

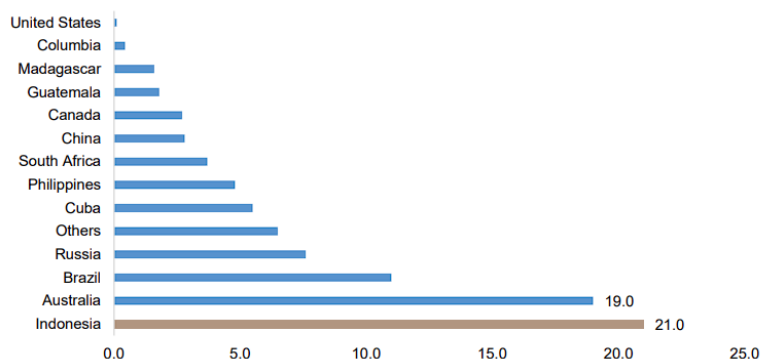
BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, nikel menjadi salah satu topik utama pada diskusi global terkait dengan transisi energi dan keberlanjutan industri. Nikel menjadi elemen kunci dalam perubahan dunia menuju penggunaan energi bersih dan ramah lingkungan, salah satunya adalah menjadi bagian sangat penting pada pembuatan baterai kendaraan listrik (*electric vehicle batteries*)[1][2]. Berdasarkan laporan dari International Energy Agency (IEA) pada 2019 pasar kendaraan listrik global semakin meningkat pesat dari 3,259,671 unit hingga 26,951,318 unit pada tahun 2030[3]. Peningkatan kebutuhan kendaraan listrik global ini secara langsung mempengaruhi permintaan nikel pada industri baterai, karena logam ini nantinya yang menjadi bahan utama dalam katode baterai berteknologi tinggi[4].

Indonesia memiliki posisi yang sangat strategis dalam rantai pasok global nikel. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia memiliki 52% cadangan nikel dunia yang setara dengan 72 juta ton nikel[5]. Pada 2022, Indonesia juga tercatat sebagai produsen nikel terbesar dunia dengan jumlah 1.6 *million metric tons* dan sekitar 21 juta ton cadangan nikel[6]. Cadangan nikel di Indonesia ini sebagian besar tersebar di Sulawesi Tengah, Maluku Utara, dan Papua Barat. Kondisi ini menjadikan Indonesia memerankan peran sangat penting dalam memenuhi pasokan global untuk bahan baku industri energi hijau sekaligus sebagai penggerak pertumbuhan ekonomi nasional[7][8].

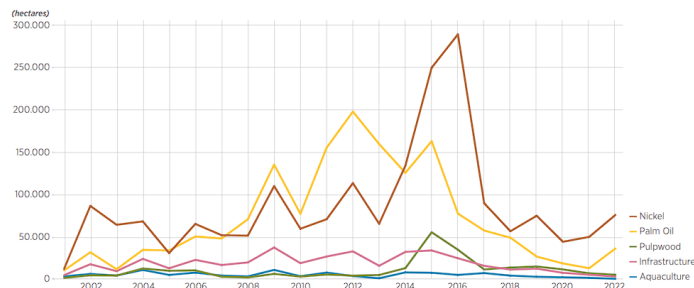


Gambar 1.1. Indonesia sebagai Negara dengan Cadangan Nikel Terbesar di Dunia [9]

Namun demikian, dibalik potensi ekonomi yang besar, peningkatan produksi bijih nikel juga menimbulkan berbagai macam konsekuensi lingkungan yang semakin memprihatinkan[10][11]. Umumnya, karakteristik geologi bijih nikel terhampar di dekat permukaan tanah, sehingga teknik yang dominan berupa kegiatan pertambangan terbuka (*open-pit mining*) yang menyebabkan kebutuhan pembukaan lahan yang luas untuk memperoleh target produksi yang sesuai[12], [13]. Metode tersebut berimplikasi langsung pada alih fungsi kawasan hutan, degradasi ekosistem, serta dampak yang begitu besar pada biodiversitas dan fungsi ekosistem[14]. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), lebih dari 80 ribu hektar lahan hutan di wilayah tambang nikel mengalami degradasi berat akibat aktivitas tambang yang tanpa adanya reklamasi yang memadai[14]. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian di wilayah Halmahera dan Sulawesi yang notabene menjadi wilayah dengan sumber cadangan nikel terbesar, dimana terlihat peningkatan signifikan pada deforestasi lahan hutan dan kerusakan habitat di dalamnya[15].

Driver of deforestation in the nickel provinces, 2001-2022

Nickel become the biggest deforestation driver in the nickel provinces
(South Sulawesi, Central Sulawesi, Southeast Sulawesi,
North Molucca, Southwest Papua and Papua).



Gambar 1.2. Laju Deforestasi Lahan Hutan dari Produksi Nikel [16]

Selain permasalahan deforestasi lahan hutan, aktivitas produksi tersebut juga berkontribusi terhadap kenaikan emisi karbon[17]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem produksi bijih nikel di Indonesia, terutama pada tahap *downstream* dan *midstream* menghasilkan emisi CO₂ yang cukup tinggi akibat konsumsi energi, seperti pada emisi akibat alih fungsi lahan, operasional alat berat, dan proses ekstraksi[18]. Hal ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan

oleh Jafarpour yang menyatakan eskalasi produksi mineral selalu diikuti peningkatan jejak karbon yang tinggi yang berpotensi mempercepat perubahan iklim[19]. Idealnya peningkatan produksi bijih nikel harus diiringi oleh pengelolaan lingkungan yang kuat dan solusi mitigasi guna menekan dampak berkepanjangan. Dengan demikian, pertumbuhan produksi bijih nikel memiliki keterkaitan langsung dengan peningkatan emisi karbon dan deforestasi lahan hutan. Meskipun juga peningkatan produksi bijih nikel sering dikaitkan dengan meningkatnya tekanan terhadap lingkungan, khususnya deforestasi, hubungan tersebut tidak selalu bersifat linear. Pada beberapa periode, peningkatan produksi justru diikuti oleh penurunan laju deforestasi akibat adanya perubahan kebijakan, optimalisasi area yang telah terbuka, serta peningkatan efisiensi dalam penggunaan lahan.

Hubungan antara peningkatan produksi bijih nikel dan dampak lingkungan yang berupa deforestasi lahan serta emisi karbon merupakan hubungan yang bersifat kompleks, dinamis, dan saling mempengaruhi dalam sistem. Sistem dinamik dipilih karena dianggap efisien untuk mengatasi berbagai masalah yang kompleks secara dinamik serta sering digunakan sebagai evaluasi sebuah sistem[20]. Lebih jauh, permasalahan lingkungan akibat produksi bijih nikel di Indonesia memiliki karakteristik yang bersifat kumulatif dan tidak mudah dipulihkan. Berbeda dengan sektor industri lain, kerusakan lingkungan akibat pertambangan bersifat *irreversible* atau membutuhkan waktu puluhan tahun untuk pulih, meskipun aktivitas tambang telah dihentikan. Di sisi lain, peningkatan produksi nikel diproyeksikan akan terus berlangsung seiring meningkatnya kebutuhan global terhadap baterai kendaraan listrik. Kondisi ini menciptakan dilema struktural, yaitu tekanan ekonomi untuk meningkatkan produksi berlangsung lebih cepat dibandingkan kemampuan sistem lingkungan untuk memulihkan diri. Lebih lanjut, penelitian dengan metode serupa telah dilakukan oleh Wasesa untuk menggambarkan dinamika rantai pasok dan perdagangan bijih nikel memiliki dampak lingkungan berupa emisi karbon dan *solid waste*[21]. Terdapat juga beberapa penelitian lain yang telah melakukan penelitian terhadap produksi bijih nikel dengan sistem dinamik namun masih terbatas hanya pada proses produksi dan *supply chain* [22], [23], [24], [25]. Dari beberapa uraian di atas, dapat diketahui juga bahwa dampak lingkungan pada proses produksi bijih nikel

eksisting masih belum terlalu ditelusuri lebih lanjut dan dirasa belum optimal dalam mengatasi permasalahannya. Selain itu, pada penelitian serupa meskipun sudah mengarah pada dampak lingkungan tetapi belum ada yang menjalankan skenario dan perbaikan pada subsistem lingkungan secara spesifik. Oleh karena itu, dalam penelitian ini metodologi sistem dinamik diimplementasikan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap perilaku jangka panjang antara produksi bijih nikel dan dampak lingkungan yang dihasilkan berikut untuk merumuskan skenario untuk pengelolaan dampak lingkungan yang dihasilkan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, dapat dirumuskan masalah yaitu:

1. Bagaimana hubungan antara proses produksi bijih nikel terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan?
2. Bagaimana skenario yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak lingkungan di proses produksi nikel?

1.3. Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan, pada penelitian ini terdapat beberapa batasan yang ditetapkan yaitu sebagai berikut:

1. Penelitian hanya berfokus pada aktivitas hulu (*upstream*) berupa eksplorasi dan produksi bijih sehingga tidak mencakup proses hilirisasi, pemurnian, maupun pengolahan menjadi *final product* seperti ferronickel, NPI, dan MHP.
2. Dampak lingkungan yang ditinjau terbatas pada aspek yang dapat diukur secara kuantitatif yaitu deforestasi lahan hutan dan emisi karbon.
3. Model sistem dinamik yang dibuat tidak memperhitungkan biaya dan faktor ekonomi.
4. Periode data yang digunakan dari tahun 2015 hingga 2024 dan simulasi model dilakukan dalam satuan tahun dilakukan untuk tahun 2025 hingga tahun 2040.
5. Pengolahan data dan pembuatan model simulasi dilakukan dengan bantuan program komputer menggunakan *software* VENSIM.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membangun model yang menggambarkan berbagai keterkaitan sistemik di antara entitas yang saling mempengaruhi perubahan dampak lingkungan berupa deforestasi dan emisi karbon akibat aktivitas produksi bijih nikel di Indonesia.
2. Mendapatkan skenario kebijakan atau temuan solusi dalam mendukung usaha penurunan dampak lingkungan

1.5. Manfaat Penelitian

Dengan tercapainya tujuan penelitian yang telah dibuat, hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat penelitian sebagai berikut:

1. Membantu mengumpulkan informasi terkait dinamika peningkatan produksi bijih nikel dan dampaknya terhadap lingkungan, serta faktor-faktor yang memengaruhinya.
2. Membantu menemukan solusi atau cara terbaik untuk menyelesaikan masalah yang dihadapi, sehingga dapat memberikan alternatif solusi untuk mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan.

1.6. Relevansi Sistem Informasi

Sistem informasi merupakan disiplin ilmu yang mempelajari bagaimana teknologi informasi, manusia, data, dan proses bisnis saling berinteraksi untuk menghasilkan informasi yang mendukung operasional maupun pengambilan keputusan dalam suatu organisasi. Interaksi antar komponen tersebut membentuk suatu sistem sosio-teknis (*socio-technical system*) yang bersifat dinamis karena dipengaruhi oleh perubahan lingkungan, perilaku pengguna, kebijakan organisasi, serta perkembangan teknologi[26]. Oleh karena itu, penelitian dalam bidang sistem informasi tidak hanya berfokus pada pengembangan perangkat lunak, tetapi juga pada pemahaman terhadap perilaku sistem yang kompleks dan dampaknya terhadap individu, organisasi, maupun lingkungan bisnis sistem informasi. Kompleksitas

hubungan antar komponen tersebut menyebabkan permasalahan dalam sistem informasi bersifat dinamis dan melibatkan berbagai mekanisme umpan balik yang sulit dijelaskan menggunakan pendekatan linier.

Berdasarkan hal tersebut, sistem dinamik dipandang sebagai salah satu metode penelitian yang mampu mendukung pengembangan penelitian di bidang sistem informasi. Suryani, Erma et al. menjelaskan bahwa sistem dinamik menyediakan pendekatan pemodelan untuk memahami hubungan sebab-akibat, mekanisme umpan balik, serta perubahan perilaku sistem dari waktu ke waktu[27]. Melalui pendekatan tersebut, akan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai perilaku sistem yang kompleks sehingga dapat menghasilkan skenario simulasi hingga rekomendasi kebijakan yang lebih tepat[28].

Penelitian ini menggunakan metode sistem dinamik untuk memodelkan dinamika produksi bijih nikel, cadangan sumber daya, deforestasi, dan emisi karbon yang saling memengaruhi melalui hubungan sebab-akibat, hubungan umpan balik (*feedback loop*), serta keterlambatan waktu (*time delays*) yang membentuk perilaku sistem. Meskipun objek penelitian berada pada sektor pertambangan, kontribusi penelitian ini tetap berada dalam ranah sistem informasi karena menghasilkan model analitis yang menggambarkan perilaku suatu sistem kompleks serta menyediakan informasi berbasis simulasi yang dapat digunakan untuk mendukung analisis dan evaluasi berbagai alternatif kebijakan[29], [30].

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini bertujuan untuk memandu penyusunan laporan dan menjadi pedoman dalam mencapai tujuan penulisan skripsi. Berikut merupakan bagian yang digunakan dalam proses penyusunan skripsi:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan gambaran umum tentang isi penelitian, mencakup latar belakang studi kasus penelitian mengenai produksi bijih nikel dengan dampaknya ke lingkungan, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab ini membahas penelitian terdahulu yang relevan untuk dibandingkan dengan penelitian saat ini, termasuk dasar teori yang mendukung topik, serta alat dan teknologi yang digunakan dalam penelitian terkhusus pada penggunaan metode sistem dinamik pada permasalahan dinamik dampak lingkungan dalam lingkup pertambangan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah yang diambil untuk mencapai tujuan penelitian, mencakup identifikasi masalah, studi literatur, pengumpulan data, pengembangan *causal loop diagram* dan *stock flow diagram*, verifikasi dan validasi pada model, serta pengembangan skenario sistem.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil dari tiap tahap dalam metodologi penelitian, mencakup pengembangan, pengujian, dan penyusunan skenario dari model yang telah dibuat. Selain itu, dibahas keberhasilan dalam perancangan model, validitas model, serta pengembangan skenario dan evaluasi pada hasil skenario berdasarkan model untuk kemudian dilakukan implikasi kebijakan sehingga dapat menjawab permasalahan penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini memuat ringkasan dari keseluruhan hasil penelitian yang telah dibahas sebelumnya, serta menyajikan saran sebagai bahan pertimbangan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini mencantumkan literatur yang digunakan sebagai referensi dalam penyusunan skripsi, memberikan dasar yang kuat bagi argumen dan analisis yang disajikan.

LAMPIRAN

Pada bagian lampiran, akan disajikan data tambahan atau informasi pelengkap yang mendukung pembuatan skripsi, seperti tabel, grafik, atau dokumen lain yang relevan dengan penelitian yang dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

Bagian ini memuat dasar teori yang memiliki relevansi dengan masalah yang akan diselesaikan, serta alat dan teknologi yang akan dibutuhkan selama penelitian.

2.1.1. Pertambangan Nikel

Nikel merupakan salah satu logam mineral yang memiliki perkembangan industri global, Secara tradisional, nikel banyak digunakan sebagai bahan baku utama industri baja tahan karat (*stainless steel*) karena memiliki sifat tahan korosi dan mampu meningkatkan kekuatan mineral[31]. Selain itu, dalam beberapa tahun terakhir, peran nikel semakin meningkat seiring berkembangnya industri kendaraan listrik (*electric vehicle*) dan teknologi penyimpanan energi (baterai). Meningkatnya kebutuhan kendaraan listrik global dan perubahan mengikuti *green life style*, menyebabkan permintaan nikel terus mengalami peningkatan[32]. Kondisi tersebut menjadi komoditas strategis dalam mendukung transisi energi menuju penggunaan energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Indonesia menempati posisi terdepan dalam industri nikel global, menjadi produsen bijih nikel terbesar di dunia sejak tahun 2019. Berdasarkan data USGS Mineral Yearbook Indonesia pada tahun 2023, cadangan nikel Indonesia diperkirakan mencapai lebih dari 21 juta ton dengan konsentrasi utama terletak pada wilayah Sulawesi, Maluku dan Papua. Secara geologis, bijih nikel merupakan endapan mineral hasil pelapukan batuan ultramafik dalam jangka waktu geologi yang sangat panjang. Profil endapan mineral yang mengandung unsur nikel yang kemudian dapat diekstraksi guna menghasilkan berbagai produk turunan. Karena endapan nikel ini berada relatif dekat dengan permukaan tanah yang berada pada kedalaman sekitar 1 hingga 40 meter dari permukaan, metode tambang terbuka (*open pit mining*) menjadi pilihan utama dalam proses ekstraksinya. Berikutnya, menurut ESDM, bijih nikel berdasarkan karakteristiknya dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. Saprolite: Merupakan bijih nikel yang berada pada lapisan bawah dengan kandungan nikel yang relatif lebih tinggi ($>1,5\%$) [33] dan kadar besi yang lebih rendah dibandingkan limonit. Berdasarkan karakteristik tersebut, menjadikan saprolit menjadi bahan baku utama industri *ferronickel* dan *nickel pig iron (NPI)* melalui teknologi pirometalurgi sebagai bahan baku dalam industri *stainless steel*. Saprolite telah ditambang secara komersial di Indonesia sejak lama dan merupakan jenis bijih yang dominan dalam produksinya hingga awal tahun 2020 sebelum adanya tren kebutuhan pada industri baterai dan kesiapan hilirisasi proses pengolahan di Indonesia.
2. Limonite: Merupakan lapisan laterit yang berada pada lapisan atas dan umumnya memiliki kandungan besi yang lebih dominan dengan kadar nikel yang relatif lebih rendah ($<1,5\%$) dibandingkan saprolite[31]. Saat ini, pemanfaatan limonite banyak digunakan sebagai bahan baku proses pembuatan baterai kendaraan listrik dalam bentuk produk *Mixed Hydroxide Precipitate (MHP)*. Produksi bijih nikel jenis limonite ini baru mulai berkembang secara komersial di Indonesia mulai sekitar tahun 2022 seiring dengan adanya ekspansi peralatan pada proses pengolahan dalam negeri. Perbedaan teknologi pengolahan antara saprolite dan limonite inilah yang menjadi implikasi secara langsung pada struktur permintaan dan pola penambangan yang terjadi.

Dengan adanya cadangan saprolite dan limonite inilah yang menjadikan sumber daya utama Indonesia yang dapat menentukan kemampuan produksi bijih nikel nasional. Dimana, semakin besar jumlah cadangan yang tersedia, maka akan semakin besar pula produksi yang dapat dilakukan dalam suatu periode tertentu. Namun, sifat tak terbarukan yang dimiliki oleh cadangan mineral ini yang berarti pada setiap ton bijih nikel yang ditambang secara permanen hanya akan mengurangi kapasitas cadangan dan produksi di masa mendatang, sehingga bisa direpresentasikan dengan pendekatan sistem dinamik berbasis *stock flow*.

2.1.2. Produksi Bijih Nikel

Produksi bijih nikel merupakan kegiatan ekstraksi dan pengangkatan material bijih nikel dari cadangan mineral yang berada di dalam bumi bertujuan

untuk memperoleh bijih nikel sebagai bahan baku berbagai industri[34]. Di Indonesia, produksi nikel mengalami dinamika yang sangat signifikan selama dekade terakhir, yang mencerminkan interaksi kompleks antara kebijakan ekspor, ekspansi kapasitas smelter, dan fluktuasi permintaan global.

Produksi nasional anjlok dari sekitar 52 juta ton pada 2013 menjadi hanya 7,8 juta ton pada 2014–2015 akibat pemberlakuan larangan ekspor bijih mentah. Setelah relaksasi kebijakan pada 2017–2019, produksi melonjak kembali hingga mencapai 60,9 juta ton pada 2019. Pasca-larangan ekspor yang kembali diberlakukan penuh pada 2020 bersamaan dengan ekspansi masif kapasitas smelter domestik, produksi terus tumbuh mencapai 98,2 juta ton pada 2022 dan 137,8 juta ton pada 2023 [54]. Dinamika historis ini menunjukkan bahwa produksi bijih nikel sangat sensitif terhadap perubahan kebijakan sebuah karakteristik yang menjadi basis penting dalam perancangan variabel kebijakan eksogen (*Export Ban*) dalam model penelitian ini.

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi produksi bijih nikel diantaranya:

1. Cadangan Bijih Nikel: Merupakan jumlah sumber data mineral yang secara teknis dan ekonomis dapat ditambang. Cadangan berfungsi sebagai stok utama dalam sistem produksi. Penurunan jumlah cadangan (*depletion rate*) akibat aktivitas penambangan akan mengurangi kemampuan produksi pada periode berikutnya[35]. Dalam kerangka sistem dinamik, cadangan dimodelkan sebagai *stock* yang terkuras secara kontinu menghasilkan loop *balancing* antara penambangan dengan cadangan yang menjadi pembatas alami jangka panjang.
2. Permintaan Global: Merupakan kebutuhan pasar internasional terhadap bijih nikel yang dipengaruhi oleh perkembangan industri baja tahan karat, kendaraan listrik, dan baterai. Peningkatan permintaan global akan mendorong peningkatan aktivitas produksi untuk memenuhi kebutuhan pasar dunia, yang diproyeksikan akan meningkat lebih dari dua kali lipat pada tahun 2040 dibandingkan pada awal mulai produksi pada tahun 2022 [7], [36].
3. Permintaan Domestik: Merupakan kebutuhan industri dalam negeri terhadap bijih nikel, terutama dari sektor pengolahan dan pemurnian mineral tersebut.

Dengan adanya peningkatan jumlah smelter dan industri hilirisasi di Indonesia, akan menyebabkan kebutuhan bijih nikel domestik terus meningkat dari tahun ke tahun[33].

4. *Mining Rate*: Merupakan jumlah bijih nikel yang berhasil diekstraksi dalam periode tertentu. *Mining rate* menjadi variabel utama yang menghubungkan cadangan bijih nikel dengan jumlah produksi yang dihasilkan. Semakin tinggi mining rate maka semakin besar produksi yang dihasilkan, namun di sisi lain akan mempercepat penurunan cadangan yang tersedia.[37], [38]. Dimana pada penelitian ini akan dipisah menjadi dua jalur berdasarkan karakteristik bijih nikel yang mencerminkan perbedaan teknologi pengolahan dan profil pertumbuhan historis yang berbeda antara keduanya.
5. Kebijakan Larangan Ekspor: Merupakan kebijakan pemerintah yang bertujuan mendorong hilirisasi industri mineral di Indonesia. Kebijakan ini mengubah pola distribusi bijih nikel dari orientasi ekspor menjadi pemenuhan kebutuhan industri dalam negeri. Dalam sistem produksi, kebijakan ini berperan sebagai variabel eksogen yang mempengaruhi besarnya permintaan produksi dan secara langsung menentukan apakah permintaan global akan berkontribusi terhadap tekanan produksi atau tidak.

Seperti pada model *supply chain* nikel Indonesia yang dikembangkan oleh Wasesa menunjukkan bahwa produksi bijih nikel meningkat tajam sejak 2015 seiring dengan ekspansi smelter dan kebijakan larangan ekspor bijih nikel[35]. Peningkatan permintaan, baik domestik maupun global, mendorong peningkatan produksi nikel yang pada akhirnya berdampak pada intensitas aktivitas pertambangan dan penggunaan lahan. Dalam penelitian ini, permintaan domestik, permintaan global, dan kebijakan larangan ekspor diperlakukan sebagai variabel eksogen yang memengaruhi tingkat produksi nikel. Variabel-variabel tersebut tidak menjadi fokus utama terlebih sebagai variabel ekonomi, melainkan sebagai variabel penggerak utama dalam sistem yang memicu perubahan pada komponen lingkungan.

Di Indonesia, pertambangan nikel umumnya dilakukan dengan metode tambang terbuka (*open pit mining*), yaitu metode penambangan yang melibatkan pembukaan lapisan tanah dan vegetasi dalam skala luas untuk mencapai lapisan

bijih nikel yang berada di bawah permukaan tanah. Metode tambang terbuka dipilih karena dinilai lebih efisien dari sisi teknis dan ekonomi, namun memiliki dampak lingkungan yang signifikan, khususnya terhadap perubahan tutupan lahan dan peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂). Aktivitas pembukaan lahan, penggunaan alat berat, serta proses pengangkutan material merupakan sumber utama tekanan lingkungan dalam kegiatan pertambangan nikel[39].

2.1.3. Deforestasi Lahan Hutan

Deforestasi merupakan proses berkurangnya luas tutupan kawasan hutan akibat perubahan penggunaan lahan menjadi kawasan non-hutan. Dalam kegiatan pertambangan nikel, deforestasi terjadi sebagai akibat dari pembukaan lahan untuk area tambang, fasilitas pendukung, serta infrastruktur penunjang lainnya. Luas lahan yang dibuka berbanding lurus dengan intensitas aktivitas pertambangan dan tingkat produksi nikel. Atika et al. [54] menganalisis 380 area konsesi tambang nikel di Indonesia menggunakan citra satelit Landsat 8 dan metode *machine learning random forest* selama periode 2013–2022. Hasilnya menunjukkan bahwa aktivitas penambangan nikel memicu 53% transformasi lahan hutan di dalam area konsesi, dengan total sekitar 141 juta m² hutan terkonversi menjadi area tambang selama periode tersebut. Temuan ini menegaskan bahwa deforestasi akibat tambang nikel bukan fenomena marginal, melainkan ancaman struktural terhadap ekosistem hutan di Indonesia, khususnya pada wilayah timur. Karakteristik unik yang ditemukan selama periode larangan ekspor (2014–2016) memberikan wawasan penting bagi pemodelan: meskipun produksi bijah nikel anjlok drastis dari 52 juta ton (2013) menjadi 7,8 juta ton (2014–2015), luas area tambang yang terbuka tidak berkurang secara proporsional. Kondisi ini menyebabkan intensitas deforestasi per ton produksi melonjak sangat tinggi pada periode tersebut [54]. Fenomena inilah yang dalam penelitian ini direpresentasikan melalui variabel *Forest Opening Pressure* (FOP), sebuah koefisien yang bervariasi per periode kebijakan untuk menangkap realitas bahwa pembukaan lahan tidak selalu sebanding linear dengan volume produksi aktual.

Deforestasi memiliki karakteristik sebagai proses dinamis karena luas hutan yang hilang akan terus bertambah selama aktivitas pembukaan lahan berlangsung[40], [41]. Hilangnya tutupan hutan menyebabkan terganggunya fungsi ekologis hutan, termasuk fungsi sebagai penyerap karbon[42]. Selain itu, deforestasi juga berkontribusi terhadap degradasi tanah, peningkatan erosi, serta perubahan keseimbangan ekosistem di wilayah sekitar tambang[43]. Dalam penelitian ini, deforestasi tidak diposisikan hanya sebagai dampak lingkungan yang statis, melainkan menjadi variabel yang berkembang secara kumulatif dengan intensitas produksi dan pengelolaan lahan. Adapun faktor faktor yang mempengaruhi deforestasi diantaranya:

1. *Forest area* merupakan luas kawasan hutan yang tersedia dan berpotensi terdampak oleh aktivitas pertambangan. Penurunan luas kawasan hutan menunjukkan terjadinya degradasi lingkungan akibat aktivitas pertambangan[44].
2. *Land Clearing Factor*, merupakan parameter yang menunjukkan kebutuhan luas lahan hutan yang dibuka atau dialihfungsikan untuk menghasilkan satu satuan produksi bijih nikel, sehingga dapat digunakan sebagai representasi efisiensi penggunaan lahan dalam kegiatan pertambangan.
3. *Forest Opening Pressure*, merupakan parameter yang merepresentasikan Tingkat tekanan pembukaan kawasan hutan akibat aktivitas pertambangan, yang dapat menjadi acuan dalam pembuatan kebijakan perlindungan hutan dalam model[45], [46].
4. *Forest Carbon Density* merupakan jumlah karbon yang tersimpan pada biomassa hutan. Hilangnya tutupan hutan akibat deforestasi menyebabkan karbon yang tersimpan dilepaskan ke atmosfer dalam bentuk emisi karbon dioksida (CO_2), dengan nilainya sebesar 0,0002 juta tCO_2/ha ($= 200 \text{ tCO}_2/\text{ha}$) diturunkan dari data rata-rata *carbon loss* per m^2 . [38], [47].

2.1.4. Emisi Karbon

Emisi karbon merujuk pada jumlah gas karbon dioksida (CO_2) yang dilepaskan ke atmosfer oleh kegiatan manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, industri, dan transportasi[48]. Dalam kegiatan pertambangan bijih nikel, emisi

karbon dihasilkan dari berbagai sumber, antara lain penggunaan alat berat berbahan bakar fosil, aktivitas pengangkutan material, serta perubahan tutupan lahan akibat deforestasi. Pembukaan kawasan hutan untuk tambang terbuka menyebabkan hilangnya cadangan karbon yang tersimpan dalam biomassa dan tanah, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon ke atmosfer[49].

Emisi karbon dari pertambangan memiliki sifat kumulatif dan meningkat seiring dengan skala serta intensitas produksi. Semakin besar volume bijih nikel yang diproduksi, semakin tinggi pula kebutuhan energi dan aktivitas operasional yang menghasilkan emisi karbon[50]. Oleh karena itu, emisi karbon dalam penelitian ini dipahami sebagai konsekuensi langsung dari aktivitas produksi dan menjadi variabel endogen pada sistem. Adapun faktor faktor yang mempengaruhi pada variabel ini diantaranya adalah:

1. Emisi Deforestasi (*Deforestation Emission*) merupakan emisi yang timbul akibat hilangnya stok karbon hutan (biomassa) sebagai konsekuensi dari pembukaan lahan tambang. Ini adalah komponen emisi yang paling dominan dan langsung terukur dalam penelitian ini, sehingga, diformulasikan sebagai perkalian antara laju deforestasi, kerapatan karbon per ha, dan faktor komposisi tutupan lahan (*Land Cover Carbon*) yang mencerminkan perubahan proporsi tipe tutupan sepanjang waktu[51], [52].
2. Emisi Produksi Per Ton Bijih Nikel, merupakan kumulatif emisi karbon yang dihasilkan dalam proses mengambil atau mengekstraksi bijih nikel, akibat faktor kebutuhan air, alat konstruksi, dan jejak karbon yang dihasilkan pada seluruh prosesnya[53], [54], [55]. Variabel ini dalam penelitian ini direpresentasikan sebagai variabel eksogen berbasis data empiris, yang melaporkan carbon loss per ton bijih nikel berkisar 0,06–0,34 tCO₂/ton selama 2015–2022. Variabel ini berfungsi sebagai indikator intensitas lingkungan yang dapat digunakan untuk membandingkan efisiensi antara periode dan skenario.

2.1.5. Kerangka Kebijakan Pertambangan dan Lingkungan

Pemahaman terhadap kerangka regulasi yang mengatur pertambangan nikel dan pengelolaan lingkungannya merupakan landasan penting dalam merancang

skenario kebijakan yang realistis dan relevan. Adapun beberapa peraturan yang terkait pada penelitian ini diantaranya adalah:

1. Kebijakan Larangan Ekspor Bijih Nikel: Pemerintah Indonesia telah mengeluarkan serangkaian regulasi yang mengatur ekspor bijih nikel mentah sebagai bagian dari kebijakan hilirisasi industri. Permen ESDM No. 1/2014 memberlakukan larangan ekspor bijih nikel pertama kali, namun kemudian dilonggarkan melalui Permen ESDM No. 5/2017 yang membolehkan ekspor untuk bijih berkadar $Ni < 1,7\%$ selama periode 2017–2019. Larangan penuh kemudian diberlakukan kembali melalui Permen ESDM No. 11/2019 yang berlaku efektif sejak 1 Januari 2020 dan masih berlaku hingga saat ini. Perubahan kebijakan ekspor ini memiliki dampak langsung terhadap dinamika permintaan dan produksi yang direpresentasikan sebagai variabel *Export Ban* dalam model penelitian ini.
2. Kewajiban Reklamasi Pascatambang: Permen ESDM No. 7/2014 tentang Pelaksanaan Reklamasi dan Pascatambang mewajibkan perusahaan tambang untuk mereklamasi lahan yang telah selesai ditambang. UU Minerba No. 2/2020 Pasal 99 memperkuat kewajiban ini dengan mengharuskan perencanaan reklamasi dan pascatambang sejak awal kegiatan. Namun, sebagaimana diidentifikasi oleh Atika et al. [54], regulasi yang ada tidak mensyaratkan pemulihan stok karbon yang terukur (*carbon-specific restoration requirements*).
3. Komitmen Iklim Nasional: Indonesia's Enhanced Nationally Determined Contribution (NDC) tahun 2022 menetapkan target pengurangan emisi GRK dari sektor penggunaan lahan (*land use*) sebesar 214 juta tCO₂ secara *unconditional* pada 2030 [60]. Sektor pertambangan nikel, yang menghasilkan emisi *land use change* sebesar 6,9 juta tCO₂ pada 2022 dan berpotensi mencapai 16–27 juta tCO₂ pada 2030 [54], merupakan sumber tekanan yang semakin signifikan terhadap alokasi NDC sektor ini. Skenario-skenario dalam penelitian ini secara tidak langsung mengevaluasi seberapa besar kontribusi pengurangan yang dapat diberikan dari sektor nikel terhadap target NDC nasional tersebut.

2.1.6. Sistem Dinamik

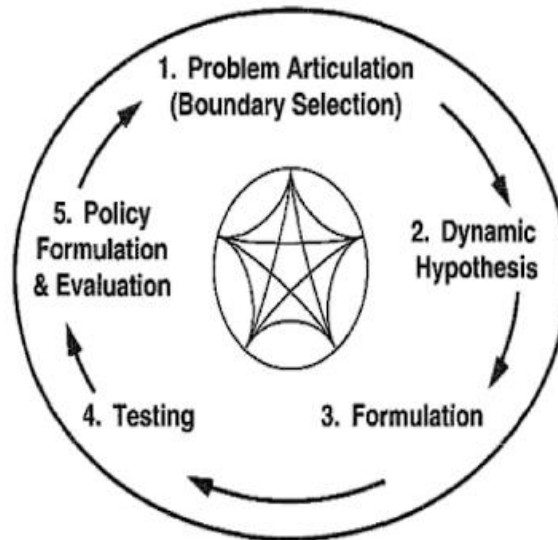
Sistem dinamik merupakan pendekatan yang diterapkan untuk memahami dan menganalisis perilaku sistem yang kompleks dan saling interdependensi dengan fokus pada struktur dan interaksi antar variabel dalam sistem tersebut. Metode ini dikembangkan oleh Jay W. Forrester dari MIT[56]. Sistem dinamik sering digunakan untuk menggambarkan sistem sosial dan fisik yang bersifat non-linear dan memiliki feedback loops yang tidak bisa dijelaskan melalui pendekatan konvensional.

Dalam sistem dinamik, pemodelan dilakukan dengan mengonversi informasi sistem menjadi persamaan matematis yang selanjutnya disimulasikan untuk menganalisis dinamika sistem dalam jangka waktu tertentu. Proses ini terdiri dari beberapa langkah dimulai dari menggambarkan sistem yang ada, formulasi model, simulasi, hingga evaluasi kebijakan untuk memperbaiki sistem yang ada. Salah satu kelebihan dari sistem dinamis adalah kemampuannya dalam menangani kompleksitas dan ketidakpastian yang ditemukan dalam sistem sosial dan ekonomi (Forrester, 1994).

Relevansi sistem dinamik untuk penelitian ini secara spesifik terletak pada tiga kemampuan utamanya yang tidak dimiliki metode alternatif lain. Pertama, kemampuan memodelkan *non-renewable resource dynamics*, yakni cadangan mineral sebagai *stock* yang terdepleksi secara tidak terbarukan seiring waktu, sehingga menghasilkan pola perilaku *S-curve* dan *overshoot-collapse* yang khas dalam sistem sumber daya alam [51]. Kedua, kemampuan menangkap *time delays* antara intervensi kebijakan dan dampak yang dihasilkan, seperti misalnya dampak larangan ekspor terhadap deforestasi tidak langsung terjadi, melainkan melalui rantai kausal beberapa tahap yang masing-masing memiliki *delay*. Ketiga, kemampuan mensimulasikan *policy scenarios* secara kuantitatif dalam horizon waktu panjang (2015–2040), dimana tidak hanya memprediksi apa yang akan terjadi, tetapi juga mengeksplorasi apa yang dihasilkan berbagai pilihan kebijakan.

Dibandingkan dengan pendekatan alternatif seperti *Life Cycle Assessment* (LCA) yang bersifat statis dan satu titik waktu, atau analisis regresi yang tidak menangkap *feedback loops*, atau model *agent-based* yang membutuhkan data perilaku individu tambang yang tidak tersedia secara nasional, sistem dinamik

memberikan keseimbangan terbaik antara representasi dinamika sistem yang akurat dengan ketersediaan data yang memungkinkan kalibrasi dan validasi [18]. Dalam mengembangkan model sistem dinamik, terdapat lima tahapan yang perlu dilakukan yang digambarkan pada Gambar 2.1. sebagai berikut.



Gambar 2.1 Tahapan Pengembangan Model Sistem Dinamik[57]

2.1.5.1. *Problem Articulation*

Problem Articulation merupakan tahapan awal dalam proses pemodelan sistem dinamik yang bertujuan untuk mendefinisikan permasalahan yang akan dianalisis secara jelas dan terstruktur. Menurut Sterman (2000), tahapan ini dilakukan untuk memahami perilaku sistem yang menjadi perhatian (*dynamic problem*), mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi permasalahan, serta menetapkan batasan sistem agar proses pemodelan tetap terarah. Perumusan masalah yang baik menjadi dasar dalam menentukan ruang lingkup penelitian sehingga model yang dikembangkan mampu merepresentasikan sistem sesuai dengan tujuan penelitian.

Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap variabel-variabel utama yang berkaitan dengan permasalahan, penentuan batas sistem (*system boundary*), serta penetapan horizon waktu simulasi. Penentuan horizon waktu diperlukan agar model mampu menggambarkan perilaku sistem dalam jangka waktu yang sesuai dengan karakteristik permasalahan yang dikaji. Selain itu, proses *problem articulation* juga melibatkan pengumpulan informasi melalui studi literatur, analisis data historis,

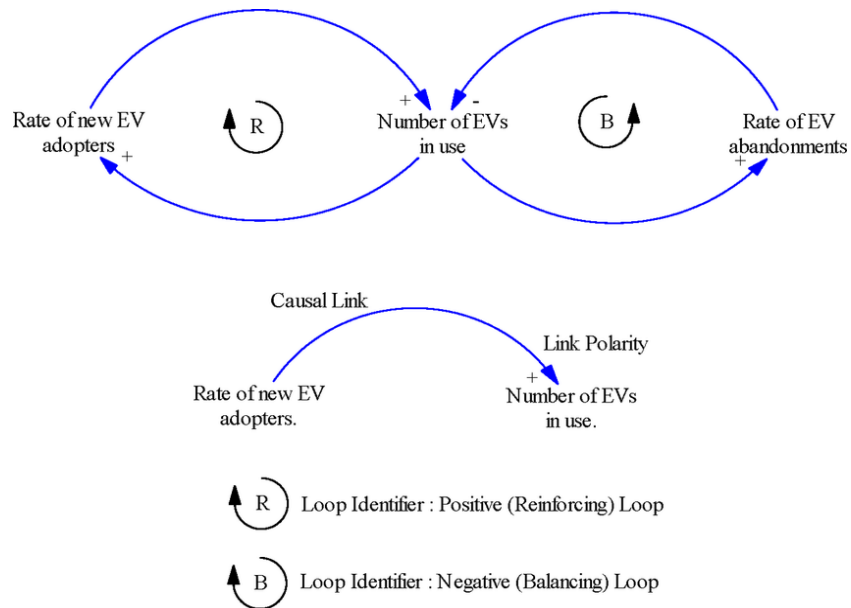
maupun diskusi dengan pihak yang memahami sistem sehingga permasalahan yang dirumuskan memiliki dasar konseptual dan empiris yang kuat.

Hasil dari tahapan ini berupa rumusan masalah yang jelas, identifikasi variabel-variabel kunci, serta batasan sistem yang akan digunakan sebagai dasar dalam penyusunan hipotesis dinamis pada tahap berikutnya. Dalam penelitian ini, tahapan *problem articulation* digunakan untuk menentukan ruang lingkup sistem yang mencakup aktivitas produksi bijih nikel beserta dampaknya terhadap deforestasi dan emisi karbon sebagai fokus utama pemodelan.

2.1.5.2. *Formulating a Dynamic Hypothesis*

Tahap *Formulating a Dynamic Hypothesis* merupakan proses penyusunan hipotesis mengenai bagaimana struktur internal suatu sistem menghasilkan perilaku yang diamati. Menurut Sterman (2000), hipotesis dinamis menjelaskan bahwa suatu permasalahan tidak hanya dipengaruhi oleh faktor eksternal, tetapi juga oleh interaksi antarvariabel yang membentuk mekanisme umpan balik (*feedback*) di dalam sistem. Oleh karena itu, tujuan utama tahapan ini adalah membangun dugaan awal mengenai hubungan sebab-akibat yang nantinya akan diuji melalui model simulasi.

Penyusunan hipotesis dinamis umumnya dilakukan *menggunakan Causal Loop Diagram* (CLD) sebagai representasi konseptual hubungan antarvariabel dalam sistem. CLD menggambarkan keterkaitan sebab-akibat melalui panah yang menunjukkan arah pengaruh antarvariabel, disertai dengan polaritas positif (+) atau negatif (-). Polaritas positif (+) menunjukkan bahwa perubahan pada suatu variabel akan menyebabkan perubahan pada variabel lain dengan arah yang sama, sedangkan polaritas negatif (-) menunjukkan perubahan yang berlawanan arah. Contoh dalam penerapan *causal loop diagram* yang menggambarkan polaritasnya akan ditampilkan pada Gambar 2.2. berikut.



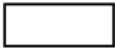
Gambar 2.2. Contoh Causal Loop Diagram

Selain menunjukkan hubungan sebab-akibat, CLD juga digunakan untuk mengidentifikasi adanya mekanisme umpan balik (*feedback loop*) yang membentuk perilaku sistem. Mekanisme tersebut dapat berupa reinforcing loop, yaitu hubungan yang memperkuat perubahan sehingga menghasilkan pertumbuhan atau penurunan secara berkelanjutan, maupun balancing loop, yaitu hubungan yang cenderung menyeimbangkan sistem sehingga mendorong tercapainya kondisi yang stabil. Identifikasi kedua jenis *feedback* tersebut menjadi dasar dalam memahami perilaku sistem sebelum dikembangkan ke dalam model simulasi yang lebih rinci.

2.1.5.3 Formulating a Simulation Model

Formulating a Simulation Model atau pengembangan model simulasi ini akan disusun hipotesis dinamis melalui *Causal Loop Diagram* (CLD) dikembangkan menjadi model simulasi formal yang dikenal sebagai *Stock and Flow Diagram* (SFD). Menurut Sterman, SFD merupakan representasi kuantitatif dari suatu sistem yang menggambarkan proses akumulasi (*stock*), perubahan (*flow*), serta hubungan matematis antarvariabel sehingga perilaku sistem dapat disimulasikan sepanjang waktu. Berbeda dengan CLD yang hanya menunjukkan hubungan sebab-akibat secara konseptual, SFD memungkinkan setiap hubungan tersebut diterjemahkan ke dalam persamaan matematis sehingga dapat digunakan untuk melakukan simulasi dan analisis kebijakan.

Dalam SFD, setiap variabel diklasifikasikan berdasarkan fungsinya di dalam sistem. Variabel stock merepresentasikan akumulasi atau kondisi yang berubah seiring waktu, seperti jumlah cadangan sumber daya atau luas kawasan hutan. Perubahan pada variabel *stock* dipengaruhi oleh variabel flow, yaitu aliran yang menggambarkan proses penambahan (*inflow*) maupun pengurangan (*outflow*) terhadap suatu *stock*. Selain kedua komponen tersebut, SFD juga terdiri atas *auxiliary variable* yang berfungsi sebagai variabel pendukung dalam proses perhitungan, serta constant yang merepresentasikan parameter atau nilai tetap yang digunakan dalam model. Berikut Gambar 2.3. yang secara lebih rinci menjelaskan terkait jenis variabel pada SFD.

Simbol	Nama	Keterangan
	<i>Stock / Level</i>	Simbol yang menunjukkan bagian dari sistem yang memiliki nilai bergantung dari perilaku sistem sebelumnya serta menunjukkan akumulasi.
	<i>Flow / Rate</i>	Simbol yang menunjukkan jumlah dari nilai yang tergantung pada kondisi <i>Stock</i> .
	<i>Converters</i>	Simbol yang menunjukkan bagian dari sistem yang memiliki nilai yang dapat diturunkan dari bagian lain melalui beberapa prosedur komputasi.
	<i>Connectors</i>	Simbol yang menunjukkan proses bagian dalam sistem bisa saling mempengaruhi.
	<i>Source/sink</i>	Simbol yang mewakili <i>Stock</i> diluar batasan sistem.

Gambar 2.3. Simbol Stock Flow Diagram

Pada penelitian ini, penyusunan SFD dilakukan berdasarkan hubungan kausal yang telah diidentifikasi pada CLD dengan mempertimbangkan karakteristik sistem produksi bijih nikel beserta dampak lingkungannya. Seluruh variabel yang telah ditentukan kemudian disusun ke dalam struktur *stock*, *flow*, *auxiliary*, dan *constant*, serta dirumuskan dalam bentuk persamaan matematis menggunakan perangkat lunak Vensim. Model yang telah dibangun selanjutnya digunakan untuk proses verifikasi, validasi, dan simulasi berbagai skenario kebijakan guna mengevaluasi dampaknya terhadap produksi bijih nikel, laju deforestasi, dan emisi karbon.

2.1.5.4. *Testing*

Testing atau pengujian model dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian antara perilaku sistem nyata dengan hasil simulasi dari model yang dikembangkan. Proses evaluasi ini meliputi dua aspek utama, yakni verifikasi dan validasi. Verifikasi model bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh prosedur teknis dalam pembangunan model telah diimplementasikan secara tepat dan bebas dari kesalahan pemrograman. Sementara itu, validasi model berfokus pada pengujian akurasi model dalam merepresentasikan sistem nyata, termasuk ketepatan asumsi, parameter, dan logika yang digunakan. Berikut adalah metode yang biasa digunakan untuk menguji kelayakan model.

1. *Boundary Adequacy Test*: Dilakukan pada tahap awal pengembangan model untuk memastikan model sudah mengandung semua elemen penting yang diperlukan untuk menjawab permasalahan yang ada.
2. *Structure Assessment*: Dilakukan sepanjang proses pembuatan model untuk memverifikasi bahwa struktur model sejalan dengan literatur, teori, dan pengetahuan praktis yang ada.
3. *Dimensional Consistency*: Dilakukan secara rutin ketika ada penambahan persamaan baru dalam model untuk memastikan bahwa semua satuan dan dimensi yang digunakan logis dan konsisten.
4. *Extreme Condition Test*: Digunakan untuk menguji model di bawah kondisi ekstrem, baik saat tahap pengembangan maupun setelah model selesai dibuat untuk memastikan bahwa output yang dihasilkan tetap logis.
5. *Behavior Reproduction Test*: Digunakan untuk menguji apakah output simulasi sesuai dan relevan dengan pemahaman dan kondisi sistem aktual

Salah satu indikator bahwa model telah mencerminkan kondisi nyata adalah kesesuaian antara nilai aktual dengan output model. Penilaian kesesuaian model terhadap kondisi nyata bisa dilakukan dengan mengukur error pada titik data tertentu. Dalam penelitian ini, validasi model dilakukan dengan menggunakan *Behavior Reproduction Test* dengan membandingkan perilaku yang dihasilkan oleh model dengan sistem yang nyata. Di mana metode yang biasa digunakan adalah metode Black Box. Metode Black Box adalah metode validasi berbasis data yang

membandingkan hasil model simulasi dengan model nyata dengan menggunakan data rata-rata (Barlas, Yaman). Berikut adalah formulanya.

a. Uji Perbandingan Rata-rata (*Mean Comparison*)

$$E_1 = |S - A| / A \dots\dots\dots (3.1)$$

Keterangan:

E_1 = Error Mean (%)

S = Nilai rata-rata hasil simulasi

A = Nilai rata-rata data aktual

Model dinyatakan valid apabila nilai $E_1 \leq 5\%$.

b. Uji Perbandingan Variasi Amplitudo (*Error Variance*)

$$E_2 = |S_s - S_a| / S_a \dots\dots\dots (3.2)$$

Keterangan:

E_2 = Error Variance (%)

S_s = Standar deviasi hasil simulasi

S_a = Standar deviasi data aktual

Model dinyatakan valid apabila nilai $E_2 \leq 30\%$.

Pemilihan metode validasi Barlas dalam penelitian ini didasari pada kesesuaiannya dengan tujuan model sebagai instrumen analisis kebijakan, bukan instrumen prediksi presisi tinggi. Barlas sendiri menegaskan bahwa validasi model sistem dinamik harus dievaluasi berdasarkan tujuan penggunaannya: model yang dirancang untuk memahami struktur sistem dan membandingkan skenario kebijakan memiliki kriteria validasi yang berbeda dari model prediktif. Oleh karena itu, threshold $E_1 \leq 5\%$ dan $E_2 \leq 30\%$ merupakan standar yang telah mapan dan banyak digunakan dalam literatur sistem dinamik berbasis kebijakan [53],[55].

2.1.5.5. Policy Formulation and Evaluation

Policy Formulation and Evaluation adalah menyusun desain kebijakan dan evaluasi. Desain kebijakan tidak hanya melibatkan penyesuaian parameter tetapi juga mencakup pengembangan strategi, penyusunan elemen, penataan struktur, serta formulasi aturan-aturan pendukung. Model yang telah dibangun selanjutnya berfungsi sebagai landasan dalam merumuskan kebijakan baru maupun mengevaluasi kebijakan yang sudah ada terkait sistem yang dimodelkan.

Perumusan kebijakan tidak terbatas pada penyesuaian nilai parameter dalam model, tetapi juga mencakup pengembangan strategi, penyusunan elemen-elemen baru, perubahan struktur hubungan antarvariabel, serta formulasi aturan atau mekanisme pendukung yang dapat memengaruhi perilaku sistem.

Dalam sistem dinamik, suatu kebijakan yang efektif umumnya dirancang dengan memperhatikan mekanisme umpan balik (*feedback mechanism*) sehingga mampu menghasilkan perubahan yang berkelanjutan terhadap kinerja sistem. Perbaikan tersebut dapat dilakukan melalui restrukturisasi sistem, optimalisasi aliran proses, pengurangan pemborosan sumber daya, pengurangan keterlambatan (*delay*), serta penyempurnaan mekanisme pengambilan keputusan yang memengaruhi dinamika sistem secara keseluruhan. Selanjutnya, setiap alternatif kebijakan yang telah dirumuskan disimulasikan menggunakan model untuk mengevaluasi dampaknya terhadap perilaku sistem dalam jangka waktu tertentu. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan kondisi dasar (*baseline*) untuk mengidentifikasi perubahan yang dihasilkan pada variabel-variabel utama

2.1. Penelitian Terdahulu

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai penelitian terdahulu untuk dikomparasikan dengan penelitian akan yang dilakukan. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang ditampilkan pada tabel 2.1. berikut:

Tabel 2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian Terdahulu 1	
Judul	<i>Navigating trade policies and sustainability: a system dynamics analysis of Indonesia's nickel supply chain.</i> [35]
Penulis	Meditya Wasesa, Taufiq Hidayat, Dinda Thalia Andariesta, Alma Kenanga Attazahri, Bima Satritama, Haidar Aji Wasesa, Zulfiadi Zulhan, Mohammad Zaki Mubarak, Utomo Sarjono Putro
Tahun Terbit	2026
Tujuan	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak kebijakan perdagangan nikel Indonesia, khususnya kebijakan larangan ekspor bijih nikel, tarif, dan royalti terhadap kinerja ekonomi dan lingkungan skala nasional.

	Studi ini berfokus pada upaya memahami <i>trade-off</i> antara peningkatan nilai tambah ekonomi melalui hilirisasi dengan konsekuensi lingkungan berupa peningkatan emisi karbon dan limbah industri.
Metode	Menggunakan sistem dinamik dengan memodelkan rantai pasok nikel di Indonesia dalam empat subsistem utama yaitu <i>supply</i> , <i>demand</i> , ekonomi, dan lingkungan.
Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebijakan larangan ekspor bijih nikel yang dikombinasikan dengan insentif fiskal mampu meningkatkan pendapatan nasional secara signifikan. Namun, kebijakan tersebut juga menyebabkan peningkatan emisi CO ₂ dan limbah padat secara drastis akibat eskalasi aktivitas pengolahan dan pemurnian nikel di dalam negeri. Temuan ini menegaskan adanya <i>trade-off</i> antara pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan dalam pengembangan industri nikel Indonesia.
Keterkaitan dengan Penelitian	Penelitian ini relevan karena menggunakan pendekatan sistem dinamik untuk menganalisis industri nikel pada tingkat nasional. Namun, fokus utama penelitian lebih menekankan pada aspek ekonomi dan kebijakan hilirisasi, sementara dampak lingkungan belum dimodelkan secara spesifik sebagai komponen utama sistem. Penelitian ini menjadi dasar metodologis dalam penggunaan sistem dinamik pada sub sistem produksi dan industri bijih nikel.
Penelitian Terdahulu 2	
Judul	<i>Scenario Analysis of Indonesian Ferronickel Supply Chain Resilience with System Dynamics</i> [36]
Penulis	I Anna Tul Munikhah, Ade Yanyan Ramdhani, Aiza Yudha Pratama, Ratih Windu Arini
Tahun Terbit	2022
Tujuan	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak kebijakan pemerintah Indonesia, khususnya larangan ekspor bijih nikel dan kebijakan hilirisasi, terhadap ketahanan rantai pasok industri feronikel di Indonesia. Dengan fokus utama penelitian agar bagaimana rantai pasok mampu bertahan, beradaptasi, dan pulih terhadap gangguan kebijakan.
Metode	Menggunakan pendekatan sistem dinamik untuk memodelkan sistem rantai pasok feronikel.

Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebijakan larangan ekspor bijih nikel tanpa kesiapan kapasitas hilirisasi menyebabkan peningkatan <i>backlog</i> permintaan dan penumpukan persediaan bijih nikel domestik. Selain itu, terdapat temuan pada dampak lingkungan bahwa peningkatan produksi bijih nikel akibat kebijakan larangan ekspor menimbulkan emisi karbon dan limbah padat (<i>slag</i>) secara signifikan meningkat.
Keterkaitan dengan Penelitian	Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas produksi dan pengolahan nikel berimplikasi terhadap emisi dan limbah industri. Keterkaitannya dengan penelitian ini terletak pada pengakuan adanya hubungan antara aktivitas produksi dan dampak lingkungan. Namun, penelitian tersebut belum memodelkan hubungan tersebut secara dinamis dan masih terfokus pada rantai pasok produk feronikel sebagai bahan dasar baterai <i>electric vehicle</i> .
Penelitian Terdahulu 3	
Judul	<i>Sustainable Management Model of Construction Minerals Mine Using a System Dynamics Approach</i> [58]
Penulis	Aryanti Virtanti Anas, Rini Novrianti Sutardjo Tui, Rizki Amalia, Hijir Ismail Adnin Rasyad, Angelie Santosa
Tahun Terbit	2024
Tujuan	Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model pengelolaan tambang mineral konstruksi yang berkelanjutan yang berfokus pada upaya memahami keterkaitan antar dimensi keberlanjutan serta dampaknya terhadap tingkat keberlanjutan pengelolaan tambang mineral konstruksi di kawasan Sungai Jeneberang, Sulawesi Selatan.
Metode	Menggunakan pendekatan sistem dinamik dan dikombinasikan dengan penilaian berbasis indikator keberlanjutan lingkungan.
Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanpa perbaikan pengelolaan wilayah konstruksi tambang mineral, indeks keberlanjutan cenderung menurun pada seluruh dimensi. Hasil skenario menunjukkan bahwa kondisi tidak berkelanjutan menegaskan pentingnya pengelolaan tambang mineral berbasis pendekatan sistem dan kolaborasi antar pemangku kepentingan sangat diperlukan guna mengurangi dampak negatif berlebih pada wilayah tersebut.

Keterkaitan dengan Penelitian	Penelitian ini memiliki keterkaitan dalam penggunaan sistem dinamik untuk menganalisis dampak lingkungan pertambangan. Namun, penelitian dilakukan pada konteks komoditas dan wilayah yang berbeda yakni pada produksi bahan mineral dan berada pada level regional. Oleh karena itu, penelitian ini berfungsi sebagai referensi konseptual terkait pemodelan dampak lingkungan serta skenario yang dilakukan dalam mendukung keberlanjutan pada wilayah produksi pertambangan.
Penelitian Terdahulu 4	
Judul	<i>Dynamics of land transformation and carbon stock loss from nickel laterite open-pit mining in Indonesia[59]</i>
Penulis	Ratu Keni Atika, Tim Werner, dan Kazuyo Matsubae
Tahun Terbit	2026
Tujuan	Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi dampak spasial dan temporal dari aktivitas penambangan nikel terhadap perubahan tutupan lahan dan hilangnya stok karbon biomassa di Indonesia. Secara spesifik, studi ini berupaya mengestimasi jumlah karbon yang hilang akibat tambang terbuka nikel laterit, memetakan lokasi dan waktu hilangnya karbon tersebut, serta menganalisis implikasi pola spasial ini terhadap tata kelola dan kepatuhan regulasi.
Metode	Penelitian ini mengombinasikan analisis citra satelit dengan dataset nasional. Pemetaan tutupan lahan dilakukan menggunakan <i>supervised machine learning random forest</i> pada <i>Google Earth Engine</i> yang memproses data citra <i>Landsat 8 Surface Reflectance</i> . Hasil klasifikasi spasial ini kemudian digabungkan dengan data stok karbon biomassa dari <i>Forest Reference Emission Level (FREL)</i> nasional. Analisis ini difokuskan pada 217 area konsesi penambangan nikel di Indonesia dari rentang waktu 2013 hingga 2022
Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan aktivitas penambangan nikel memicu 53% transformasi lahan hutan di dalam area konsesi penambangan antara tahun 2013 hingga 2022. Pada tahun 2022, penggunaan lahan untuk penambangan nikel menghasilkan emisi sekitar 6,9 juta tCO ₂ angka yang naik lebih dari dua kali lipat dibandingkan emisi pada tahun 2013. Selama pemberlakuan larangan ekspor bijih nikel (2014), tingkat produksi nikel turun drastis, tetapi luas area tambang tetap tidak berubah. Hal ini mengakibatkan peningkatan signifikan pada rasio kehilangan karbon per ton bijih nikel yang diproduksi pada periode tersebut.

Keterkaitan dengan Penelitian	Penelitian ini relevan dalam konteks penggunaan model pengembangan pada sub sistem deforestasi, dimana digunakan sebagai landasan data historis dan empiris mengenai dinamika produksi industri nikel di Indonesia dan dampaknya pada perubahan tutupan lahan vegetasi hutan dengan emisi karbon yang dihasilkan. Penelitian ini berguna dalam penyusunan rumus <i>equation</i> di tiap variabel lingkungan dan menggunakan data yang diperoleh sebagai <i>baseline</i> dan validasi model yang digunakan.
Penelitian Terdahulu 5	
Judul	<i>Systematic Dynamics Modeling of The Global Nickel Supply System At A Mine Level Resolution: Toward Prospective Dynamic Critically and Resilience Data.</i> [18]
Penulis	Jessie E. Bradley, Willem L. Auping, René Kleijn, Jan H. Kwakkel, Gavin M. Mudd, dan Benjamin Sprecher
Tahun Terbit	2025
Tujuan	Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi proyeksi pengembangan serta ketahanan sistem pasokan nikel global dari tahun 2015 hingga 2060 dalam menghadapi berbagai ketidakpastian dan intervensi kebijakan (<i>policy levers</i>). Secara khusus, studi ini berupaya menganalisis efek penggabungan <i>feedback loops</i> (lingkar umpan balik) dengan disagregasi sektoral dan geografis terhadap kekritisian pasokan nikel
Metode	Penelitian ini mengintegrasikan pemodelan <i>System Dynamics</i> (SD) dengan metode ekologi industri seperti <i>Material Flow Analysis</i> (MFA) dan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA). Model ini dibangun menggunakan resolusi data yang sangat detail hingga ke tingkat tambang individu (<i>mine-level resolution</i>). Untuk menguji ketidakpastian di masa depan, penelitian ini menggunakan metode <i>Exploratory Modeling and Analysis</i> (EMA) yang menjalankan 1.000 simulasi model dari tahun 2015 hingga 2060 untuk mengevaluasi 27 variabel ketidakpastian eksogen dan intervensi kebijakan.
Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan penggabungan efek umpan balik pasar, seperti respons harga terhadap permintaan dan kegiatan eksplorasi, menghasilkan proyeksi penipisan sumber daya dan dinamika permintaan yang jauh lebih realistis dibandingkan model aliran material tradisional. Umpan balik pasar (<i>market feedback</i>) terbukti mampu meningkatkan ketahanan sistem pasokan nikel, meskipun

	tidak dapat sepenuhnya menghilangkan risiko kekritisan pasokan akibat lonjakan permintaan. Berikutnya, analisis disagregasi sektoral memperlihatkan bahwa transisi energi meningkatkan risiko kekritisan pasokan, namun hal ini dapat dimitigasi melalui peningkatan substitusi material, perpanjangan umur produk, ekspansi kapasitas, dan peningkatan daur ulang. Penelitian ini juga menggambarkan fluktuasi dinamika dan perubahan pangsa pasar antar regional terhasil hasil produksi (<i>ore grade</i>) global, serta total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh industri.
Keterkaitan dengan Penelitian	Penelitian ini memberikan referensi kerangka metodologis yang sangat kuat untuk pengembangan model <i>System Dynamics</i> pada industri pertambangan nikel. Pendekatan jurnal ini dalam menyimulasikan berbagai skenario kebijakan (<i>policy levers</i>) dan mengevaluasi umpan balik (<i>feedback loops</i>) dari variabel kapasitas penambangan, fluktuasi permintaan, dan <i>output</i> yang dihasilkan berupa emisi gas rumah kaca pada proses produksi level penambangan sangat relevan untuk diadopsi ke dalam simulasi yang mengkaji dampak produksi bijih nikel terhadap lingkungan khususnya pada emisi karbon dan deforestasi.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Wasesa et al. [35] dan Munikhah et al. [36] yang sama-sama menggunakan pendekatan sistem dinamik pada industri nikel Indonesia, disimpulkan bahwa kebijakan larangan ekspor bijih nikel dan hilirisasi mampu meningkatkan kinerja ekonomi dan ketahanan rantai pasok, namun secara simultan menimbulkan peningkatan signifikan terhadap emisi karbon dan limbah padat akibat eskalasi aktivitas produksi dan pengolahan. Meskipun kedua penelitian tersebut telah mengidentifikasi adanya *trade-off* antara pertumbuhan ekonomi dan dampak lingkungan, pemodelan lingkungan masih bersifat agregat dan belum diposisikan sebagai subsistem utama yang dianalisis secara mendalam dalam dinamika jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian ini diperlukan untuk mengembangkan model sistem dinamik yang lebih komprehensif dengan menempatkan dampak lingkungan khususnya emisi karbon dan degradasi lahan hutan sebagai komponen inti sistem, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih seimbang antara aspek ekonomi, produksi, dan keberlanjutan lingkungan.

Terdapat pula penelitian oleh Anas et al. [58] yang menunjukkan bahwa penerapan skenario pengelolaan tambang berkelanjutan, seperti peningkatan laju reklamasi lahan, mampu menghasilkan kinerja sistem yang lebih stabil dibandingkan skenario pertumbuhan ekonomi tinggi tanpa pengelolaan lingkungan. Namun, penelitian tersebut masih berfokus pada mineral konstruksi dan dampak terhadap lahan, serta belum secara spesifik mengkaji industri nikel dan dinamika emisi serta limbah industri dalam konteks kebijakan nasional.

Selain itu, pada penelitian yang dilakukan oleh Atika et al. [59] yang menganalisis dampak spasial dan empiris industri nikel (*mine-level*) di Indonesia dengan hilangnya tutupan hutan (deforestasi) dan stok karbon biomassa menggunakan metode *machine learning random forest*, menunjukkan bahwa terdapat keterkaitan dan rumus matematis dalam proses peningkatan deforestasi dan emisi karbon yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian tersebut, peneliti menilai terdapat peluang apabila dilakukan metode sistem dinamik untuk memodelkan dalam jangka panjang dari dinamika produksi dan dampak lingkungan yang dihasilkan.

Kemudian, terdapat juga penelitian oleh Bradley et al. [18] yang menunjukkan bahwa model sistem dinamik dapat diimplementasikan pada studi kasus *supply system* industri nikel secara global dengan dampak yang dihasilkan, termasuk emisi karbon total yang dihasilkan dari industri nikel global ini, yang kemudian berhasil mendesain skenario bermacam kebijakan untuk menganalisis berkelanjutan di industri nikel. Dengan demikian, terdapat celah penelitian untuk mengintegrasikan pendekatan pemodelan sistem dinamik pada industri bijih nikel dengan skenario kebijakan dan solusi lingkungan yang terukur, guna merumuskan strategi pengurangan dampak lingkungan dalam jangka waktu 15 tahun ke depan tanpa mengorbankan keberlanjutan industri dan pemenuhan kebutuhan nasional.