

BAB I

PENDAHULUAN

Bab I berisi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah penelitian, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, definisi operasional, dan struktur organisasi dari disertasi ini. Deskripsi dari semua isi bab ini menjelaskan mengenai arah dari penelitian yang dilakukan.

1.1 Latar Belakang Penelitian

Perubahan global seperti krisis lingkungan, perubahan iklim, dan ketidaksetaraan sosial ekonomi memiliki dampak signifikan pada pembangunan berkelanjutan. Dampak dari perubahan-perubahan ini tidak hanya lokal, tetapi juga memiliki implikasi yang signifikan pada tingkat global. Perubahan global menciptakan tantangan baru dalam mencapai pembangunan berkelanjutan. Pembangunan berkelanjutan diartikan sebagai upaya untuk memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka. Oleh karena itu, masyarakat di seluruh dunia harus mendukung pencapaian arah pembangunan berkelanjutan (Wilmes *et al.*, 2009; Burmeister *et al.*, 2012; Serhan *et al.*, 2019).

Panduan utama untuk mencapai pembangunan berkelanjutan adalah *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-bangsa (PBB). SDGs memberikan kerangka kerja universal yang mencakup berbagai aspek keberlanjutan. Salah satu unsur penting dari SDGs adalah Pendidikan untuk Pembangunan Berkelanjutan (ESD). ESD berfungsi sebagai instrumen penting untuk mencapai tujuan-tujuan tersebut dengan membentuk pola pikir dan perilaku masyarakat agar lebih peduli terhadap isu-isu lingkungan, ekonomi dan sosial. ESD bukan hanya pendidikan formalitas saja, namun dapat menjadi kerangka kerja yang mengutamakan tiga dimensi penting yakni lingkungan, ekonomi, dan sosial. Pendidikan ini tidak hanya memberikan pengetahuan, tetapi juga harus berfokus pada pengembangan keterampilan berpikir kritis dan analitis.

ESD menekankan pendekatan pembelajaran yang berpusat pada pemecahan masalah. Melalui latihan berpikir untuk pemecahan masalah, peserta didik diajak untuk mengembangkan keterampilan kritis yang diperlukan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan merumuskan solusi terhadap masalah-masalah kompleks yang dihadapi oleh masyarakat. Salah satu tujuan utama dari ESD adalah mengarahkan pembelajar untuk memahami dan mengadopsi pola berpikir sistem. Hal ini melibatkan pemahaman keterkaitan antara aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial, serta kemampuan untuk melihat masalah secara komprehensif.

Pembelajaran dengan basis pembangunan berkelanjutan untuk meningkatkan kemampuan berpikir sistem harus dilatihkan dalam proses pendidikan, termasuk pendidikan kimia di Perguruan Tinggi. Perkuliahan kimia yang syarat dengan konsep abstrak dan berlevel molekuler harus mampu menjembatani gap antara penguasaan konsep dan kebutuhan untuk menyelesaikan permasalahan dalam kehidupan. Dengan demikian maka perkuliahan kimia dapat juga memberikan kontribusi positif terhadap upaya membangun berpikir sistem mahasiswa. Kontekstualisasi dalam pembelajaran kimia merupakan salah satu cara untuk mempersempit gap tersebut.

Praktik perkuliahan kimia selama ini belum memenuhi kondisi ideal seperti yang diharapkan. Pembelajaran di kelas masih menggunakan model pembelajaran lama yang belum mengintegrasikan prinsip pembangunan berkelanjutan. Hasil observasi, praktik Perkuliahan Kimia koordinasi yang dilakukan pada salah satu LPTK Program Studi Pendidikan Kimia di Kabupaten Cirebon masih menggunakan metode pembelajaran yang belum bervariasi dan belum mengintegrasikan aspek keberlanjutan. Proses perkuliahan hanya menggunakan metode pembelajaran kooperatif, diskusi dan pemberian tugas. Karakteristik materi juga belum menghubungkan konteks di lingkungan sekitar dengan aspek keberlanjutan. Disamping itu, Praktikum Kimia koordinasi yang sering dilakukan masih didominasi oleh metode eksperimen verifikasi. Metode eksperimen verifikasi memberikan petunjuk kerja eksperimen di laboratorium yang bertujuan membuktikan kebenaran suatu konsep atau teori sains yang dipelajarinya (Muna, 2018). Sebelum melakukan kegiatan eksperimen verifikasi, dosen terlebih dahulu

mengajarkan teori kepada mahasiswa. Selanjutnya dosen mengajak mahasiswa untuk membuktikan kebenaran teori yang telah dipelajarinya melalui kegiatan eksperimen.

Sumber belajar yang digunakan oleh dosen dalam Perkuliahan Kimia koordinasi menggunakan buku-buku teks kimia koordinasi. Beragam buku teks kimia koordinasi yang menjadi pegangan baik dosen maupun mahasiswa dalam memahami konten. Setiap buku memiliki pendekatan yang berbeda dalam menguraikan materi. Sebagian besar dosen maupun mahasiswa menggunakan buku teks kimia koordinasi (Marusak *et al.*, 2007; Lawrance, 2009; Rodgers, 2012; Bhatt, 2015; Rohonczy, 2017). Buku teks tersebut belum menghubungkan konsep kimia koordinasi dengan konteks maupun aplikasi dan kontribusi pada aspek keberlanjutan.

Meskipun buku teks kimia koordinasi yang umumnya digunakan oleh dosen dan mahasiswa memberikan pemahaman yang baik terkait konsep kimia koordinasi, namun belum secara tegas mengaitkan konteks dan aplikasi serta kontribusi pada aspek keberlanjutan. Sebaliknya, monograf tentang kimia koordinasi telah mengarah pada pembahasan yang mendalam mengenai aplikasi dan aspek keberlanjutan, sejalan dengan perkembangan kimia modern. Meskipun demikian, belum banyak dosen maupun mahasiswa yang memanfaatkan monograf sebagai sumber belajar dalam perkuliahan kimia koordinasi.

Beberapa penelitian berbasis kimia modern terus mengalami perkembangan, diantaranya berbagai sintesis senyawa koordinasi dari bermacam logam transisi maupun logam non transisi, sifat fisikokimia, aplikasi dalam industri dan aspek keberlanjutan (Wilson *et al.*, 2014). Hasil-hasil penelitian menunjukkan perkembangan senyawa kompleks koordinasi yang membahas mengenai struktur kimia, sifat fisikokimia, aplikasi dan aspek keberlanjutan ditulis menjadi sebuah buku monograf. Buku monograf atau biasa disebut ‘Monograf’ memiliki kebaruan dan pembahasan topik yang mendalam, sebab sumber isi merupakan hasil dari penelitian. Monograf tentang kimia koordinasi biasanya membahas mengenai pembentukan senyawa kompleks koordinasi yang diperoleh dari hasil ekstraksi logam, ekstraksi metalurgi, maupun ekstraksi hidrometalurgi (Huang, 2010;

Harrowfield, 2012; Atwood, 2013). Semua proses pembentukan senyawa kompleks tersebut tergolong dalam kimia modern yang menggunakan teknologi dalam proses kimiawinya. Proses ekstraksi yang dituliskan dalam monograf sebenarnya masih dianggap memiliki dampak kecil terhadap cemaran lingkungan sebagai akibat penggunaan pelarut umum (asam kuat maupun pelarut organik), namun konsep kimia koordinasi dalam monograf telah mengarah pada aplikasi dan aspek keberlanjutan. Meskipun monograf mulai bertambah keberadaannya, namun sebagian besar dosen maupun mahasiswa belum memanfaatkan monograf sebagai sumber belajar dalam perkuliahan kimia koordinasi. Hal ini berimbas pada kemampuan berpikir sistem sebagai tujuan akhir pendidikan dengan kerangka kerja ESD. Tentunya hal ini juga menyebabkan hasil perkuliahan belum menunjukkan kompetensi pemecahan masalah dan aspek pembangunan berkelanjutan yang dimiliki oleh mahasiswa.

Berpikir sistem merupakan kemampuan untuk memahami dan menafsirkan sistem yang kompleks. Berpikir sistem telah menjadi perhatian pendidik kimia dalam beberapa tahun terakhir (Hrin *et al.*, 2017; Orgill *et al.*, 2019; Kisworo *et al.*, 2023). Hal ini dipandang sebagai pendekatan yang layak untuk menyampaikan konsep. Tidak hanya dalam pemahaman komponen yang berbeda namun proses sistem yang membentuk suatu konsep yang dipelajari oleh mahasiswa. Disamping itu, berpikir sistem juga menghubungkan setiap komponen dan proses pembentukannya yang akan saling mempengaruhi, sehingga terbentuk suatu proses yang berkelanjutan (Assaraf & Orion, 2010). Batzri *et al.* (2015) telah mendefinisikan berpikir sistem sebagai kemampuan untuk memahami dan menafsirkan karakteristik dan perilaku sistem. Seorang berpikir sistem mampu mengidentifikasi komponen sistem, memahami hubungan antar komponen, mengeksplorasi dan memahami sifat yang muncul dari komponen tersebut, serta menganalisis dan mensintesis komponen fenomena dalam konteks yang lebih luas (Assaraf & Orion, 2005). Meskipun penelitian berpikir sistem telah banyak dilakukan dalam sistem biologi (Verhoeff *et al.*, 2008; Wilensky *et al.*, 2018); sistem teknologi (Hong *et al.*, 2013); dan sistem ilmu kebumihan (Assaraf & Orion, 2010).

Kemampuan berpikir sistem yang secara intensif dibahas oleh penelitian-penelitian terbaru dalam pendidikan kimia (Hrin *et al.*, 2017, Orgill *et al.*, 2019; Kisworo *et al.*, 2023), menjadi fokus utama untuk mengembangkan pendekatan pembelajaran yang dapat mengatasi kompleksitas isu-isu keberlanjutan. Berpikir sistem, seperti yang telah diuraikan sebelumnya, tidak hanya mencakup pemahaman terhadap berbagai komponen dan proses sistem, tetapi juga melibatkan kemampuan mengidentifikasi, memahami, dan menganalisis hubungan antar komponen. Terkait dengan hal ini, pemahaman keberlanjutan pada tingkat molekuler, seperti yang diakui dalam pendidikan Program Pendidikan Kimia, menjadi dasar pemikiran yang esensial dalam merancang pembelajaran kimia yang responsif terhadap isu-isu keberlanjutan. Dengan menerapkan kerangka berpikir sistem, pendidikan kimia dapat menjadi lebih relevan dan dapat memberikan kontribusi nyata dalam menjembatani permasalahan saat ini dan mengantisipasi tantangan di masa yang akan datang.

Mengaitkan konsep kemampuan berpikir sistem dalam konteks pembelajaran kimia dengan permasalahan aktual seperti sampah elektronik, menjadi landasan utama untuk merancang solusi yang komprehensif. Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, berpikir sistem tidak hanya membantu memahami komponen dan proses sistem, tetapi juga melibatkan kemampuan mengidentifikasi, memahami, dan menganalisis hubungan antar komponen. Terkait dengan pemahaman keberlanjutan pada tingkat molekuler, yang menjadi dasar pemikiran dalam merancang pembelajaran kimia responsif terhadap isu-isu keberlanjutan, konsep ini dapat diterapkan secara konkret dalam menanggapi persoalan serius sampah elektronik.

Masalah tumpukan sampah elektronik yang dipicu oleh pesatnya perkembangan teknologi memerlukan kompetensi berpikir sistem dalam perencanaan tindakan praktik kimia. Dengan fokus pada karakteristik molekuler sebagai akar masalah sampah elektronik, pendekatan pemecahan masalah yang bersumber dari dimensi molekuler dapat diujicobakan dalam laboratorium. Dengan demikian, melalui kegiatan eksperimen mahasiswa tidak hanya dapat mengoptimalkan kemampuan mereka dalam mengidentifikasi, menganalisis, dan

memprediksi senyawa baru, tetapi juga membawa konsep ini ke dalam aplikasi praktis untuk membentuk solusi, salah satunya adalah pembentukan senyawa kompleks koordinasi. Dengan cara ini, integrasi konsep berpikir sistem dalam pendidikan kimia dapat memberikan kontribusi konkret dalam mengatasi tantangan nyata yang dihadapi oleh dunia terkait isu-isu keberlanjutan.

Salah satu sifat terpenting senyawa kompleks koordinasi adalah adanya unsur logam yang bertindak sebagai asam Lewis dengan berbagai basa Lewis. Kompleks logam terdiri dari atom atau ion logam pusat yang terikat pada satu atau lebih ligan. Kompleks logam yang selama ini dipelajari oleh mahasiswa berasal dari logam transisi. Pada saat praktikum mahasiswa juga sering mensintesis senyawa kompleks koordinasi dari logam transisi dan basa Lewis. Hal ini yang menyebabkan pengetahuan mahasiswa terbatas pada konsep kompleks logam transisi. Mahasiswa selama ini belum dikenalkan senyawa kompleks logam diluar golongan transisi. Bahkan sebagian mahasiswa dapat mengalami miskonsepsi dengan menyatakan bahwa senyawa kompleks koordinasi merupakan interaksi antara ion logam pusat berupa logam transisi dengan ligan berupa basa Lewis. Hal ini perlu diantisipasi agar tidak terjadi kesalahan konsep pada pembelajaran selanjutnya. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan mengenalkan logam-logam berat dari golongan lantanida serta logam Skandium dan Itrium. Logam-logam tersebut biasa disebut sebagai logam tanah jarang.

Alfred Werner telah memberikan contoh dalam berpikir berlandaskan prinsip molekuler (*molecular based thinking*). Hadiah Nobel Kimia Tahun 1913 dianugerahkan kepada Alfred Werner sebagai pengakuan atas karyanya mengenai hubungan atom dalam molekul yang dengannya ia memberikan pencerahan baru pada penyelidikan sebelumnya dan membuka bidang penelitian baru khususnya dalam kimia anorganik (<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1913/summary/>). Keberhasilan Werner menjelaskan hubungan atom dalam molekul melalui prinsip valensi primer dan sekunder, mengarahkan pada cara berpikir molekuler dalam kimia koordinasi (Werner, 1913). Jika sekarang Kimia koordinasi akan diarahkan pada aspek keberlanjutan, maka prinsip *sustainability of the molecular level in complex coordination chemistry* akan sejalan dengan sejarah

berkembangnya bidang ini. Hal ini karena kegiatan utama kimia melibatkan analisis, sintesis dan transformasi materi, namun tetap memperhatikan kesejahteraan manusia dan lingkungannya (Mahaffy *et al.*, 2019).

Dasar molekuler keberlanjutan dapat diterapkan pada persoalan yang menjadi isu global saat ini. Saat ini lembaga internasional yang mengawasi lingkungan (UNEP, 2018) memaparkan beberapa isu-isu lingkungan yang perlu diperhatikan oleh masyarakat dunia. Di samping isu terkait pencemaran limbah elektronik, isu lingkungan lainnya berkaitan dengan kerusakan alam sebagai akibat penambangan alam secara besar-besaran. Penambangan dilakukan untuk memperoleh unsur logam yang berharga. Hal ini jelas memberikan dampak berbahaya bagi lingkungan serta mengancam keberlanjutan sistem di bumi. Oleh karena itu, penting untuk menerapkan *sustainability of the molecular level in coordination chemistry* sebagai upaya dalam mengatasi persoalan keberlanjutan lingkungan. Salah satu alternatif untuk mengurangi resiko penambangan alam adalah dengan penambangan berkelanjutan menggunakan sumber daya sekunder (*sustainable mining using secondary resource*). Sumber daya sekunder dalam konteks ini adalah sumber mineral atau logam yang diperoleh dari bahan-bahan yang telah diolah (produk jadi). Aktivitas ini merubah paradigma bahwa penambangan alam dapat digantikan dengan pungut ulang logam berharga yang terdapat pada peralatan yang habis masa pakainya. Salah satu contoh peralatan yang cukup banyak kandungan logam adalah produk elektronik. Komponen yang terdapat pada peralatan elektronik tersusun dari campuran berbagai logam potensial. Kandungan logam berharga biasanya terdapat banyak pada komponen *cathode ray tube* (CRT) yang malapisi pada layar elektronik (Ilankoon *et al.*, 2018; Ramanayaka *et al.*, 2019). Adanya logam yang memiliki sifat luminesens atau zat pemendar cahaya sehingga sering digunakan untuk pelapis layar elektronik. Produk-produk elektronik yang telah habis masa pakainya dapat didaur ulang ramah lingkungan melalui pungut ulang logam berharga. Proses pungut ulang logam berharga dari CRT dapat dilakukan dengan ekstraksi menggunakan pelarut yang sesuai. Selama ini pelarut yang biasa digunakan bersifat asam atau pelarut organik. Sifat fisika dari pelarut tersebut mudah menguap, titik leleh tinggi dan mudah terbakar. Walaupun tetap mampu

mengekstrak logam dalam campurannya namun jenis pelarut ini tidak bersifat *green chemistry*. Beberapa penelitian menunjukkan hasil dari ekstraksi logam menggunakan pelarut dapat menghasilkan senyawa kompleks koordinasi dengan logam terkestrak (Wilson *et al.*, 2014).

Selama ini metode ekstraksi logam dilakukan secara metalurgi seperti hidrometalurgi, pirometalurgi, dan elektrometalurgi. Biasanya metode ekstraksi ini menggunakan pelarut konvensional, yang terdiri dari fase organik dan fase air. Pelarut tersebut memiliki keterbatasan diantaranya titik didih yang tinggi, korosif, mudah menguap dan mudah terbakar (Li *et al.*, 2013; Hsu *et al.*, 2019). Limbah pelarut konvensional ini kurang bersifat *green chemistry*, sehingga kurang ramah terhadap lingkungan. Oleh karena itu, *sustainability of the molecular level in coordination chemistry* menjadi solusi dalam mengatasi limbah CRT dengan menggunakan metode ionometalurgi. Metode ionometalurgi merupakan ekstraksi logam dengan cairan ionik. Ionometalurgi memanfaatkan pelarut seperti cairan ionik eutektik. Cairan ionik eutektik merupakan pelarut yang bersifat ramah lingkungan dan murah. Cairan ionik eutektik dapat disintesis dengan mencampurkan garam amonium kuarterner dengan senyawa donor ikatan hidrogen, di Indonesia pelarut ini jarang digunakan. Sehingga penggunaan cairan ionik eutektik dalam ekstraksi logam menjadi kebaruan dalam penelitian ini. Oleh sebab itu, proses ekstraksi ionometalurgi menjadi solusi tepat dalam pungut ulang logam tanah jarang sekaligus pembentukan senyawa kompleks koordinasi logam tanah jarang dari limbah CRT.

Kegiatan penambangan berkelanjutan dari limbah CRT dengan metode ionometalurgi dapat dilakukan oleh mahasiswa Program Pendidikan Kimia. Untuk menyelesaikan permasalahan konteks tersebut, mahasiswa Program Pendidikan Kimia harus mampu menghubungkan konten kimia terkait. Oleh karena itu, mahasiswa membutuhkan pemahaman tentang *sustainability of the molecular level* (dasar pemikiran dari konsep molekuler berkelanjutan). Prinsip kimia berkelanjutan pada tingkat molekuler dalam konteks ini melibatkan pengembangan proses kimia berkelanjutan dengan merancang molekuler dan reaksi yang meminimalkan penggunaan zat berbahaya. Mahasiswa dapat menggunakan kemampuan berpikir

sistem dalam menganalisis bahwa pelarut kimia yang selama ini digunakan memiliki titik didih yang tinggi, misalnya dengan memahami bahwa ikatan kimia yang kuat cenderung memiliki titik leleh yang tinggi, sehingga mahasiswa dapat mencari cara untuk melemahkan ikatan tersebut yang berdampak pada sifat ramah lingkungan. Pengembangan proses kimia ini melalui sintesis cairan ionik eutektik. Dalam mensintesis cairan ionik eutektik, mahasiswa dapat terlibat aktif dalam memasang garam amonium kuartener dan donor ikatan hidrogen (*hydrogen bond donor*) sebagai pelarut berkelanjutan. Mahasiswa dapat memahami struktur molekuler bahan dan mengembangkan alternatif yang dapat terurai secara alami yang mengurangi dampak lingkungan limbah. Melalui aktivitas tersebut diharapkan mahasiswa mampu menjadi pemecah masalah ditengah permasalahan lokal maupun global yang berimplikasi pada kesejahteraan manusia dan lingkungan. Hal inilah yang berpengaruh besar terhadap keberlanjutan bumi dan kehidupannya (Mahaffy *et al.*, 2019). Unsur utama keberlanjutan memiliki tantangannya sendiri serta membutuhkan perhatian terutama pada aspek masyarakat dan lingkungan. Penelitian sebelumnya menunjukkan pemahaman *sustainability of the molecular level* bagi mahasiswa Program Pendidikan Kimia dapat memberikan kontribusi terhadap keberlanjutan bumi dan sistem sosialnya. Kerangka berpikir sistem menjadi jembatan dalam menghubungkan konten reaktivitas nitrogen dengan aspek keberlanjutannya (Mahaffy *et al.*, 2019). Disamping itu, pentingnya mendidik siswa tentang dasar molekuler berkelanjutan membantu kimia untuk berkontribusi yang nyata terhadap pencapaian agenda keberlanjutan global. Pada sintesis amonia melalui proses Haber-Bosch dapat dipertimbangkan keterkaitan antara proses industri dengan sistem ilmiah, sosial dan lingkungan, tentunya dengan menggunakan kerangka berpikir sistem (Mahaffy *et al.*, 2019). Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, dapat menjadi dasar pijakan bagi mahasiswa Program Pendidikan Kimia di Indonesia untuk mengimplementasikan *sustainability of the molecular level* dalam mensintesis senyawa kompleks koordinasi logam tanah jarang berbasis limbah CRT dengan memperhatikan aspek keberlanjutan sosial dan lingkungannya. Kerangka berpikir sistem dalam pendidikan kimia penting untuk di integrasikan karena dapat menghubungkan

pengetahuan tentang dunia molekuler dengan keberlanjutan bumi dan sosialnya (Lavi & Dori, 2019).

Dalam melibatkan mahasiswa Program Pendidikan Kimia secara aktif dalam kegiatan penambangan berkelanjutan dari limbah CRT menggunakan metode ionometalurgi, perlu ditekankan bahwa pemahaman terhadap *sustainability of the molecular level* menjadi kunci utama. Kemampuan berpikir sistem menjadi kerangka berpikir yang sangat efektif dalam menganalisis dan merancang proses kimia berkelanjutan, seperti yang terjadi dalam sintesis cairan ionik eutektik. Oleh karena itu, melatih berpikir sistem kepada mahasiswa kimia dan Program Pendidikan Kimia harus dilakukan secara masif. Pada level universitas, salah satu mata kuliah di prodi Kimia/Pendidikan Kimia yang relevan dalam mengaitkan studi kasus konteks lingkungan dengan prinsip keberlanjutan pada tingkatan molekuler adalah mata kuliah kimia koordinasi. Pendidikan berkelanjutan pada perkuliahan kimia koordinasi dapat didesain dengan memperhatikan bagaimana memberikan pemahaman tentang keberlanjutan pada senyawa kompleks koordinasi. Kompetensi tentang keberlanjutan kimia koordinasi kepada mahasiswa dapat dibekalkan melalui penekanan konsep maupun praktik pada pemisahan logam dari limbahnya, pemurnian, sintesis, karakterisasi hingga level aplikasi produk (berkelanjutan). Penguatan terhadap keterampilan berpikir sistem, memberi bekal kemampuan dalam mengaitkan antara rekonstruksi konten kimia koordinasi dengan prinsip keberlanjutan pada tingkatan molekuler.

Dalam konteks lingkungan hidup, pendidikan memainkan peran penting dalam membangun skenario masa depan yang lebih berkelanjutan dan adil (OECD, 2005; Eilks, 2015; UNESCO, 2016; UNESCO, 2017). Hal ini menimbulkan tantangan untuk merestrukturisasi konten sains, proses dan pengaturan belajar mengajar, untuk mengarahkan ilmu kimia dan pendidikan kimia menuju keberlanjutan selaras dengan agenda pembangunan berkelanjutan 2030 (PBB, 2015). Dalam hal ini, diperlukan desain tahapan pembelajaran baru yang melibatkan dimensi berpikir sistem. Desain tahapan pembelajaran memasukkan kegiatan belajar-mengajar yang telah disesuaikan dengan penalaran mahasiswa (Mahaffy *et al.*, 2019). Desain tahapan pembelajaran perlu dikembangkan untuk

menghasilkan materi pengajaran dan pembelajaran yang berkualitas (Hernández, 2014). Berkaitan dengan hal tersebut, mahasiswa harus mengembangkan teori dan pengetahuan praktis yang diperlukan untuk mempromosikan inovasi pendidikan yang berkelanjutan (Stavrou *et al.*, 2018). Salah satu kerangka kerja (*framework*) yang sesuai untuk mengembangkan dan validasi desain tahapan pembelajaran yang dapat menghubungkan antara permasalahan secara kontekstual dan juga untuk memfasilitasi keterampilan yang dibutuhkan sesuai dengan tantangan masa depan adalah *Model Educational of Reconstruction* (MER). MER merupakan kerangka kerja yang dikembangkan untuk meningkatkan kualitas pembelajaran pada konten tertentu (Reinfried *et al.*, 2015). MER memiliki kelebihan dibandingkan dengan kerangka kerja lainnya karena mempertimbangkan dimensi epistemic dari pengetahuan (Méheut & Psillos, 2004). Integrasi bidang-bidang ini harus didasarkan pada desain pedagogik, keberlanjutan pada tingkat molekuler, dan penyelesaian masalah lingkungan (Feinstein & Kirchgasser, 2015). Hal ini membutuhkan keterampilan yang mendukung salah satunya adalah berpikir sistem. Berpikir sistem membekali peserta didik untuk mengenali interkoneksi penting di dunia kimia dan untuk menghargai bahwa sistem mungkin memiliki efek tak terduga yang tidak dapat diprediksi dari perilaku subsistem individu (Katehi *et al.*, 2009).

Keterampilan berpikir sistem seyogyanya dikembangkan dalam setiap mata kuliah yang mengangkat isu kontekstual dengan konsep literasi keberlanjutan. Sesuai dengan karakteristiknya, perkuliahan kimia koordinasi potensial digunakan sebagai wahana untuk mengintegrasikan isu kontekstual dengan *sustainability of the molecular level*, material berkelanjutan (logam tanah jarang), memfasilitasi keterampilan yang dibutuhkan mahasiswa dan menerapkan prinsip pendidikan kimia untuk pembangunan berkelanjutan baik dalam pembelajaran maupun praktikum. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan desain program perkuliahan kimia koordinasi dengan prinsip *sustainability of the molecular level* untuk meningkatkan berpikir sistem mahasiswa Program Pendidikan Kimia. Penelitian ini diharapkan dapat menjawab tantangan keberlanjutan dari sudut pandang molekuler melalui perkuliahan kimia koordinasi.

Selain itu, melalui perkuliahan ini diharapkan dapat meningkatkan keterampilan berpikir sistem mahasiswa.

1.2. Rumusan Masalah Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang penelitian, maka yang menjadi rumusan masalah pada penelitian ini adalah “Bagaimanakah desain perkuliahan kimia koordinasi dengan prinsip *sustainability of the molecular level* untuk meningkatkan berpikir sistem mahasiswa?”. Agar lebih terarah, rumusan masalah ini dapat dikembangkan dalam pertanyaan-pertanyaan penelitian sebagai berikut :

1. Bagaimana desain tahapan pembelajaran program perkuliahan kimia koordinasi dengan prinsip *sustainability of the molecular level* untuk meningkatkan berpikir sistem mahasiswa?
2. Bagaimana peningkatan keterampilan berpikir sistem mahasiswa sebagai efek dari implementasi program perkuliahan kimia koordinasi logam tanah jarang dengan prinsip *sustainability of the molecular level*?
3. Bagaimana profil berpikir sistem mahasiswa dalam mengembangkan pembelajaran kimia koordinasi logam tanah jarang?

1.3. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Konteks perkuliahan kimia koordinasi logam tanah jarang dengan prinsip keberlanjutan yang digunakan pada penelitian ini adalah pungut ulang LTJ dari sampah elektronik berupa TV.
2. Indikator berpikir sistem yang digunakan pada penelitian ini diadaptasi dari model hirarki berpikir sistem (*Systems Thinking Hierarchical/STH*) Assaraf dan Orion (2010).

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menghasilkan desain program perkuliahan kimia koordinasi dengan prinsip *sustainability of the molecular level* untuk meningkatkan berpikir sistem mahasiswa.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoretik maupun secara praktis. Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Manfaat Teoritik dan Praktik Pembelajaran

- a. Menyumbang gagasan tentang desain perkuliahan kimia koordinasi yang mampu meningkatkan berpikir sistem mahasiswa Program Pendidikan Kimia pada perkuliahan kimia koordinasi dengan prinsip *sustainability of the molecular level* untuk meningkatkan berpikir sistem mahasiswa Program Pendidikan Kimia.
- b. Praktikum kimia koordinasi berbasis daur ulang sampah elektronik yang mampu meningkatkan kemampuan berpikir sistem mahasiswa dan prinsip keberlanjutan.
- c. Menyumbang gagasan pembangunan pendidikan kimia berorientasi pada *molecular level of sustainability* bagi kurikulum program studi pendidikan kimia maupun ilmu kimia.

2. Manfaat praktis,

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi para Program Pendidikan Kimia, para dosen pengampu mata kuliah kimia koordinasi, antara lain :

a. Bagi Mahasiswa

- 1). Desain perkuliahan ini dapat meningkatkan pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan.
- 2). Mahasiswa dapat meningkatkan kemampuan berpikir sistem melalui inovasi praktikum melalui sintesis pelarut berbasis *green chemistry* dan pungut ulang logam tanah jarang dari sampah elektronik.

b. Bagi Dosen

- 1). Sebagai alternatif model perkuliahan bagi dosen untuk dapat melakukan inovasi-inovasi dalam perkuliahan kimia koordinasi.

- 2). Masukan bagi para pengembang kurikulum di LPTK, khususnya mengenai muatan isi materi pada mata kuliah kimia koordinasi bagi mahasiswa Program Pendidikan Kimia.

1.6. Definisi Operasional

Untuk mempermudah pembahasan, terlebih dahulu akan diuraikan dalam penelitian yaitu sebagai berikut :

- 1.6.1 Desain tahapan pembelajaran merupakan tahapan pembelajaran yang mencakup kegiatan belajar mengajar yang telah diteliti dengan baik dan disesuaikan secara empiris dengan kebutuhan peserta didik. Tahapan pembelajaran ini didesain dengan mengaitkan empat aspek penting diantaranya konten, pengajar, peserta didik dan dunia material. Desain tahapan pembelajaran ini dapat dilihat dari rancangan desain tahapan pembelajaran yang dikembangkan berdasarkan konsepsi ilmuwan dan prakonsepsi mahasiswa.
- 1.6.2. Konsepsi ilmuwan adalah konsep ilmiah terkait materi senyawa kompleks koordinasi logam tanah jarang. Analisis konten ini dilakukan mengikuti langkah-langkah analisis konten kualitatif menurut Mayring (2014). Untuk memperoleh konsepsi ilmuwan digunakan format untuk mengidentifikasi konten unsur tanah jarang dan kimia koordinasi.
- 1.6.3. Prakonsepsi mahasiswa merupakan konsep awal mahasiswa terkait dengan materi yang dikembangkan yaitu senyawa kompleks koordinasi logam tanah jarang. Teknik yang digunakan untuk memperoleh data konsepsi awal mahasiswa melalui wawancara terstruktur. Wawancara terstruktur dipilih karena set pertanyaan telah disiapkan dan diurutkan oleh pewawancara sehingga dapat menggali informasi yang cukup mendalam dari mahasiswa.
- 1.6.4. Keterampilan berpikir sistem merupakan seperangkat keterampilan interdisipliner yang digunakan untuk mempelajari, mengidentifikasi, menganalisis, mengatur dan membuat generalisasi suatu sistem secara menyeluruh. Indikator berpikir sistem dalam penelitian ini adalah (1)

mengidentifikasi komponen dari suatu sistem dan proses dalam sistem, (2) mengidentifikasi hubungan diantara komponen, (3) mengidentifikasi hubungan dinamika dalam sistem, (4) mengatur komponen dan proses dalam suatu kerangka hubungan, (5) memahami sifat siklus dari banyak sistem, (6) membuat generalisasi, (7) memahami dimensi tersembunyi, (8) berpikir sementara. Peningkatan keterampilan berpikir sistem ini diukur dari nilai *N-Gain* yang diperoleh menggunakan soal pilihan ganda beralasan melalui pretes dan postes setelah perkuliahan kimia koordinasi dengan prinsip *sustainability of the molecular level*.

1.7. Struktur Organisasi Disertasi

Untuk membangun kerangka disertasi yang koheren, bagian ini menyajikan garis besar dari isi setiap bab, urutan tahapan dan hubungan antara masing-masing bab. Disertasi ini terdiri dari lima BAB, yaitu BAB 1 Pendahuluan, BAB II Tinjauan Pustaka, BAB III Metode Penelitian, BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan, serta BAB V Simpulan dan Rekomendasi.

BAB I Pendahuluan terbagi menjadi beberapa bagian yang menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan definisi operasional. Pada Bab ini dijelaskan alasan, urgensi, dan kontribusi penelitian. BAB II berisi kajian teoritik yang meliputi desain tahapan pembelajaran, prinsip keberlanjutan pada tingkatan molekuler, logam tanah jarang, perkuliahan kimia koordinasi, keterampilan berpikir sistem, dan penelitian yang relevan.

BAB III berisi paradigma penelitian, metode penelitian dan menguraikan tentang subjek dan lokasi penelitian, metode pengolahan dan analisis data. BAB IV berisi hasil dan pembahasan sesuai dengan pertanyaan penelitian. BAB V menyajikan kesimpulan dan rekomendasi yang berasal dari hasil penelitian sebagai tindak lanjut atau implikasi dari penelitian disertasi yang dilakukan.