, 2017). Untuk meningkatkan pemahaman kimia organik, mahasiswa selain mempelajari teori juga melakukan praktik di laboratorium (Burmeister *et al.*, 2012; Juntunen & Aksela, 2014; MacKellar *et al.*, 2020; Timmer *et al.*, 2018). Praktikum kimia organik dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap materi yang dipelajari, karena mahasiswa mendapatkan pengalaman langsung bagaimana cara mendapatkan data atau informasi terkait dengan konsep-konsep kimia organik yang dipelajari (Kolb, 1981). Praktikum kimia organik umumnya meliputi proses isolasi senyawa organik dari bahan alam, sintesis senyawa organik, pemisahan, dan pemurnian (Wu *et al.*, 2019).

Pemisahan dan pemurnian senyawa organik merupakan keterampilan dasar yang harus dikuasai oleh mahasiswa, karena keduanya menentukan keberhasilan langkah-langkah praktikum kimia organik selanjutnya. Dengan menguasai teknik pemisahan dan pemurnian, mahasiswa selanjutnya dapat menentukan struktur senyawa dari hasil isolasi atau reaksi (Graham *et al.*, 2014). Oleh karena itu, mahasiswa pendidikan kimia sebagai calon guru kimia dituntut terampil melakukan

pemisahan dan pemurnian senyawa organik yang akan banyak bersinggungan dengan beragam aktivitas di laboratorium.

Praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik, merupakan praktikum yang banyak menggunakan pelarut yang mudah menguap, berbahaya bagi kesehatan, mudah terbakar, dan menghasilkan limbah yang banyak (Sudarmin, 2013), sehingga tidak aman bagi kesehatan dan kurang ramah lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan suatu strategi berkelanjutan yang dapat menanggulangi penggunaan bahan kimia dan kegiatan praktikum yang kurang ramah lingkungan. Salah satu strategi yang tepat untuk praktikum kimia organik yang mendukung keberlanjutan, yaitu dengan menerapkan pendekatan kimia hijau (*green chemistry*).

Kimia hijau merupakan pendekatan dalam bidang kimia yang bertujuan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dengan menggunakan bahan-bahan yang tidak berbahaya, mengurangi jumlah bahan yang digunakan, dan mengurangi produk limbah (Anastas, 2013; Anastas & Warner, 1998). Selama beberapa dekade terakhir, penerapan kimia hijau dalam pendidikan kimia telah banyak dijalankan sebagai upaya mendukung praktik keberlanjutan dan memperkenalkan konsep keberlanjutan secara aplikatif kepada mahasiswa (Burmeister *et al.*, 2012; Fasciotti, 2017).

Di tingkat perguruan tinggi, pendekatan kimia hijau dipergunakan karena selaras dengan tujuan pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab (Anastas & Eghbali, 2010; Mooney, 2020). Melalui penerapan prinsip-prinsip yang terkandung dalam pendekatan kimia hijau, mahasiswa dibekali pemahaman tentang pentingnya penggunaan bahan kimia yang aman dalam jumlah minimal serta pengurangan limbah seminimal mungkin (Lasia *et al.*, 2012). Perguruan tinggi di Indonesia telah mengintegrasikan prinsip kimia hijau ke dalam kurikulum untuk menjawab tuntutan global akan keberlanjutan. Integrasi ini bertujuan membekali mahasiswa dengan pengetahuan dan keterampilan inovatif guna mendukung praktik kimia berkelanjutan (Hamidah *et al.*, 2017).

Dalam mewujudkan praktik kimia yang berkelanjutan, integrasi prinsip-prinsip kimia hijau dalam pembelajaran menjadi kebutuhan strategis di pendidikan

tinggi, khususnya pada kegiatan praktikum. Salah satu prinsip penting dari kimia hijau adalah pengurangan limbah, yang secara praktis dapat diterapkan melalui pelaksanaan eksperimen dengan skala bahan yang lebih kecil. Praktikum kimia yang dirancang dengan pendekatan skala mikro telah diidentifikasi sebagai strategi yang efektif dalam mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan jumlah limbah laboratorium tanpa mengurangi tujuan pembelajaran (Albright *et al.*, 2021; Pavia *et al.*, 2002, 2018). Namun demikian, penting untuk memastikan bahwa meskipun volume bahan dikurangi, kualitas data hasil eksperimen tetap harus dapat diamati dengan jelas dan memiliki akurasi yang memadai. Penelitian sebelumnya menunjukkan walaupun eksperimen skala mikro menggunakan volume kecil, hasil secara konseptual tetap valid dan dapat diandalkan (Abdullah *et al.*, 2009). Hal tersebut juga didukung oleh penegasan dari Anastas dan Warner (2000) akan pentingnya prosedur yang sesuai agar akurasi dan validitas data tetap terjaga pada eksperimen kimia hijau skala mikro.

Ditinjau dari aspek pedagogis, beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketika eksperimen skala mikro dirancang dengan peralatan dan prosedur yang tepat, data yang dihasilkan tetap valid dan relevan untuk penguasaan konsep dan pengembangan keterampilan ilmiah (Mafumiko, 2008; Pavia *et al.*, 2018). Penelitian yang dilakukan oleh Hanson dan Acquah (2014) juga memberikan bukti empiris bahwa pendekatan eksperimen skala mikro yang dilakukan secara kolaboratif memiliki potensi besar untuk mendukung penguatan praktik laboratorium berbasis konsep dan mendorong perkembangan keterampilan penalaran ilmiah melalui diskusi kelompok kecil dan refleksi selama kegiatan praktikum. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Abdullah *et al.* (2009) terhadap guru dan peserta didik di sekolah menengah, menunjukkan bahwa pendekatan skala mikro dapat meningkatkan pemahaman konsep kimia, bahkan mereka memiliki pandangan positif terhadap eksperimen skala mikro. Beberapa temuan penelitian tersebut menunjukkan bahwa meskipun menggunakan jumlah bahan dan alat yang minimal, pendekatan eksperimen skala mikro tetap mampu memberikan pengalaman belajar yang bermakna, menyenangkan, dan interaktif.

Beberapa upaya telah dilakukan untuk mengintegrasikan prinsip-prinsip kimia hijau dalam pembelajaran dan praktikum kimia. Upaya tersebut meliputi pengembangan kit peralatan dan prosedur praktikum kimia organik skala mikro (Kadarohman, 1997), perancangan modul kimia hijau untuk mata kuliah kimia dasar (Wahyuningsih & Rohmah, 2017), serta pengembangan modul praktikum analisis senyawa kimia berbasis kimia hijau (Susanti, 2022). Selain itu, pendekatan kimia hijau juga diterapkan melalui pengembangan pembelajaran kimia yang menekankan pencegahan limbah, pemilihan pelarut yang lebih aman, efisiensi energi, serta penciptaan lingkungan belajar yang aman, baik di kelas maupun di laboratorium (Idrus *et al.*, 2020; Mitarlis *et al.*, 2023). Sejalan dengan berbagai inisiatif tersebut, penerapan praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik melalui pendekatan eksperimen skala mikro menjadi alternatif strategis yang tidak hanya mendukung pengurangan limbah laboratorium, tetapi juga merepresentasikan penerapan nyata prinsip kimia hijau dalam praktik pembelajaran, sebagai bagian dari upaya mencapai tujuan pendidikan berkelanjutan.

Meskipun integrasi prinsip kimia hijau dan skala mikro pada praktikum telah menunjukkan berbagai manfaat, namun penerapan prinsip tersebut dalam mendukung keberlanjutan pendidikan kimia di tingkat sekolah menengah dan perguruan tinggi masih menghadapi tantangan, karena prinsip kimia hijau dan skala mikro belum sepenuhnya terintegrasi secara eksplisit dalam kurikulum yang mendukung keberlanjutan. Hal tersebut ditunjukkan oleh penelitian yang telah dilakukan Burmeister dan Eilks (2013), bahwa pengetahuan guru tentang isu-isu keberlanjutan belum berkembang dengan baik. Banyak guru tampak berpengetahuan luas ketika ditanya tentang keberlanjutan dan ESD, namun, ide-ide mereka dangkal dan mereka tidak dapat mengaitkan pengetahuan tersebut dengan praktik di kelas. Terungkap juga bahwa guru kurang memiliki keterampilan dan pengetahuan untuk menerapkan ESD (Burmeister *et al.*, 2012).

Di tingkat pendidikan tinggi, temuan terbatas dari hasil analisis kebutuhan terhadap mahasiswa calon guru kimia di Provinsi Kepulauan Riau juga

mengungkapkan bahwa pemahaman mereka tentang kimia hijau dalam mendukung konsep keberlanjutan masih relatif rendah (Khoirunnisa *et al.*, 2022). Khoirunnisa *et al.* (2024) melalui studi bibliometrik juga memperkuat temuan tentang keterbatasan implementasi eksperimen skala mikro di perguruan tinggi dalam mendukung keberlanjutan. Temuan ini menunjukkan adanya peluang strategis untuk mengintegrasikan eksperimen skala mikro secara sistematis ke dalam kurikulum sebagai upaya implementasi prinsip-prinsip kimia hijau yang selaras dengan tujuan pembangunan keberlanjutan (Mitarlis, 2020; Mitarlis *et al.*, 2018b; Mooney, 2020).

Sejalan dengan itu, studi lainnya juga menekankan potensi penerapan pembelajaran aktif dalam konteks eksperimen kimia hijau melalui pendekatan-pendekatan yang menekankan keterlibatan langsung mahasiswa dalam kegiatan laboratorium yang aplikatif dan kontekstual (Savec & Mlinarec, 2021). Namun, untuk menerjemahkan prinsip kimia hijau dan skala mikro ke dalam praktik laboratorium yang bermakna dan berkelanjutan, mahasiswa tidak cukup menjalankan praktikum secara verifikatif dan prosedural, mereka dituntut menguasai suatu keterampilan ilmiah yang mendukung praktik di laboratorium (Anjugam & Chellamani, 2024; Gizaw & Sota, 2023). Adapun keterampilan ilmiah yang dibutuhkan bagi mahasiswa calon guru kimia dalam praktik laboratorium adalah keterampilan proses sains (Sarah & Kabunga, 2019).

Seorang pendidik bidang sains, termasuk kimia, seyogyanya sudah menguasai keterampilan proses sains terlebih dahulu sebelum mengajarkannya kepada peserta didik (Ang Shu & Eng Tek, 2018; Radford *et al.*, 1992). Keterampilan proses sains meliputi kegiatan merumuskan pertanyaan dan hipotesis, melakukan klasifikasi dan observasi, merancang dan melakukan percobaan, menginterpretasi dan menarik kesimpulan, serta mengkomunikasikan hasil (Brotherton & Preece, 1995; Rustaman, 2005). Penguasaan keterampilan proses sains dapat meningkatkan kemampuan mahasiswa calon guru kimia dalam memproses informasi secara kritis, baik terhadap fakta empiris, nilai, dan sikap ilmiah (Duruk *et al.*, 2017; Karsli *et al.*, 2009; Wardani, 2008). Penguasaan

keterampilan proses sains dalam praktik laboratorium tidak hanya penting untuk meningkatkan kemampuan investigatif dan analitis, tetapi juga menjadi fondasi utama bagi mahasiswa calon guru kimia dalam menguasai konsep-konsep ilmiah secara mendalam (Ozgun & Yilmaz, 2018; Shahali & Halim, 2010).

Penguasaan konsep merupakan aspek penting yang harus dimiliki oleh mahasiswa calon guru kimia, karena pemahaman yang mendalam terhadap konsep-konsep kimia tidak hanya akan membentuk landasan pengetahuan profesional mereka, tetapi juga menentukan kualitas pembelajaran yang akan mereka fasilitasi di kelas (Tan *et al.*, 2020). Calon guru yang menguasai konsep dengan baik akan mampu menjelaskan fenomena ilmiah secara logis, mengaitkan teori dengan praktik, serta mengembangkan strategi pembelajaran yang sesuai dengan karakteristik peserta didik (Mahaffy, 2015; Talanquer & Pollard, 2017). Selain itu, penguasaan konsep yang kuat memungkinkan mereka untuk membimbing peserta didiknya dalam membangun pengetahuan secara konstruktif dan menghindari miskonsepsi yang umum terjadi dalam pembelajaran kimia. Oleh karena itu, penguatan penguasaan konsep menjadi prioritas dalam pendidikan calon guru demi menciptakan pembelajaran kimia yang bermakna dan berorientasi pada pemahaman ilmiah yang komprehensif (Kind, 2010).

Selain penguasaan keterampilan proses sains dan pemahaman konsep yang mendalam, mahasiswa calon guru kimia juga perlu memiliki kesadaran keberlanjutan sebagai dimensi esensial dalam menerapkan praktikum yang tidak hanya efektif secara akademik, tetapi juga selaras dengan prinsip-prinsip kimia keberlanjutan (Burmeister *et al.*, 2012; Flynn *et al.*, 2019). Kesadaran ini penting untuk menumbuhkan sikap bertanggungjawab terhadap dampak lingkungan yang dimulai dari aktivitas laboratorium, sehingga mendorong pemilihan metode eksperimen yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Anastas & Warner, 1998; Mitarlis *et al.*, 2018a).

Lebih lanjut, dalam menyikapi kebutuhan akan perlunya penerapan prinsip kimia hijau dan skala mikro dalam kegiatan praktikum, diperlukan kegiatan praktik laboratorium yang memungkinkan mahasiswa menerapkan prinsip tersebut

sekaligus mendapatkan pengalaman belajar yang bermakna dalam mendukung konsep keberlanjutan (Savec & Mlinarec, 2021). Untuk mewujudkan integrasi praktikum kimia hijau dan skala mikro yang mendukung keberlanjutan, dibutuhkan suatu model pembelajaran yang bermakna sekaligus dapat membekali mahasiswa dengan keterampilan proses sains, penguasaan konsep materi, dan kesadaran akan keberlanjutan secara bersamaan (Stanley, 2021). Salah satu model pembelajaran yang sudah terbukti efektif dalam mendukung pendidikan berkelanjutan dengan cara mengintegrasikan beragam aktivitas ilmiah, baik dalam bentuk penelitian maupun percobaan, ke dalam proses pembelajaran, yaitu model pembelajaran berbasis proyek (Erwin *et al.*, 2018).

Pembelajaran berbasis proyek mendorong kemandirian mahasiswa dalam merancang dan melaksanakan suatu proyek, sehingga menghasilkan pengalaman belajar yang lebih mendalam dan bermakna (Anastas & Eghbali, 2010; Mitarlis *et al.*, 2023). Melalui pembelajaran berbasis proyek, mahasiswa calon guru kimia juga dibekali dengan kemampuan memecahkan masalah nyata di lingkungan sekitar mereka, seperti menganalisis dampak lingkungan akibat penggunaan bahan kimia yang berlebihan dalam laboratorium (Burrows *et al.*, 2017). Oleh karena itu, model pembelajaran berbasis proyek tidak hanya mampu memfasilitasi pendalaman penguasaan konsep mahasiswa, tetapi juga mampu mengasah keterampilan proses sains sekaligus menumbuhkan kesadaran akan keberlanjutan melalui tahapan-tahapan pembelajarannya (Anastas & Eghbali, 2010; Mitarlis *et al.*, 2023; Paristiowati *et al.*, 2022).

Pentingnya pengembangan keterampilan proses sains ditegaskan dalam penelitian yang menunjukkan bahwa mahasiswa calon guru sering kali memiliki keterampilan proses sains yang belum optimal, terutama dalam merancang dan melaksanakan eksperimen secara mandiri dan reflektif. Hal ini tercermin dalam rendahnya kemampuan mereka dalam menyusun hipotesis, observasi sistematis, dan interpretasi data (Rauf *et al.*, 2013; N. Y. Rustaman, 2005). Di sisi lain, penguasaan konsep kimia juga masih menunjukkan tantangan, yang teridentifikasi sebagai kelemahan konseptual mahasiswa calon guru kimia (Borrull & Valls, 2021;

Wheeldon, 2017). Selain itu, kesadaran mahasiswa terhadap keberlanjutan cenderung belum berkembang secara menyeluruh di semua dimensi (kognitif, afektif, dan perilaku) (Ariza *et al.*, 2021; Bashirun, 2019; Gericke *et al.*, 2019), sehingga diperlukan program pembelajaran yang secara eksplisit mengintegrasikan dimensi keberlanjutan dalam praktik laboratorium.

Praktikum kimia dalam konteks pendidikan tinggi selama ini masih didominasi oleh metode praktikum yang berorientasi pada pembuktian konsep-konsep yang telah dijelaskan sebelumnya di kelas. Pelaksanaan praktikum seperti ini cenderung menempatkan mahasiswa dalam posisi pasif sebagai pelaksana instruksi yang sudah terstruktur dengan ketat, sehingga ruang untuk mengeksplorasi ide, mengambil keputusan ilmiah, maupun mengembangkan kreativitas dalam proses eksperimen menjadi terbatas (Abraham & Millar, 2008; Domin, 2007; Hofstein & Lunetta, 2004). Akibatnya, pengembangan keterampilan proses sains mahasiswa tidak berkembang secara optimal, penguasaan konsep hanya bersifat prosedural, dan kesadaran keberlanjutan dalam praktik laboratorium kimia masih kurang mendapatkan perhatian (Banks *et al.*, 2020; Khoirunnisa, Anwar, *et al.*, 2024; Nakhleh *et al.*, 2002).

Kondisi ini menegaskan adanya kebutuhan akan inovasi dalam penyelenggaraan praktikum kimia yang lebih dari sekadar reproduksi prosedur, tetapi mampu memberikan pengalaman belajar yang autentik, menantang, dan bermakna. Inovasi tersebut harus mendorong mahasiswa untuk aktif berpartisipasi dalam merancang dan mengembangkan eksperimen, berpikir kritis dalam memecahkan masalah, serta menginternalisasi nilai-nilai keberlanjutan dalam praktik laboratorium (Eilks & Hofstein, 2015; Prince & Felder, 2006). Lebih jauh lagi, transformasi praktikum perlu diarahkan untuk mendukung capaian keterampilan abad ke-21 yang meliputi kemampuan berkolaborasi, berkomunikasi, berpikir kritis, dan berkreasi, yang dioperasionalkan ke dalam keterampilan proses sains (Rustaman, 2022), sekaligus mengintegrasikan prinsip kimia hijau dalam tahapan kegiatan (Anastas & Warner, 1998).

Sebagai jawaban atas kebutuhan tersebut, pendekatan berbasis proyek

menjadi salah satu strategi pembelajaran yang relevan untuk diintegrasikan dalam praktikum kimia. Melalui pendekatan ini, mahasiswa tidak hanya mengerjakan instruksi yang sudah tersedia, tetapi juga dilibatkan secara aktif dalam perencanaan, pelaksanaan, hingga evaluasi eksperimen, sehingga proses belajar menjadi lebih bermakna, kontekstual, dan mendukung pengembangan keterampilan ilmiah serta sikap keberlanjutan (Bell, 2010; Thomas, 2000). Selain itu, penerapan eksperimen skala mikro sebagai wujud penerapan prinsip kimia hijau dalam eksperimen kimia mampu mengefisienkan penggunaan bahan dan energi, mengurangi limbah, serta meningkatkan aspek keamanan dalam praktik laboratorium, yang sekaligus memperkuat dimensi ramah lingkungan dari kegiatan praktikum (McLaughlin & Patel, 2017; Nakhleh *et al.*, 2002).

Berdasarkan landasan tersebut, dirumuskanlah program eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) sebagai inovasi praktikum yang mengintegrasikan pendekatan berbasis proyek dengan prinsip kimia hijau serta penerapan skala mikro dalam eksperimen pemisahan dan pemurnian senyawa organik. Program ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan praktikum verifikatif dengan menyediakan pengalaman belajar yang interaktif, reflektif, dan berorientasi pada pengembangan keterampilan proses sains, penguasaan konsep secara mendalam, serta kesadaran keberlanjutan. Dengan demikian, eksperimen Khimpro tidak hanya menjadi alternatif desain praktikum yang lebih efektif, tetapi juga menawarkan kontribusi substantif dalam upaya transformasi pendidikan kimia menuju arah yang lebih relevan dengan tuntutan zaman sekaligus berwawasan lingkungan demi mendukung tercapainya tujuan *Education for Sustainable Development* (ESD).

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah utama dalam penelitian ini adalah “bagaimana desain program eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) pada praktikum pemisahan dan

pemurnian senyawa organik yang mampu mengembangkan keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran keberlanjutan mahasiswa calon guru kimia?”

Mengacu pada rumusan masalah utama di atas, selanjutnya dirumuskan beberapa pertanyaan penelitian sebagai berikut.

1. Bagaimana hasil pengembangan program eksperimen Khimpro pada setiap tahapan DDR untuk topik praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik?
2. Bagaimana karakteristik program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik yang mampu mengembangkan keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran keberlanjutan mahasiswa?
3. Bagaimana efektivitas program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik terhadap keterampilan proses sains mahasiswa calon guru kimia?
4. Bagaimana efektivitas program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik terhadap penguasaan konsep mahasiswa calon guru kimia?
5. Bagaimana kesadaran keberlanjutan mahasiswa calon guru kimia setelah mengikuti program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik?

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan mengevaluasi program eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik sebagai upaya membangun keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran keberlanjutan mahasiswa calon guru kimia. Secara khusus, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut.

1. Mengkaji hasil pengembangan program eksperimen Khimpro pada setiap tahapan DDR untuk topik praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik.
2. Mengkaji karakteristik program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik.
3. Mengukur efektivitas program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik terhadap keterampilan proses sains mahasiswa.
4. Mengukur efektivitas program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik terhadap penguasaan konsep mahasiswa.
5. Menganalisis kesadaran keberlanjutan mahasiswa calon guru kimia setelah mengikuti program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat seluas-luasnya, baik secara teoritis (keilmuan) maupun praktis (penerapan) sebagai berikut.

1.4.1 Manfaat Teoritis

1. Menambah wawasan pengetahuan dan kajian terkait pengembangan program eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) yang efektif dalam memberikan perubahan terhadap keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran keberlanjutan mahasiswa.
2. Menambah referensi sebagai bahan diskusi ilmiah dalam penelitian pendidikan terkait teori-teori yang telah ada mengenai pembelajaran berbasis proyek, praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik,

konsep kimia hijau (*green chemistry*), pendekatan laboratorium berskala mikro, keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran keberlanjutan.

1.4.2 Manfaat Praktis

1. Bagi institusi
 - a. Program eksperimen Khimpro dapat diadaptasi oleh berbagai institusi pendidikan, baik di tingkat sekolah menengah maupun perguruan tinggi, yang ingin mengintegrasikan pendidikan berkelanjutan dalam kurikulum mereka.
 - b. Hasil penelitian ini memberikan alternatif praktikum pendidikan yang mengintegrasikan prinsip-prinsip kimia hijau, seperti penggunaan bahan kimia dalam jumlah relatif kecil dan berorientasi pada pengurangan limbah, untuk meminimalisir dampak lingkungan dari aktivitas laboratorium.
 - c. Hasil penelitian ini menawarkan cara yang lebih efisien dalam penggunaan bahan kimia, melalui pendekatan laboratorium berskala mikro, sehingga memberikan dampak pada pengurangan biaya operasional laboratorium dan meminimalkan risiko paparan bahan berbahaya bagi mahasiswa.
2. Bagi dosen
 - a. Hasil penelitian ini memberikan panduan praktis bagi dosen atau fasilitator dalam mengembangkan serta mengimplementasikan desain praktikum yang efektif untuk meningkatkan keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran keberlanjutan, khususnya pada topik pemisahan dan pemurnian senyawa organik, yang menjadi modal penting bagi mahasiswa calon guru kimia.
 - b. Hasil penelitian ini memberikan contoh konkret bagaimana

pembelajaran berbasis proyek dapat diimplementasikan dalam konteks praktikum, khususnya pada topik pemisahan dan pemurnian senyawa organik, yang dapat dijadikan acuan bagi dosen atau pengajar dalam mendesain pengalaman belajar yang berpusat pada mahasiswa dan fokus pada penyelesaian masalah.

3. Bagi mahasiswa
 - a. Desain praktikum yang dikembangkan dalam penelitian ini membantu mahasiswa untuk lebih memahami konsep-konsep dasar dalam kimia, khususnya terkait dengan teknik pemisahan dan pemurnian senyawa organik, melalui pembelajaran yang bermakna dan kontekstual.
 - b. Desain praktikum yang dikembangkan dalam penelitian ini memberikan pengalaman langsung untuk melatih keterampilan proses sains, meningkatkan penguasaan konsep, dan mengembangkan kesadaran keberlanjutan yang menjadi kompetensi penting bagi mahasiswa calon guru kimia.
4. Bagi peneliti dan praktisi pendidikan lainnya. Pola penelitian ini dapat diadopsi oleh para peneliti maupun praktisi pendidikan lainnya sebagai dasar pengembangan penelitian yang lebih luas terkait integrasi prinsip-prinsip kimia hijau dan pendekatan laboratorium berskala mikro yang dikemas dalam kegiatan praktikum berbasis proyek.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini, pengembangan program eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) tidak hanya menekankan pada keterpaduan pendekatan, yaitu prinsip kimia hijau, eksperimen skala mikro, dan pembelajaran berbasis proyek, tetapi juga diarahkan untuk mencapai transformasi perilaku mahasiswa calon guru kimia, khususnya dalam membangun kesadaran terhadap lingkungan dan keberlanjutan. Transformasi ini penting, mengingat bahwa

penguasaan konsep dan keterampilan praktis saja tidak cukup untuk menghasilkan guru sains (kimia) yang mampu menghadapi tantangan pembelajaran abad ke-21.

Oleh karena itu, diperlukan juga pengembangan kesadaran keberlanjutan yang tertanam melalui pengalaman langsung dan reflektif, seperti yang difasilitasi dalam program eksperimen Khimpro. Dengan menempatkan mahasiswa secara aktif dalam proses eksplorasi berbasis proyek yang mengadopsi prinsip keberlanjutan, program eksperimen ini secara sistematis membentuk pemahaman kritis serta tanggung jawab lingkungan yang dapat mengarah pada perubahan sikap dan perilaku (Ardoin *et al.*, 2020; Hnatyuk *et al.*, 2024)

Adapun aspek yang dinilai dalam penelitian ini mencakup tiga domain yang saling terkait, yaitu keterampilan proses sains sebagai representasi dimensi psikomotor, penguasaan konsep pada dimensi kognitif, dan kesadaran keberlanjutan yang mencakup dimensi afektif (aspek *knowingness*, *attitude*, dan *behaviour*). Dengan demikian, program eksperimen Khimpro tidak hanya dikembangkan sebagai inovasi metodologis, tetapi juga sebagai instrumen pedagogis untuk mentransformasi cara pandang dan perilaku mahasiswa terhadap praktik laboratorium yang lebih beretika dan berkelanjutan.

Dari aspek subjek penelitian, penelitian ini menargetkan tercapainya tujuan penelitian bagi mahasiswa program studi pendidikan kimia yang sedang mengikuti praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik. Mereka diharapkan memiliki kemampuan dasar laboratorium yang relevan untuk memahami dan menerapkan teknik pemisahan dan pemurnian senyawa organik yang berbeda dari teknik laboratorium pada umumnya, yaitu dengan mengintegrasikan aspek-aspek keberlanjutan sebagai inovasi baru dalam praktikum tersebut.

Pemilihan mahasiswa calon guru kimia sebagai subjek penelitian memiliki urgensi strategis dalam konteks pendidikan sains berkelanjutan. Sebagai calon pendidik, mereka berperan penting dalam mentransfer nilai-nilai ilmiah, etika lingkungan, dan praktik laboratorium yang aman kepada peserta didik di tingkat sekolah. Dengan membekali mereka sejak dini melalui program eksperimen kimia hijau skala mikro, diharapkan akan terbentuk pemahaman konseptual yang kuat

sekaligus kesadaran keberlanjutan yang dapat mereka wujudkan dalam konteks pembelajaran di sekolah (Tamir, 2020; Zeidler, 2009). Hal ini sejalan dengan peran guru sebagai agen perubahan yang tidak hanya mengajarkan pengetahuan, tetapi juga menanamkan perilaku berkelanjutan kepada generasi muda melalui pembelajaran kontekstual di kelas dan laboratorium.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengembangkan serta mengimplementasikan program Eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) pada mahasiswa calon guru kimia. Adapun lingkup penelitian dibatasi pada konteks pendidikan tinggi sehingga uji coba program tidak diperluas hingga pada tahap penerapan langsung oleh mahasiswa kepada siswa sekolah. Dengan demikian, fokus penelitian terletak pada bagaimana mahasiswa calon guru mengalami proses pembelajaran melalui eksperimen Khimpro dan bagaimana program tersebut berkontribusi terhadap pengembangan keterampilan proses sains, penguasaan konsep, serta kesadaran keberlanjutan.

Meskipun tidak sampai pada tahap implementasi kepada siswa sekolah, hasil penelitian ini memiliki implikasi penting. Melalui pengalaman yang diperoleh dalam program eksperimen Khimpro, mahasiswa calon guru dipersiapkan untuk melatih keterampilan proses sains kepada peserta didik ketika mereka menjalankan praktik mengajar atau memasuki profesi keguruan. Dengan kata lain, penelitian ini menjadi pijakan awal yang menekankan penguatan kompetensi calon guru agar mereka mampu menginternalisasikan nilai-nilai kimia hijau sekaligus mengajarkan sains secara bermakna di tingkat sekolah.

Kompetensi-kompetensi keterampilan proses sains diadopsi dan dimodifikasi sesuai kebutuhan penelitian dari Brotherton dan Preece (1996) serta Rustaman (2005) yang meliputi: (1) kemampuan mengajukan pertanyaan, (2) merumuskan hipotesis, (3) mengklasifikasi, (4) merencanakan percobaan, (5) menjalankan percobaan, (6) mengamati, (7) menginterpretasi data, (8) menyimpulkan, dan (9) mengkomunikasikan, berdasarkan prinsip keberlanjutan. Adapun penguasaan konsep yang melibatkan pemahaman teori dan konsep dalam konten materi pemisahan dan pemurnian senyawa organik, dikembangkan berdasarkan Capaian

Pembelajaran Lulusan (CPL) yang diturunkan menjadi Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK) dan Sub-CPMK (Junaidi, *et al.*, 2020), sehingga membentuk klasifikasi ranah kognitif yang dibatasi pada kemampuan menganalisis (C4), mengevaluasi (C5), dan mencipta (C6) (Anderson *et al.*, 2001). Sementara itu, kesadaran keberlanjutan mencakup komponen pemahaman atau pengetahuan, sikap, dan perilaku mahasiswa tentang pentingnya praktik laboratorium yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, berdasarkan dimensi lingkungan, sosial, dan ekonomi (Gericke *et al.*, 2019).

Ruang lingkup berikutnya berkaitan dengan lokasi penelitian, di mana proses pengembangan dan penerapan penelitian dilakukan dalam lingkungan laboratorium pendidikan kimia di perguruan tinggi, dengan materi yang mencakup teknik-teknik pemisahan dan pemurnian (sublimasi, rekristalisasi, kromatografi kertas dan lapis tipis, serta destilasi sederhana) yang disesuaikan dengan prinsip kimia hijau dan skala mikro. Data dikumpulkan melalui studi dokumentasi, observasi, tes, angket, dan wawancara. Data yang telah dikumpulkan, dianalisis secara kualitatif untuk mengeksplorasi proses pengembangan program eksperimen Khimpro, memperkuat penentuan karakteristik program, memahami pengalaman mahasiswa selama dijalankannya program tersebut, dan mengeksplorasi kekuatan maupun kelemahan dari program eksperimen tersebut, sehingga menjadi dasar dilakukannya perbaikan di masa yang akan datang. Analisis secara kuantitatif juga digunakan dalam penelitian ini dengan teknik analisis uji beda untuk mengukur dampak penerapan program eksperimen Khimpro terhadap variabel-variabel yang diukur berdasarkan perbedaan hasil pencapaian kompetensi mahasiswa pada kondisi sebelum dan sesudah penerapan. Dilanjutkan dengan teknik *stacking* untuk melihat perubahan kemampuan atau kompetensi yang dialami oleh setiap individu (person dan item) pada kondisi sebelum dan sesudah penerapan program eksperimen Khimpro.

Pada akhirnya disimpulkan bahwa ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada penerapan prinsip kimia hijau skala mikro dalam konteks laboratorium pendidikan kimia. Subjek penelitian juga dibatasi pada mahasiswa calon guru kimia yang telah dan/atau sedang mengikuti mata kuliah kimia dasar, teknik laboratorium serta kimia

organik, sebagai dasar menjalankan praktik laboratorium pemisahan dan pemurnian senyawa organik. Dengan batasan ini, penelitian berpeluang memberikan kontribusi langsung pada pengembangan kurikulum pendidikan kimia secara bertahap dan berkelanjutan, khususnya melalui penerapan praktikum yang menerapkan eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro).

1.6 Definisi Operasional

Untuk menghindari kesalahan penafsiran dan menyamakan persepsi, berikut disajikan definisi operasional dari istilah-istilah penting yang digunakan berdasarkan peran dan penerapannya dalam penelitian ini.

1. Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) merupakan istilah yang digunakan untuk desain program eksperimen pada topik pemisahan dan pemurnian senyawa organik yang mengintegrasikan prinsip-prinsip kimia hijau dan pendekatan eksperimen skala mikro yang dikemas dalam model pembelajaran berbasis proyek. Adapun tahapan-tahapan proyek yang diterapkan dalam program eksperimen tersebut terdiri atas: (a) tahap 1, perumusan pertanyaan berdasarkan tema proyek; (b) tahap 2, perancangan dan seminar rancangan proyek; (c) tahap 3, pelaksanaan dan monitoring proyek; (d) tahap 4, penyusunan laporan proyek; dan (e) tahap 5, seminar hasil dan pengiriman artikel proyek ke jurnal ilmiah.
2. Program eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) merupakan sekumpulan dokumen yang terdiri atas: (a) panduan program, berupa silabus praktikum, RPS praktikum, tahapan implementasi proyek praktikum, dan aktivitas proyek praktikum; (b) buku teks terintegrasi, dilengkapi dengan panduan praktikum berbasis proyek, video demonstrasi eksperimen skala mikro, dan perangkat kit mikro; serta (c) perangkat instrumen penilaian ketercapaian program eksperimen Khimpro untuk keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran akan keberlanjutan mahasiswa.

3. Praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik dalam penelitian ini diimplementasikan menggunakan program eksperimen Khimpro yang memuat beberapa teknik dasar pemisahan dan pemurnian senyawa organik, di antaranya yaitu teknik: (a) sublimasi; (b) rekristalisasi; (c) kromatografi kertas dan kromatografi lapis tipis; (d) serta destilasi sederhana. Praktikum atau eksperimen atau percobaan merupakan istilah yang akan sering digunakan dalam disertasi ini, disesuaikan dengan konteks yang dibahas.
4. Prinsip-prinsip kimia hijau (*green chemistry*) yang digunakan dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan karakteristik materi praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik, yang terdiri atas lima dari dua belas prinsip yang berlaku, yakni (a) prinsip ke-1, pencegahan terbentuknya limbah; (b) prinsip ke-4, perancangan proses kimia yang aman; (c) prinsip ke-5, penggunaan pelarut dan tambahan zat yang aman; (d) prinsip ke-7, penggunaan bahan terbarukan; (e) dan prinsip ke-12, pencegahan kecelakaan akibat paparan bahan kimia.
5. Eksperimen skala mikro (*microscale experiment*) dalam penelitian ini merujuk pada pendekatan praktikum laboratorium yang menggunakan jumlah zat atau bahan kimia dalam skala kecil, dengan kriteria sebagai berikut: (a) menggunakan volume dan massa bahan yang relatif sedikit, yakni antara 50 hingga 1000 miligram (0,050–1,000 g) dan volume larutan kurang dari 25 mililiter; (b) menghasilkan limbah laboratorium dalam jumlah minimal; dan (c) menekan biaya penggunaan bahan kimia serta peralatan. Meskipun terjadi pengurangan volume dan skala penggunaan bahan, eksperimen skala mikro dalam penelitian ini tetap dirancang untuk mempertahankan kualitas data hasil pengamatan. Hal ini dicapai melalui pemilihan peralatan yang sesuai, prosedur yang presisi, serta sensitivitas pengamatan yang terukur, sehingga hasil eksperimen tetap valid, andal, dan representatif terhadap konsep yang dipelajari.
6. Keterampilan proses sains, KPS, (*Science Process Skills*) yang diukur dalam penelitian ini terdiri atas dua klasifikasi, yaitu KPS dasar (mengamati,

mengklasifikasi, menyimpulkan, dan mengkomunikasikan) dan KPS terintegrasi (mengajukan pertanyaan, merumuskan hipotesis, menginterpretasi data, merencanakan percobaan, dan menjalankan percobaan). Kemampuan atau kompetensi KPS mahasiswa diukur melalui tes KPS, observasi, dan tugas proyek eksperimen (proposals dan laporan proyek eksperimen). Butir soal tes KPS dikembangkan dari indikator soal yang mewakili pengukuran di setiap kemampuan atau kompetensi KPS.

7. Penguasaan konsep (*conceptual understanding*) dalam penelitian ini didefinisikan sebagai pemahaman mendalam mahasiswa calon guru kimia terhadap konsep pemisahan dan pemurnian senyawa organik yang didapatkan melalui praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik yang diimplementasikan dengan program eksperimen Khimpro. Penguasaan konsep mahasiswa diukur menggunakan soal tes berdasarkan dimensi kognitif Taksonomi Bloom Revisi (Anderson) yang terdiri atas menganalisis (C4), mengevaluasi (C5), dan mencipta (C6).
8. Kesadaran keberlanjutan (*sustainability awareness*) dalam penelitian ini merupakan suatu bentuk kesadaran akan keberlanjutan yang perlu dimiliki setiap individu termasuk mahasiswa calon guru kimia demi mencapai tujuan pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan. Kesadaran akan keberlanjutan dalam penelitian ini mencakup aspek: (a) *sustainability knowingness* (pengetahuan keberlanjutan), mengacu pada pemahaman terhadap konsep keberlanjutan yang secara signifikan memengaruhi niat dan perilaku individu; (b) *sustainability attitudes* (sikap keberlanjutan), mencakup keyakinan dan perasaan individu terhadap keberlanjutan yang berperan penting dalam membentuk perilaku mereka; dan (c) *sustainability behaviours* (perilaku keberlanjutan), merujuk pada tindakan yang diambil oleh individu untuk mendukung keberlanjutan lingkungan. Adapun di setiap aspek kesadaran keberlanjutan terdiri atas tiga dimensi, yaitu dimensi lingkungan, sosial, dan ekonomi. Kesadaran keberlanjutan mahasiswa diukur menggunakan kuisioner persepsi yang didukung dengan wawancara semi-terstruktur dan observasi.

9. Bahan ajar Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek berfungsi sebagai referensi utama bagi mahasiswa dalam melaksanakan eksperimen pemisahan dan pemurnian senyawa organik. Dalam penelitian ini, bahan ajar tersebut berupa buku teks terintegrasi berjudul “Kimia Hijau Skala Mikro Berbasis Proyek: Aplikasi pada Eksperimen Pemisahan dan Pemurnian Senyawa Organik”. Buku ini dikembangkan secara khusus untuk mendukung pelaksanaan praktikum dan disusun secara komprehensif mengikuti tahapan-tahapan eksperimen Khimpro. Buku ini juga dilengkapi dengan panduan praktikum berbasis proyek, video demonstrasi eksperimen skala mikro, serta perangkat kit mikro yang dirancang untuk praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik.
10. Panduan praktikum yang terintegrasi dalam buku teks dirancang dengan mengimplementasikan tahapan-tahapan praktikum berbasis proyek, yang memberikan instruksi terkait penggunaan prinsip kimia hijau dan skala mikro. Panduan praktikum disediakan dalam bentuk file digital yang dapat diakses melalui tautan digital yang disisipkan dalam buku teks.
11. Video demonstrasi eksperimen skala mikro disediakan sebagai media pembelajaran tambahan yang diakses melalui *barcode* (QR code) dalam buku teks. Kontennya memuat penerapan teknik-teknik pemisahan dan pemurnian senyawa organik skala mikro, seperti sublimasi dan rekristalisasi. Video ini dimaksudkan untuk memperluas pemahaman mahasiswa sebelum mengikuti program eksperimen Khimpro pada praktikum terkait.
12. “Section-MicroKit” merupakan akronim dari *Separation and Purification-Micro Kit*, yaitu media eksperimen laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini. Kit ini berisi kumpulan alat kimia berukuran kecil (10 mL) yang dirancang khusus untuk mendukung eksperimen pemisahan dan pemurnian senyawa. Penggunaannya disertai dengan buku manual yang memuat informasi mengenai komponen kit serta prosedur praktis. “Section-MicroKit” disusun satu paket bersama buku teks terintegrasi.
13. Karakteristik program eksperimen Khimpro digambarkan dari hasil studi

dokumen yang diperkuat dengan hasil observasi dan wawancara, selanjutnya dianalisis secara tematik dan dikaitkan dengan kerangka teori prinsip kimia hijau, pendekatan eksperimen skala mikro, pembelajaran berbasis proyek, serta integrasinya terhadap keterampilan proses sains, penguasaan konsep, dan kesadaran keberlanjutan mahasiswa.

14. Efektivitas program eksperimen Khimpro dioperasionalkan sebagai perubahan keterampilan proses sains mahasiswa sebelum dan sesudah mengikuti praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik. Perubahan tersebut diukur menggunakan pemodelan Rasch melalui nilai logit change individual, yaitu selisih antara logit hasil pretes dan postes, serta kinerja mahasiswa dalam tugas proyek eksperimen. Analisis uji beda, perhitungan efek intervensi, dan visualisasi dalam bentuk Wright Map serta scatter plot digunakan untuk memperkuat interpretasi hasil. Selain itu, data pendukung berupa hasil observasi, wawancara, dan angket turut melengkapi temuan kuantitatif.
15. Efektivitas program eksperimen Khimpro dalam penelitian ini dioperasionalkan sebagai perubahan penguasaan konsep mahasiswa pada tiga dimensi kognitif (memahami, mengevaluasi, dan mencipta). Penguasaan konsep diukur melalui pemodelan Rasch berdasarkan nilai logit change individual, yaitu selisih antara logit hasil pretes dan postes. Selain itu, analisis uji beda, perhitungan efek intervensi, serta visualisasi dalam bentuk Wright Map dan scatter plot digunakan untuk memperkuat interpretasi hasil.
16. Profil kesadaran keberlanjutan mahasiswa dalam penelitian ini dioperasionalkan sebagai gambaran tingkat *knowingness*, *attitudes*, *behaviours* mahasiswa terhadap aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi dalam konteks pelaksanaan program eksperimen Khimpro. Data diperoleh melalui angket respon sikap yang mengukur persepsi, motivasi, dan komitmen mahasiswa, yang kemudian dianalisis dalam bentuk nilai rata-rata, distribusi persentase, serta divisualisasikan dengan Wright Map. Selain itu, data hasil observasi dan wawancara digunakan untuk memperkuat dan melengkapi temuan dari angket, sehingga diperoleh deskripsi yang lebih komprehensif mengenai kesadaran

keberlanjutan mahasiswa calon guru kimia.

1.7 Signifikansi Penelitian dan Kontribusinya terhadap Bidang Ilmu

Signifikansi penelitian kali ini dan kontribusinya terhadap bidang ilmu terletak pada dampaknya terhadap tujuan penelitian yang dicapai, baik dalam ranah teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini mengarah pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang kimia organik, khususnya pada aktivitas laboratorium dengan mengimplementasikan teknik pemisahan dan pemurnian senyawa organik yang difokuskan pada penerapan prinsip-prinsip kimia hijau (Anastas & Warner, 2000; Anastas & Warner, 1998; Lancaster, 2016). Dengan mengembangkan program eksperimen kimia hijau skala mikro (Khimpro) sebagai suatu konsep dan pendekatan inovatif dalam menjalankan eksperimen kimia, tidak hanya memprioritaskan efisiensi dan keberlanjutan, melainkan sekaligus memperkaya teori-teori yang berkaitan dengan keterampilan proses sains, kesadaran keberlanjutan, dan penguasaan konseptual mahasiswa, terutama mahasiswa calon guru kimia.

Secara praktis, penelitian ini membantu menjawab tantangan implementasi kimia hijau dan skala mikro yang dikemas dalam pembelajaran berbasis proyek pada aktivitas laboratorium di pendidikan tinggi yang berfokus pada penghematan bahan, kondisi ramah lingkungan, dan kontekstual (Anastas & Warner, 2000; Burmeister *et al.*, 2012; Pavia *et al.*, 2018). Sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi bahan evaluasi dalam pengembangan kurikulum pendidikan kimia, khususnya dalam pengajaran teknik laboratorium kimia yang lebih aman dan berkelanjutan. Selain itu, hasil dari penelitian ini dapat menjadi dasar kebijakan di institusi pendidikan dalam mendorong aktivitas laboratorium yang lebih efektif dan efisien, sekaligus mempersiapkan mahasiswa calon guru kimia untuk menghadapi tantangan global terkait keberlanjutan.

Kontribusi yang signifikan dari penelitian ini meliputi dua bidang utama, yaitu pemisahan dan pemurnian senyawa organik, serta pendidikan kimia

keberlanjutan melalui konsep kimia hijau. Dalam bidang pemisahan dan pemurnian senyawa organik, penelitian ini menghadirkan modifikasi pendekatan praktikum yang berfokus pada proses pengurangan limbah pasca praktikum, yaitu dengan memanfaatkan pendekatan eksperimen skala mikro (Gilbert & Martin, 2016). Hal tersebut memperkaya wawasan tentang pendekatan laboratorium untuk senyawa organik yang sesuai dengan prinsip keberlanjutan. Selanjutnya, dalam bidang pendidikan kimia, penelitian ini berkontribusi pada inovasi pedagogis melalui penggabungan prinsip-prinsip kimia hijau dan pendekatan eksperimen skala mikro (Gross, 2013; Singh *et al.*, 1999) ke dalam pembelajaran berbasis proyek (Jalinus *et al.*, 2017; Kokotsaki *et al.*, 2016), khususnya pada eksperimen pemisahan dan pemurnian senyawa organik. Suatu integrasi yang belum banyak diterapkan secara komprehensif, khususnya di bidang pendidikan kimia, dengan menggabungkan antara prinsip-prinsip kimia hijau dan pendekatan eksperimen skala mikro dalam pembelajaran berbasis proyek menjadikannya sebagai signifikansi utama sekaligus kebaruan dalam penelitian ini.

Kontribusi langsung terhadap pendidikan calon guru kimia juga turut dirasakan dari hasil penelitian ini, dimana salah satu peran penting yang melekat pada profesi guru kimia di sekolah adalah kemampuan untuk merancang dan melaksanakan kegiatan praktikum yang bermakna, aman, dan relevan dengan tujuan pembelajaran. Praktikum bukan hanya sarana untuk memperkuat pemahaman konsep, tetapi juga sebagai wahana pembentukan keterampilan ilmiah dan sikap ilmiah peserta didik (Hofstein & Kind, 2012). Oleh karena itu, calon guru kimia perlu dibekali dengan kemampuan pedagogis dan praktikal yang memungkinkan mereka tidak hanya mereplikasi praktikum yang sudah ada, tetapi juga mampu merancang eksperimen alternatif yang kontekstual, hemat sumber daya, dan sesuai dengan keterbatasan fasilitas di sekolah.

Kemampuan calon guru kimia dalam merancang praktikum sangat penting mengingat tantangan yang sering dihadapi sekolah, seperti keterbatasan alat dan bahan, keterbatasan waktu, serta kebutuhan akan pendekatan pembelajaran yang lebih kontekstual dan berkelanjutan (Leung *et al.*, 2020). Penelitian oleh Rahayu

dan Sari (2023) menunjukkan bahwa selama ini penuntun praktikum yang digunakan bersifat verifikatif dan jarang melakukan modifikasi berdasarkan prosedur yang telah disediakan, sehingga pembelajaran praktikum cenderung kurang kontekstual dan tidak optimal dalam membangun keterampilan berpikir ilmiah mahasiswa calon guru kimia. Dalam konteks ini, mahasiswa calon guru kimia perlu mendapatkan pengalaman langsung untuk mengembangkan dan mengadaptasi kegiatan laboratorium yang sesuai dengan kebutuhan pembelajaran abad ke-21 dan mendukung keberlanjutan.

Lebih lanjut, keterampilan merancang praktikum juga berkaitan erat dengan kesiapan calon guru untuk menghadirkan pembelajaran sains, termasuk kimia, yang autentik dan bermakna di kelas. Seseorang yang memiliki kompetensi dalam pengembangan praktikum akan lebih mampu menghadirkan pembelajaran berbasis inkuiri, eksplorasi, dan pemecahan masalah, yang menjadi ciri penting dalam pendidikan sains maupun kimia modern (Abraham & Millar, 2008; Aubrecht *et al.*, 2019; Karpudewan *et al.*, 2009). Oleh karena itu, penelitian ini menekankan pentingnya pengembangan program eksperimen yang tidak hanya memperkuat pemahaman konseptual mahasiswa calon guru, tetapi juga membekali mereka dengan kemampuan untuk merancang dan menerapkan eksperimen yang berkelanjutan dan kontekstual, yang pada akhirnya dapat diadaptasi dalam pembelajaran di tingkat sekolah. Dengan bekal ini, mahasiswa calon guru kimia dipersiapkan untuk menjadi agen perubahan yang mampu mengajarkan prinsip kimia hijau dan praktik laboratorium yang bertanggung jawab kepada generasi berikutnya (Vosburg, 2020).

Adapun dalam konteks keberlanjutan, penelitian ini memperkuat penerapan prinsip-prinsip kimia hijau di lingkungan pendidikan tinggi (Li & Eilks, 2021), sehingga dapat menjadi suatu model atau pedoman khusus untuk implementasi praktik laboratorium yang efisien dan berkelanjutan di berbagai institusi pendidikan tinggi. Penelitian ini juga memberikan dasar ilmiah yang dapat mendorong reformasi kurikulum pendidikan kimia untuk mengintegrasikan keberlanjutan sebagai elemen penting dalam pembelajaran (Timmer *et al.*, 2018). Dengan

demikian, penelitian ini tidak hanya menambah khazanah keilmuan dalam ranah teoretis, tetapi juga menciptakan dampak praktis yang mendukung pengembangan ilmu kimia secara lebih luas dan relevan dengan kebutuhan zaman.

Secara garis besar, jika dihubungkan dengan aspek pedagogis dari penelitian ini, yang menghasilkan suatu program eksperimen Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek (Khimpro) untuk pembelajaran di laboratorium, memberikan dampak signifikan pada peningkatan keterampilan proses sains mahasiswa, yang mencakup kemampuan mengajukan pertanyaan, merumuskan hipotesis, mengklasifikasi, merencanakan percobaan, menjalankan percobaan, mengamati, menginterpretasi data, menyimpulkan, dan mengkomunikasikan (Brotherton & Preece, 1996; Rustaman, 2005) berdasarkan prinsip keberlanjutan. Dengan keterlibatan mahasiswa secara langsung karena diterapkannya proyek (Dilekli, 2020), mahasiswa tidak hanya memahami teknik laboratorium secara pasif, tetapi juga menjadi kreator terhadap solusi berkelanjutan yang relevan. Lebih jauh lagi, penelitian ini secara eksplisit menanamkan kesadaran keberlanjutan, di mana mahasiswa dilatih untuk mempertimbangkan dampak jangka panjang penggunaan bahan kimia dan limbah yang dihasilkan, serta bagaimana mendesain eksperimen yang berfokus pada meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan (Herremans & Reid, 2002; Khoirunnisa *et al.*, 2022; Lopes *et al.*, 2018).

Penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui pengembangan program eksperimen Khimpro (Kimia Hijau Skala Mikro berbasis Proyek) yang secara terpadu mengintegrasikan prinsip kimia hijau, eksperimen skala mikro, dan pembelajaran berbasis proyek. Program eksperimen ini dirancang tidak hanya untuk meningkatkan capaian akademik, tetapi juga secara eksplisit membekali mahasiswa calon guru kimia dengan kemampuan pedagogis dan ekologis dalam merancang serta melaksanakan praktikum yang berkelanjutan. Temuan penelitian membuka peluang untuk studi lanjutan, seperti adaptasi program eksperimen Khimpro di jenjang sekolah menengah untuk mengkaji keterpakaian pendekatan ini di kelas secara nyata. Penelitian longitudinal juga dapat dilakukan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang terhadap kompetensi profesional lulusan

sebagai guru kimia. Selain itu, pengembangan versi digital atau hybrid dari program eksperimen Khimpro menjadi arah potensial untuk menjawab tantangan keterbatasan sarana laboratorium. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan produk inovatif, tetapi juga memberikan landasan awal bagi pengembangan berkelanjutan dalam pendidikan kimia yang kontekstual dan relevan dengan tuntutan masa depan.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi yang signifikan dalam pendidikan kimia, terutama sebagai pedoman praktik baik dalam mengajarkan dan menerapkan prinsip keberlanjutan di laboratorium pendidikan kimia, serta membuka wawasan bagaimana mempersiapkan calon guru kimia untuk menjadi agen perubahan dalam praktik pendidikan dan laboratorium yang lebih hijau dan bertanggung jawab.

1.8 Struktur Organisasi Disertasi

Struktur organisasi disertasi terdiri atas enam bab yang dirangkum dalam tiga bagian utama, yaitu bagian awal, isi, dan akhir. Struktur tersebut disajikan secara sistematis pada Tabel 1.1 sebagai berikut.

Tabel 1.1 Struktur Organisasi Disertasi

Bagian Awal	Berisi halaman judul, halaman pengesahan, pernyataan bebas plagiarisme, kata pengantar, abstrak, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, dan daftar lampiran.
Bagian Isi	BAB I, berisi Pendahuluan yang menguraikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, definisi operasional, signifikansi penelitian dan kontribusinya terhadap bidang ilmu, serta struktur organisasi disertasi.
	BAB II, berisi Tinjauan Pustaka yang menguraikan tentang keberlanjutan (<i>sustainability</i>), kimia hijau (<i>green chemistry</i>), eksperimen skala mikro (<i>microscale experiment</i>), pembelajaran berbasis proyek (<i>project-based learning</i>), keterampilan proses sains (<i>science process skills</i>), penguasaan konsep (<i>conceptual understanding</i>), kajian konten kimia pemisahan dan pemurnian

	senyawa organik, pengembangan program eksperimen kimia hijau skala mikro berbasis proyek (Khimpro), karakteristik program eksperimen Khimpro untuk praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik, efektivitas program eksperimen Khimpro terhadap keterampilan proses sains ditinjau dari kajian teoritis, efektivitas program eksperimen Khimpro terhadap penguasaan konsep ditinjau dari kajian teoritis, efektivitas program eksperimen Khimpro terhadap kesadaran keberlanjutan ditinjau dari kajian teoritis, keterkaitan teori pembelajaran dalam program eksperimen Khimpro pada praktikum pemisahan dan pemurnian senyawa organik, dan kerangka berpikir penelitian.
	BAB III, berisi metode penelitian yang menguraikan tentang metode penelitian, jenis penelitian, variabel penelitian, teknik sampling, teknik pengumpulan data dan instrumen penelitian, teknik pengolahan data penelitian, dan teknik analisis data penelitian.
	BAB IV, berisi hasil penelitian yang menyajikan hasil penelitian berupa data yang ditabulasikan ke dalam tabel, diagram, grafik, maupun deskripsi. Hasil penelitian disajikan secara sistematis berdasarkan urutan pertanyaan penelitian.
	BAB V, berisi pembahasan yang menginterpretasi, menjelaskan, serta membandingkan temuan di hasil penelitian dengan teori atau penelitian terdahulu. Pembahasan disajikan secara sistematis sesuai urutan dalam penyajian hasil penelitian.
	BAB VI, berisi simpulan dan implikasi yang menyajikan ringkasan temuan-temuan utama penelitian dan jawaban atas pertanyaan penelitian. bagian ini juga membahas implikasi hasil penelitian, serta memberikan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.
Bagian Akhir	Berisi daftar pustaka dan lampiran-lampiran yang relevan.