

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim telah menjadi salah satu tantangan paling serius yang dihadapi umat manusia saat ini. Perubahan iklim menimbulkan masalah lingkungan yang signifikan, masalah pembangunan ekonomi dan masalah sosial (Ghaffari dkk., 2022). Salah satu penyebab perubahan iklim adalah emisi gas rumah kaca (GRK). Emisi GRK telah meningkat secara signifikan sejak revolusi industri. Menurut data yang tersedia, jumlah emisi GRK pada tahun 2017 kira-kira dua kali lipat dari emisi yang diperkirakan pada tahun 1970 (Zhang dkk., 2020).

Sektor energi merupakan salah satu contributor terbesar emisi GRK di dunia. Berdasarkan *Nationally Determined Contribution* (NDC) pertama Republik Indonesia, sektor LUCF (termasuk kebakaran gambut) menyumbang 47,8% emisi, sementara sektor energi menyumbang 34,9%. Sektor energi dalam konteks perubahan iklim adalah aktivitas yang menghasilkan emisi GRK yang terkait dengan penggunaan energi dan rangkaian aktivitas penyediaan energi yang terdiri atas dua kelompok, yaitu aktivitas penggunaan energi berupa pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan emisi GRK (penggunaan BBM transportasi, memasak, boiler industri dll.) dan aktivitas yang tidak secara langsung menghasilkan emisi GRK (penggunaan peralatan listrik yang listriknya dipasok pembangkit berbahan bakar fosil) (*Roadmap NDC*, 2019).

Sektor energi dan transportasi mendominasi emisi dengan persentase sebesar 50,6% (potensi sebesar 1 Giga Ton CO₂eq) dari total emisi di Indonesia pada tahun 2022. Potensi emisi akan terus meningkat hingga di tahun 2030, dimana persentase emisi dari sektor energi diprediksi akan menyentuh angka 1,4 Giga Ton CO₂eq (59%) (Bappenas, 2024). *Institute for Essential Services Reform* (IESR) menyebut sektor ketenagalistrikan menyumbang 40 persen dari emisi gas rumah kaca di Indonesia, dari emisi di sektor energi yang mencapai 600 juta ton, 40 persen nya berasal dari sektor ketenagalistrikan (CNN, 2022). Selain sektor energi, sektor lain yang menyumbang emisi gas rumah kaca adalah transportasi sebanyak 25 persen, industri 20 persen, bangunan atau konstruksi 5 persen, dan sektor lainnya 10 persen (CNN, 2022).

Laporan Badan Energi Internasional menyatakan bahwa sekitar 30% energi yang dikonsumsi secara global berasal dari sektor bangunan (IEA, 2022). Pada bangunan komersial, pemanasan, ventilasi dan pendingin udara biasanya menyumbang sebagian besar energi operasional dan emisi GRK (Gonzales dkk., 2022). Emisi tidak langsung merupakan bagian yang cukup besar dari total emisi GRK (37%), dan faktor emisi listrik akan menjadi bagian terbesar dari emisi tidak langsung (43%) pada tahun 2031 (Hosseini, 2024).

Pengoperasian gedung menyumbang 26% emisi gas rumah kaca (GRK) global, oleh karena itu, pengurangan penggunaan energi dan emisi terkait gedung penting dilakukan untuk memitigasi perubahan iklim (IEA, 2022). Berdasarkan pernyataan IPCC 2006, terjadi peningkatan suhu bumi sebesar 0,6°C. Diperkirakan sampai dengan tahun 2100, peningkatan suhu terus terjadi dengan rata-rata sebesar 0,1°C - 0,2°C/ 10 tahun selama 50 tahun kedepan apabila tidak ada upaya mitigasi oleh berbagai sektor (IPCC, 2006). *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menyatakan Indonesia sebagai negara berkembang perlu berkontribusi dalam penurunan emisi GRK yang berkisar antara 15% dan 30% dari skenario *Business as Usual* (BAU) (KLH, 2006; Bappenas, 2011). Upaya mitigasi tersebut dibutuhkan untuk membatasi peningkatan suhu global lebih kecil dari 2°C di bawah tingkat era praindustri (KLH, 2006; Bappenas, 2011). Target mitigasi perubahan iklim dengan pengurangan emisi GRK Indonesia di tahun 2030 adalah sebesar 29% dengan kemampuan sendiri (*unconditional*) sampai 41% dengan bantuan internasional (*conditional*) (KLHK, 2021).

Mitigasi perubahan iklim mencakup berbagai upaya untuk mengendalikan emisi GRK, termasuk kegiatan inventarisasi GRK. Inventarisasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat, status, dan tren emisi dari berbagai sumber secara berkala (KLHK, 2017). Dengan data inventarisasi, strategi mitigasi dapat dirancang untuk mendukung pengurangan emisi GRK yang efektif. Dalam penelitian ini, beberapa skenario mitigasi perubahan iklim akan dianalisis untuk mengurangi emisi GRK di sektor ketenagalistrikan, mendukung pencapaian *Net Zero Emission* pada tahun 2060 di Indonesia.

1.2 Rumusan Permasalahan

Rumusan masalah yang terdapat dalam penelitian ini yaitu:

1. Berapa total emisi GRK dari Sektor Ketenagalistrikan Bidang Distribusi?
2. Bagaimana pemodelan hubungan antara kegiatan/ aktivitas di sektor ketenagalistrikan terhadap total emisi GRK?
3. Bagaimana pemodelan total emisi GRK terhadap skenario mitigasi perubahan iklim di sektor ketenagalistrikan bidang distribusi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menghitung total emisi GRK sektor ketenagalistrikan bidang distribusi
2. Menganalisis hubungan antara data aktivitas terhadap total emisi GRK
3. Menganalisis pemodelan skenario mitigasi perubahan iklim terhadap total emisi GRK di sektor ketenagalistrikan bidang distribusi

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Tersedianya profil tingkat emisi GRK sektor ketenagalistrikan bidang distribusi
2. Menjadi acuan bagi sektor ketenagalistrikan bidang distribusi di unit lain yang akan melakukan inventarisasi emisi GRK serta penentuan strategi mitigasi untuk sektor ketenagalistrikan
3. Sebagai masukan dan bahan pertimbangan kepada manajemen dalam pembuatan kebijakan pengurangan emisi GRK dan upaya penanggulangan perubahan iklim.

1.5 Ruang Lingkup

Batasan-batasan yang menjadi ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

1. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang diinventarisasi dibatasi pada emisi CO₂, CH₄ dan N₂O dan akan dikonversi ke dalam satuan ton-CO₂e dengan menggunakan IPCC GWP
2. Kegiatan inventarisasi emisi dilaksanakan di Sektor Ketenagalistrikan Bidang Distribusi kegiatan perkantoran, pemeliharaan jaringan listrik, pelayanan pelanggan dan operasional pembangkit
3. Data yang digunakan merupakan data 3 (tiga) tahun terakhir 2022-2024
4. Pemodelan dilakukan untuk mengetahui sebab akibat hasil inventarisasi emisi terhadap total emisi GRK serta analisis pengaruh skenario mitigasi perubahan iklim.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perubahan Iklim

Iklim Bumi dipengaruhi oleh berbagai faktor pengendali yang bekerja pada rentang waktu yang berbeda-beda, sehingga memicu variasi perubahan iklim pada beragam skala geografis dan periode geologi. Distribusi dan perpindahan panas di planet ini berlangsung melalui sistem iklim global yang mencakup atmosfer, lautan, lapisan es, biosfer (seluruh organisme hidup), serta komponen litosfer berupa tanah, sedimen, dan batuan. Sistem iklim tersebut tersusun atas sejumlah subsistem yang saling berinteraksi melalui berbagai proses fisik, kimia, dan biologis. Kompleksitas interaksi antar subsistem ini menghasilkan fenomena iklim yang bersifat dinamis dan tidak beraturan, seperti El Nino dan Osilasi Atlantik Utara. Atmosfer merupakan selubung gas yang relatif tipis dan kepadatannya menurun dengan cepat seiring bertambahnya ketinggian tanpa batas atas yang jelas. Sekitar 80% massa atmosfer berada pada ketinggian kurang dari 10 km dari permukaan Bumi. Jika dibandingkan dengan jari-jari Bumi yang mencapai sekitar 6.370 km, ketebalan atmosfer hanya sekitar seperenam persen. Meskipun demikian, atmosfer memiliki peran yang sangat vital sebagai lapisan multifungsi yang tersusun atas berbagai jenis gas dengan komposisi yang bervariasi antar wilayah dan fungsi yang berbeda. Secara umum, atmosfer didominasi oleh nitrogen (78%) dan oksigen (21%), serta mengandung gas lain dalam jumlah lebih kecil, seperti uap air, karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), neon (Ne), oksida nitrogen, metana (CH₄), kripton (Kr), dan ozon (O₃) (UNESCO, 2013).

Perubahan iklim menimbulkan tantangan yang signifikan terhadap ketahanan sistem energi di seluruh dunia, meningkatkan ketidakpastian mengenai pasokan bahan bakar dan sumber daya yang andal, serta meningkatkan kemungkinan gangguan yang disebabkan oleh iklim (IEA, 2022). Meningkatnya suhu permukaan rata-rata global, yang merupakan suhu rata-rata di permukaan daratan dan lautan, merupakan dampak utama dari perubahan iklim. Selain dampak langsung seperti musim panas yang lebih panas, kenaikan suhu memengaruhi curah hujan, angin, dan kenaikan permukaan laut (yang dibahas dalam bagian di bawah), yang semuanya memengaruhi frekuensi, intensitas, tingkat, dan durasi cuaca ekstrem serta peristiwa iklim. (IEA, 2022)

Perubahan iklim adalah fenomena perubahan pola cuaca jangka panjang yang disebabkan oleh peningkatan suhu global akibat konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. Perubahan ini dipengaruhi oleh faktor alami dan aktivitas manusia. Aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil untuk pembangkit listrik, transportasi, dan industri, menjadi penyebab utama peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan nitrogen oksida (N₂O) (IPCC, 2021). Dampak

perubahan iklim sangat luas dan signifikan, mencakup berbagai aspek kehidupan manusia dan lingkungan. Perubahan iklim berdampak terhadap gelombang panas ekstrem, peningkatan frekuensi bencana alam seperti banjir dan kekeringan, serta perubahan pola curah hujan menyebabkan gangguan pada sektor pertanian, perikanan, dan infrastruktur. Selain itu, keanekaragaman hayati menghadapi ancaman serius akibat pergeseran habitat dan degradasi ekosistem (IPCC, 2022). Perubahan iklim diakui sebagai tantangan global yang membutuhkan upaya kolektif dari semua negara untuk membatasi dampak buruknya. Perjanjian Paris menargetkan pengendalian kenaikan suhu global hingga di bawah 2°C, dengan upaya untuk membatasinya hingga 1,5°C dibandingkan masa pra-industri. Untuk mencapainya, negara-negara peserta berkomitmen menyampaikan kontribusi nasional yang ditentukan (NDC) secara berkala, yang harus diperbarui setiap lima tahun dengan target yang lebih ambisius (UNFCCC, 2015). Hujan lebat dan banjir diperkirakan akan semakin parah dan menjadi lebih sering terjadi di sebagian besar wilayah di Eropa, Amerika Utara, Afrika, dan Asia. Intensitas dan frekuensi hujan lebat akan meningkat dengan setiap derajat pemanasan global tambahan, yang dikombinasikan dengan artifisialisasi tanah dan kedap air akibat aktivitas manusia, akan meningkatkan risiko dan biaya sosial banjir lokal (IEA, 2022).

2.2 Mitigasi Perubahan Iklim

Menurut UNFCCC (2005) mitigasi diartikan sebagai upaya-upaya untuk mencegah, menahan pelepasan karbon, meningkatkan penyerapan karbon ke hutan atau penyerap karbon lainnya, dan memperlambat efek GRK yang menjadi penyebab pemanasan global. Mitigasi perubahan iklim adalah tindakan yang diambil untuk mengurangi atau mencegah emisi gas rumah kaca (GRK) ke atmosfer dengan tujuan menahan laju perubahan iklim. Tindakan ini mencakup upaya mengurangi emisi dari sumber utama (seperti pembakaran bahan bakar fosil) dan meningkatkan serapan karbon melalui solusi alami atau teknologi (IPCC, 2014). Sedangkan menurut Slamet (2015), mitigasi adalah usaha menekan penyebab perubahan iklim, seperti GRK dan lainnya agar resiko terjadinya perubahan iklim dapat diminimalisir atau dicegah. Strategi mitigasi perubahan iklim dapat dibagi menjadi dua strategi utama yaitu reduksi emisi langsung diantaranya mengurangi emisi dari sektor energi, transportasi, industri, dan pertanian dan peningkatan serapan karbon melalui reforestasi, restorasi lahan gambut, dan pengelolaan hutan secara berkelanjutan.

Sejumlah kerangka kebijakan internasional telah dikembangkan untuk mendukung mitigasi perubahan iklim, diantaranya *Protokol Kyoto* (1997) menetapkan target pengurangan emisi untuk negara maju, *Paris Agreement* (2015) bertujuan membatasi kenaikan suhu global hingga di bawah 2°C, dengan target ideal 1,5°C dan *Sustainable Development Goals* (SDGs) Tujuan ke-13 (*Climate Action*) fokus pada mitigasi perubahan iklim (UNFCCC, 2015). Upaya Pemerintah dalam memfasilitasi mitigasi penurunan emisi GRK melalui Rencana Aksi Nasional

Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca RAN-GRK yang ditindaklanjuti oleh provinsi di seluruh Indonesia dengan menyusun Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca RAD-GRK. Strategi mitigasi dapat didefinisikan untuk memenuhi target pengurangan emisi tertentu dan menilai dampak potensial dari kebijakan atau teknologi tertentu. Analisis strategi mitigasi sangat penting untuk menghitung biaya keseluruhan dan dampak emisi secara akurat, karena dampak pengurangan emisi dapat terjadi karena melaksanakan opsi tertentu yang tergantung pada opsi lainnya. Contohnya, tingkat pengurangan dalam emisi GRK yang diasosiasikan dengan opsi yang menghemat listrik tergantung pada sumber listrik yang akan dihindari (contoh: batu bara, minyak, hidro, atau campuran) (Bappenas, 2011). Peran sektor dalam mitigasi perubahan iklim diantaranya sektor energi dimana Emisi CO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil adalah penyumbang terbesar perubahan iklim serta transisi ke energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin merupakan solusi kunci, sektor transportasi dimana transportasi menyumbang sekitar 14% dari emisi GRK global (IPCC, 2014) dan elektrifikasi kendaraan serta penggunaan bahan bakar rendah karbon berkontribusi pada pengurangan emisi, serta sektor kehutanan dan penggunaan lahan dimana kehutanan adalah penyerap karbon alami, namun deforestasi mengubahnya menjadi sumber emisi, dengan melaksanakan reforestasi dan pengelolaan lahan yang baik dapat meningkatkan kapasitas penyerapan karbon.

Secara garis besar berdasarkan RAN-GRK strategi penurunan emisi GRK tersebut akan dilakukan melalui (Bappenas, 2011):

- a. Pengelolaan lahan gambut secara lestari.
- b. Pengurangan laju deforestasi dan degradasi hutan.
- c. Pengembangan penyerapan karbon di sektor kehutanan dan pertanian.
- d. Pengurangan limbah padat dan cair.
- e. Mendorong efisiensi energi dan penggunaan teknologi rendah karbon.
- f. Pengembangan alternatif sumber energi terbarukan.
- g. Perubahan menuju moda transportasi rendah emisi.

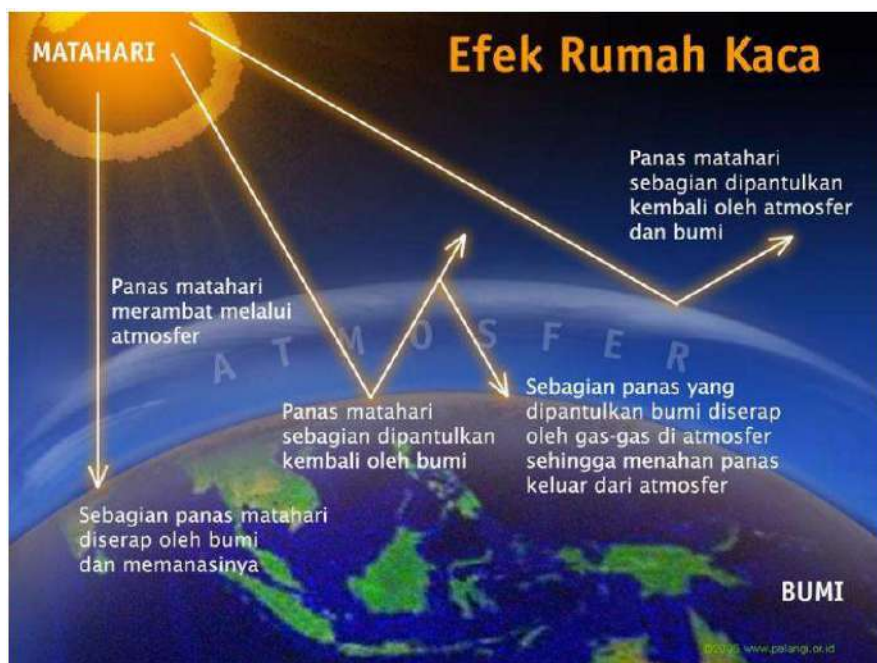
2.3 Gas Rumah Kaca (GRK)

Gas rumah kaca atau yang biasa disingkat menjadi GRK merupakan gas yang terakumulasi di atmosfer dan berfungsi menangkap lalu memancarkan kembali sinar infra merah yang berasal dari matahari. Gas rumah kaca merupakan penyebab terjadinya pemanasan global yang berdampak pada perubahan iklim, sehingga seluruh dunia bergerak untuk saling bekerja sama dalam mengatasinya (Husna dkk, 2022). Istilah GRK merupakan fungsi dari atmosfer bumi yang digambarkan seperti kaca pada bangunan rumah kaca dalam praktek budidaya tanaman. Atmosfir melewati cahaya matahari hingga mencapai dan menghangatkan permukaan bumi sehingga memungkinkan untuk ditinggali makhluk hidup. Hal tersebut terjadi karena adanya gas-gas di atmosfer yang mampu menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah, sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 1. Gas -

gas tersebut disebut sebagai GRK karena sifatnya yang sama seperti rumah kaca (KLH, 2012).

Adapun Indonesia menunjukkan komitmennya dalam upaya mengatasi perubahan iklim dengan adanya Undang-Undang Nomor 16 tahun 2016 yang mengesahkan *Paris Agreement to the United Nation Framework Convention on Climate Change*. Dari perjanjian ini, Indonesia bersama negara lainnya berkomitmen untuk menjaga kenaikan suhu global di bawah 2°C dan mendukung upaya untuk membatasi kenaikan suhu ke $1,5^{\circ}\text{C}$ di atas tingkat pra-industrialisasi. Sehingga pada tahun 2030 Indonesia menargetkan penurunan emisi sebesar 29% dengan upaya sendiri dan menjadi 41% jika bekerja sama dengan internasional, dimana angka ini berdasarkan skenario *Business as Usual* (BAU) (Husna dkk, 2022).

Menurut UNFCCC (2005) ada enam jenis GRK yaitu: CO_2 (karbon dioksida), CH_4 (metana), N_2O (nitrous oxide), HFCs (hidrofluorokarbon), PFCs (perfluorokarbon) dan SF_6 (sulfur heksafluorida). Kekuatan daya rusak untuk setiap gas dan sumber emisinya di tunjukkan pada Tabel 1 Satuan yang digunakan untuk menunjukkan besarnya pengurangan emisi adalah t- CO_2 , sehingga jika kita mengurangi 1 ton dari GRK yang lain (selain CO_2), maka hasilnya dikalikan dengan daya kekuatannya dibandingkan CO_2 . Emisi CO_2 merupakan bagian terbesar dari emisi GRK yang ada.



Gambar 1 Efek Rumah Kaca dan Pemanasan Bumi

Tabel 1 Sumber Emisi GRK dan Kekuatan Daya Rusak

Jenis	Kekuatan	Potensi Daya Rusak (100 tahun) Sumber Emisi
CO₂	1	- Pembakaran bahan bakar fosil untuk pembangkit energi - Pembuatan batu kapur semen
CH₄	21	- Fermentasi anaerobic di TPA Sampah - Pengolahan anaerobik limbah organik cair, kotoran ternak dan lain-lain
N₂O	310	- Industri asam nitrat - Proses pencernaan kotoran ternak
HFCs	140 – 11.700	- Produksi HCFC-22 - Kebocoran dari media pendingin pada kulkas dan AC
PFCs	6.500 – 9.200	- Penggunaan bahan etching dalam proses produksi semi konduktor - Penggunaan bahan fluxing pada proses pembersihan metal
SF₆	23.900	- Penggunaan penutup gas dalam proses pencairan magnesium - Penggunaan dalam proses produksi bahan semi konduktor

Sumber : UNFCCC (2005)

Sifat radiatif Gas Rumah Kaca dinyatakan dalam *Global Warming Potential* (GWP). GWP ini merupakan pemanasan yang ditimbulkan dari sejumlah gas yang dilepaskan ke atmosfer, dibandingkan dengan pemanasan dalam jumlah yang sama dari CO₂ selama periode waktu tertentu. GWP merepresentasikan sifat radiative molekul dan waktu tinggalnya di atmosfer. GWP untuk CO₂ dengan demikian menurut definisi sama dengan 1 (Metz, 2010). Metriks emisi GRK digunakan untuk menyatakan emisi dari GRK yang berbeda dalam satuan unit yang sama. Biasanya emisi GRK dinyatakan dalam CO₂-equivalent (CO₂-eq) menggunakan nilai GWP dengan kurun waktu 100 tahun (GWP100). Pemilihan metriks bergantung kepada tujuan analisis dan seluruh metriks emisi GRK memiliki keterbatasan dan nilai ketidakpastian. Nilai GWP untuk Gas Rumah Kaca utama yang terbaru ditunjukkan dalam tabel berikut ini :

Tabel 2 Nilai GWP

Common chemical name or industrial designation	Chemical formula	GWP values for 100-year time horizon		
		Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)	Sixth Assessment Report (AR6)
Major Greenhouse Gases				
Carbon dioxide	CO ₂	1	1	1
Methane – non-fossil	CH ₄	25	28	27.0
Methane – fossil	CH ₄	N/A	30	29.8
Nitrous oxide	N ₂ O	298	265	273
Nitrogen trifluoride	NF ₃	17,200	16,100	17,400
Sulfur hexafluoride	SF ₆	22,800	23,500	24,300

Sumber : IPCC, 2024

2.4 Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca

Inventarisasi emisi merupakan kumpulan informasi secara kuantitas tentang pencemaran udara dari keseluruhan sumber yang berada pada suatu wilayah geografis selama periode waktu tertentu. Inventarisasi emisi menyediakan informasi dari semua sumber emisi beserta lokasi, ukuran, frekuensi, durasi waktu, serta kontribusi relatif emisi. Inventarisasi emisi tersebut nantinya dapat digunakan sebagai dasar acuan untuk tindakan pencegahan terhadap pencemaran udara pada masa yang akan datang serta membantu dalam menganalisa aktivitas yang berperan dalam peningkatan pencemaran di area geografis dalam studi yang dilakukan (Canter, 1996).

Menurut Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 71 Tahun 2011 tentang Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Pasal 1 menyebutkan bahwa inventarisasi GRK adalah kegiatan untuk memperoleh data dan informasi mengenai tingkat, status, dan kecenderungan perubahan emisi GRK secara berkala dari berbagai sumber emisi (source) dan penyerapannya (sink) termasuk simpanan karbon (*carbon stock*). Selain itu, menurut KLH (2012) inventarisasi emisi bermanfaat untuk:

1. Mengukur beban pencemaran udara.
2. Mengukur perkembangan atau perubahan kualitas udara.
3. Sebagai data dasar untuk perencanaan/pengelolaan udara yang lebih bersih.
4. Untuk keperluan pembuatan peraturan perundangan di bidang lingkungan.
5. Sebagai data dasar untuk pemodelan kualitas udara khususnya model dispersi udara.
6. Terkait dengan long-range transport, studi inventarisasi emisi bermanfaat untuk memahami penyebaran pencemar udara yang melewati batasan wilayah (transboundary).

Inventarisasi emisi menyajikan perhitungan kuantitas suatu kontaminan yang diemisikan oleh sumber tertentu dan dikombinasikan dengan emisi yang berasal dari sumber lainnya. Metodologi dasar dari inventarisasi emisi menggunakan rata-rata emisi untuk setiap aktivitas yang didasarkan pada kuantitas penggunaan material seperti bahan bakar. Penting untuk diperhatikan bahwa inventarisasi emisi menampilkan perhitungan rata-rata emisi dalam periode waktu tertentu dan tidak mengindikasikan emisi yang aktual dalam satuan hari (Wilton, 2001).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) merupakan organisasi independen yang dibentuk oleh PBB pada tahun 1998. Organisasi ini melakukan survei secara ilmiah dan teknis terkait dengan perubahan iklim di seluruh dunia. Pedoman IPCC memberikan metodologi untuk memperkirakan emisi antropogenik level nasional baik dari sumber dan penyerapan oleh GRK (Lundie *et al.*, 2009). Pedoman yang digunakan untuk menyusun inventarisasi emisi GRK di Indonesia ialah *Revised 1996 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Selain itu juga dilengkapi dengan dua pedoman lainnya yaitu *IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* tahun 2000 dan *the Good Practice Guidance on Land Use, Land-Use Change and Forestry* (GPG for LULUCF) tahun 2003. Sejalan dengan perkembangan pengetahuan tentang inventarisasi emisi GRK, IPCC kemudian menyusun pedoman inventarisasi emisi GRK baru pada tahun 2006 yang sudah memperbaiki dan mengakomodasi metode yang disusun di ketiga pedoman sebelumnya yaitu 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* yang terdiri dari lima volume (KLH, 2012).

Menurut IPCC (2006) ketelitian untuk estimasi emisi GRK dikelompokkan dalam tiga tingkat ketelitian. Dalam kegiatan inventarisasi emisi GRK, tingkat ketelitian dikenal dengan istilah “Tier”. Tier untuk estimasi emisi GRK yakni:

- Tier 1 : Estimasi berdasarkan data aktivitas dan faktor emisi *default* IPCC
- Tier 2 : Estimasi berdasarkan data aktivitas yang lebih akurat dan faktor emisi *default* IPCC atau faktor emisi suatu negara atau suatu pabrik
- Tier 3 : Estimasi berdasarkan metode spesifik suatu negara dengan data aktivitas yang lebih akurat (pengukuran langsung) dan faktor emisi spesifik suatu negara atau suatu pabrik

Secara umum, emisi GRK merupakan perkalian antara data aktivitas (konsumsi bahan bakar) dengan faktor emisi bahan bakar, dengan rumus sebagai berikut :

$$E = DA \times FE$$

dimana :

- E : Emisi GRK (ton)
- DA : Data aktivitas (TJ)
- FE : Faktor Emisi (ton/TJ)

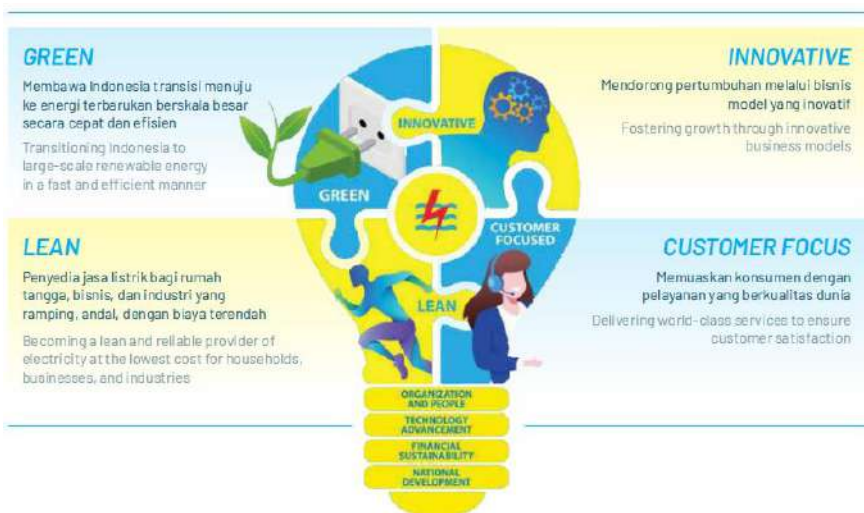
Faktor emisi telah lama dijadikan alat fundamental dalam mengembangkan inventarisasi emisi nasional, regional, negara bagian, dan lokal untuk pengambilan keputusan manajemen kualitas udara dan dalam mengembangkan strategi pengendalian emisi. Baru-baru ini, faktor emisi telah diterapkan dalam menentukan

penerapan lokasi dan batasan emisi spesifik dalam izin operasi oleh lembaga federal, negara bagian, lokal, dan suku, konsultan, dan industri. Faktor emisi digunakan untuk memperkirakan emisi polutan udara dari proses atau aktivitas yang beroperasi secara normal (misalnya, pembakaran bahan bakar, produksi bahan kimia, dan lainnya). Faktor emisi berhubungan dengan kuantitas polutan yang dilepaskan ke atmosfer dari suatu proses ke aktivitas tertentu yang terkait dengan menghasilkan emisi tersebut. Untuk sebagian besar tujuan aplikasi, pengguna biasanya mengasumsikan bahwa faktor emisi mewakili emisi rata-rata untuk semua proses yang mengeluarkan emisi dengan desain dan karakteristik yang sama.

2.5 Sektor Ketenagalistrikan Bidang Distribusi

PT PLN (Persero) merupakan sebuah Badan Usaha Milik Negara yang bergerak di bidang ketenagalistrikan. PLN bekerja di 3 lini yaitu Pembangkitan Listrik, Penyaluran Listrik, dan Pendistribusian Listrik. Saat ini unit kerja PLN sudah tersebar di segala penjuru Indonesia dari baik perkotaan maupun perdesaan. Perusahaan berkembang melewati beberapa fase perubahan bentuk, hingga pada tahun 1994, sesuai PP No. 23/1994 menjadi Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara atau disingkat PT PLN (Persero) berdasarkan akta 169 tanggal 30 Juli 1994 dari Notaris Sutjipto (PLN, 2023).

PLN melakukan transformasi melalui pembentukan Holding-Subholding dan strategi inovatif termasuk aspek sumber daya manusia, proses bisnis, dan teknologi. Program transformasi PLN dijalankan dengan 4 pilar, yaitu: *Green, Lean, Innovative, Customer Focused* demi menghadirkan Listrik untuk Kehidupan yang Lebih Baik. Pada gambar 2 merupakan Pilar Program Transformasi PLN.



Gambar 2 Pilar Program Transformasi PLN

Dalam rangka menjawab tantangan dan peluang ke depan, terobosan transformasi PLN yang terus dikembangkan dengan transformasi inklusif dan berkelanjutan yaitu sebagai *“The Next Chapter of Transformation”*, yang dilakukan dalam rangka merealisasikan cita-cita PLN ke depan untuk “Menjadi Perusahaan *Global Top 500* dan #1 pilihan pelanggan untuk solusi energi” melalui Program *“Moonshots”*, dengan fokus pada *Growth*, *Digital*, dan *Net Zero Emission*. Melalui *“The Next Chapter of Transformation”*, PLN melanjutkan program strategis melalui Transformasi 2.0 yang terdiri dari tiga Aspirasi dan *Moonshot Launchpads* sebagai *enabler*-nya. Pada gambar 3 merupakan Program *Moonshoot* PLN.



Gambar 3 Program *Moonshoot* PLN

Growth Moonshots bertujuan membawa PLN masuk ke dalam jajaran 500 perusahaan terbesar dunia melalui pertumbuhan demand listrik dan bisnis beyond kWh. *Growth Moonshots* direalisasikan diantaranya dengan meningkatkan skala layanan di luar bisnis penjualan tenaga listrik, antara lain dengan meningkatkan cakupan layanan internet, pengembangan Solar PV, pengembangan ekosistem kendaraan listrik, layanan PLTS Atap, pelayanan additional demand, pengembangan *Renewable Energy Certificate* (REC) dan perdagangan karbon, serta pengembangan bisnis hidrogen.

Digital Moonshots bertujuan untuk membawa PLN menjadi Global Digital Lighthouse dengan memberikan pengalaman pelanggan yang excellent dan menyajikan keunggulan operasional. Digital Moonshots direalisasikan melalui penerapan *Turbocharge PLN Mobile*, *smart power plant*, *smart grid – transmission*

and control system, smart grid – distribution and AMI, smart supply chain and materials management, smart customer services dan smart system planning.

NZE Moonshots bertujuan membawa PLN memimpin transisi energi Indonesia dan ekonomi hijau yang terintegrasi dengan pembangunan kawasan hijau. *NZE Moonshots* terdiri dari sejumlah program yaitu *Accelerated Renewable Energy Development (ARED)*, *dedieselization*, *scale-up PLTU co-firing biomass*, *green enabling transmission* dan *system debottlenecking*.

Moonshot Launchpads bertujuan untuk mendorong PLN membangun organisasi dan kompetensi yang relevan untuk kebutuhan bisnis masa depan. *Moonshot Launchpads* terdiri dari sejumlah program yaitu *risk management*, *HSH enablement*, *HC transformation for energy transition*, *IT transformation towards SSoT*, *asset management*, *centralized planning*, *investment optimization* dan *integrated financial management*.

Proses ketenagalistrikan dimulai dari pengelolaan sumber energi primer yang digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik. Sumber energi primer ini meliputi bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam, serta energi terbarukan, seperti sinar matahari, angin, air, dan biomassa. Sumber energi primer tersebut diubah menjadi energi listrik melalui proses pembangkitan di pembangkit listrik. Misalnya, pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), batu bara dibakar untuk menghasilkan uap yang memutar turbin, sementara Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) menggunakan aliran air untuk menggerakkan turbin, dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mengubah sinar matahari menjadi listrik melalui panel surya.

Setelah energi listrik dihasilkan di pembangkit, tegangan listrik awal yang relatif rendah ditingkatkan menggunakan *transformator step-up*. Peningkatan tegangan ini bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya selama proses transmisi jarak jauh. Listrik dengan tegangan tinggi kemudian dialirkan melalui jaringan transmisi yang terdiri dari saluran tegangan ekstra tinggi (500 kV), tegangan tinggi (275 kV atau 150 kV), hingga ke gardu induk. Di gardu induk, tegangan listrik diturunkan kembali menggunakan transformator *step-down* agar sesuai dengan kebutuhan pelanggan.

Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan menengah memiliki tegangan sistem sebesar 20 kV. Sistem konstruksi saluran distribusi terdiri dari saluran udara dan saluran bawah tanah. Pemilihan konstruksi tersebut didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut: alasan teknis yaitu berupa persyaratan teknis, alasan ekonomis, alasan estetika dan alasan pelayanan yaitu kontinuitas pelayanan sesuai jenis konsumen (Manjang dkk, 2019).

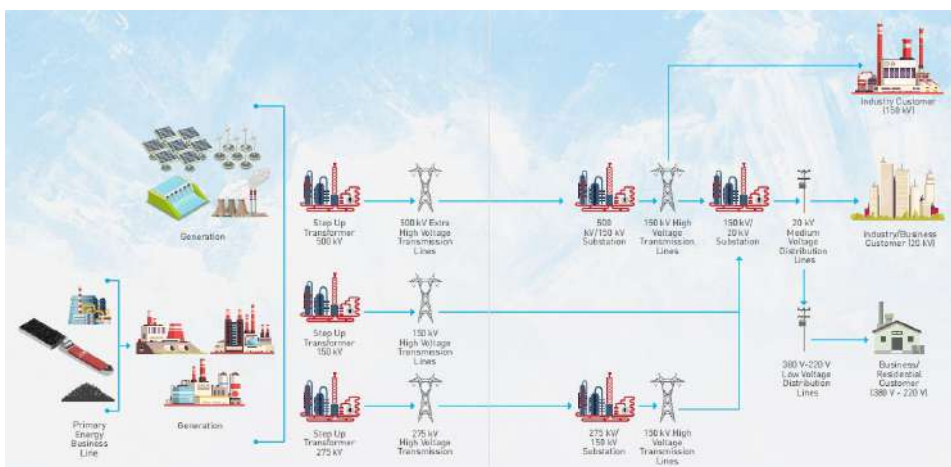
Gardu Distribusi (GD) berfungsi merubah tegangan listrik dari jaringan distribusi primer menjadi tegangan terpakai yang digunakan untuk konsumen dan disebut sebagai jaringan distribusi skunder. Kapasitas transformator yang digunakan pada GD ini tergantung pada jumlah beban yang akan dilayani dan luas daerah pelayanan beban. Bisa berupa transformator satu fasa dan bisa juga berupa transformator tiga fasa. Komponen-komponen gardu:

- a. PHB sisi tegangan rendah
- b. PHB pemisah saklar daya

- c. PHB pengaman transformator
- d. PHB sisi tegangan rendah
- e. Pengaman tegangan rendah
- f. Sistem pembumian
- g. Alat-alat indikator.

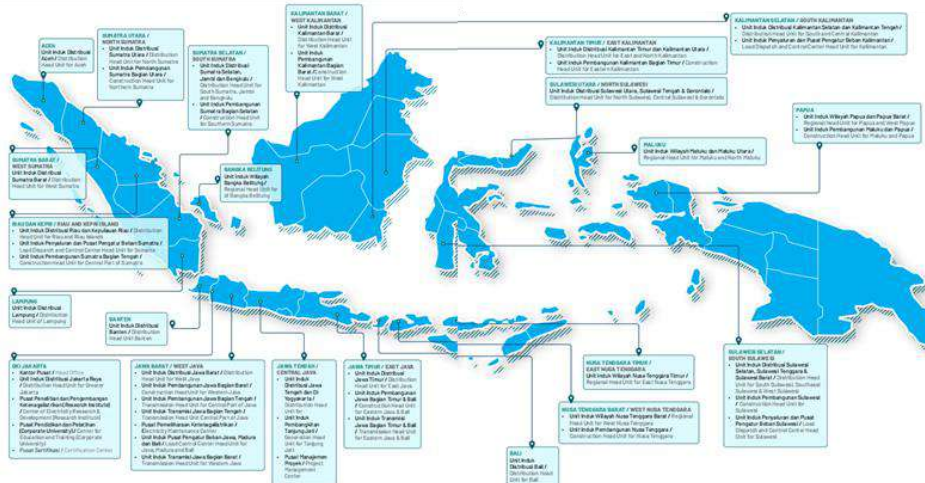
Dari gardu induk, listrik dialirkan melalui jaringan distribusi tegangan menengah (20 kV) menuju gardu distribusi di area pelanggan. Di gardu distribusi, tegangan listrik kembali diturunkan menjadi tegangan rendah (380 V atau 220 V) untuk didistribusikan ke pelanggan rumah tangga, bisnis, dan industri kecil. Sementara itu, pelanggan industri besar menerima listrik pada tegangan menengah (20 kV) atau tegangan tinggi (150 kV) sesuai dengan kapasitas kebutuhan.

Keseluruhan proses ini memerlukan pengelolaan yang cermat untuk memastikan pasokan listrik berjalan dengan andal dan efisien, mulai dari pembangkitan, transmisi, distribusi, hingga konsumsi oleh pelanggan akhir. Adopsi teknologi modern, seperti jaringan pintar (*smart grid*), juga semakin meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem kelistrikan dengan memungkinkan integrasi sumber energi terbarukan serta pengendalian sistem secara real-time. Pada gambar 4 merupakan proses ketenagalistrikan di PT PLN (Persero).



Gambar 4 Proses Ketenagalistrikan PT PLN (Persero)

Sejak didirikan PLN telah berkomitmen untuk melistriki seluruh Nusantara tanpa kecuali. PLN tumbuh dan berkembang, senantiasa menyertai masyarakat Indonesia dengan menyediakan energi listrik yang andal dan terjangkau. Sebagai wujud negara hadir, PLN terus berupaya menghadirkan listrik ke semua wilayah, termasuk daerah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T). Pada gambar 5 merupakan wilayah operasional PT PLN (Persero).



Gambar 5 Wilayah Operasional PT PLN (Persero)

Kegiatan ketenagalistrikan bidang distribusi memiliki potensi menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) yang berasal dari berbagai aktivitas operasional pendukung. Meskipun tidak berperan langsung sebagai sektor pembangkitan utama, literatur menunjukkan bahwa sektor distribusi tetap berkontribusi terhadap emisi GRK melalui konsumsi energi, penggunaan bahan bakar fosil, serta aktivitas penunjang lainnya (IPCC, 2022). Besarnya emisi yang dihasilkan dipengaruhi oleh intensitas aktivitas operasional dan karakteristik sistem kelistrikan, terutama bauran pembangkitan yang digunakan.

Sumber utama potensi emisi GRK pada sektor distribusi berasal dari konsumsi listrik pada fasilitas perkantoran, gardu, dan peralatan distribusi yang menghasilkan emisi tidak langsung dan sangat bergantung pada bauran pembangkitan listrik (IEA, 2023). Emisi gas rumah kaca dari konsumsi listrik merupakan komponen utama emisi operasional sektor bangunan. Hanif et al. (2024) menunjukkan bahwa konsumsi listrik berkontribusi dominan terhadap total emisi CO₂e, terutama pada bangunan komersial dan residensial di wilayah perkotaan. Selain itu, operasional Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang digunakan untuk menjaga keandalan pasokan listrik, khususnya di wilayah yang belum terinterkoneksi jaringan, merupakan sumber emisi langsung dengan intensitas tinggi akibat pembakaran bahan bakar diesel (IPCC, 2019). Aktivitas transportasi operasional dan timbunan sampah juga berkontribusi terhadap emisi GRK (IEA, 2022; IPCC, 2006). Emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari sektor transportasi merupakan bagian utama dari emisi gas rumah kaca akibat pembakaran bahan bakar fosil. Penelitian Aly et al. (2021) menunjukkan bahwa besarnya emisi CO₂ sangat dipengaruhi oleh volume kendaraan dan intensitas aktivitas transportasi, yang menegaskan bahwa emisi GRK dari sektor transportasi bersifat berbasis aktivitas. Temuan ini relevan dalam inventarisasi emisi GRK, khususnya untuk penghitungan emisi dari kendaraan operasional, serta mendukung penggunaan pemodelan sistem dinamik dalam

mensimulasikan dampak perubahan aktivitas transportasi terhadap emisi GRK dalam jangka panjang. Kemudian studi oleh Zakaria et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas transportasi, yang tercermin dari bertambahnya volume kendaraan, sejalan dengan meningkatnya konsentrasi emisi udara di lingkungan sekitar. Penelitian ini menegaskan bahwa besarnya emisi sangat dipengaruhi oleh tingkat aktivitas transportasi. Dalam konteks inventarisasi gas rumah kaca, pola hubungan antara aktivitas dan emisi tersebut tetap relevan untuk menghitung emisi GRK dari kendaraan operasional.

2.6 Pemodelan Sistem Dinamik

Pada sub bab ini dibahas mengenai pemodelan sistem dinamik yang mencakup penjelasan tentang teori dasar sistem dinamik, perangkat lunak yang digunakan dalam proses pemodelan, serta penerapan sistem dinamik berdasarkan hasil penelitian terdahulu.

2.6.1 Teori Dasar

Pendekatan sistem dinamik berakar pada cara berpikir holistik yang dikenal dengan istilah *system thinking*. Pendekatan ini menekankan pentingnya melihat fenomena alam maupun sosial sebagai suatu sistem yang saling berinteraksi dan membentuk pola perilaku tertentu seiring waktu. Dalam konteks ini, *System Dynamics (SD)* merupakan suatu alat simulasi yang digunakan untuk membantu pengambil keputusan memahami sistem yang kompleks serta menilai dampak dari suatu kebijakan atau intervensi terhadap sistem tersebut (Williams, 2002).

Metode *System Dynamics* pertama kali dikembangkan oleh Jay W. Forrester pada akhir tahun 1950-an di *Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. Melalui bukunya yang berjudul *Industrial Dynamics*, Forrester berhasil memperkenalkan konsep sistem dinamik ke dalam bidang ilmu manajemen dan rekayasa kebijakan. Selanjutnya, pada tahun 1990-an, bidang ini kembali mendapatkan perhatian luas setelah terbitnya buku *The Fifth Discipline* oleh Peter Senge, yang menekankan pentingnya konsep *feedback* dan *time delay* dalam memahami dinamika sistem organisasi (Dooley, 2002).

Menurut Sterman (2000) efektivitas pengambilan keputusan di tengah meningkatnya kompleksitas sistem modern membutuhkan kemampuan berpikir sistemik. Hal ini berarti seseorang perlu memahami bagaimana struktur internal suatu sistem yang terdiri atas elemen, hubungan sebabakibat (*causal relationships*), dan umpan balik (*feedback loops*) menghasilkan perilaku sistem dalam jangka panjang. Dengan demikian, *System Dynamics* tidak hanya berfungsi sebagai alat

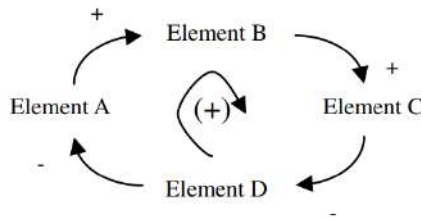
pemodelan matematis, tetapi juga sebagai sarana pembelajaran untuk memahami bagaimana keputusan kecil dapat memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan.

Secara matematis, *System Dynamics* berbasis pada persamaan diferensial dan memiliki akar dari bidang *control engineering*. Seiring perkembangan teknologi, pendekatan ini telah menjadi salah satu metode penelitian yang mapan dalam ilmu manajemen dan rekayasa sistem. Popularitasnya semakin meningkat dengan adanya kemajuan perangkat lunak simulasi yang semakin mudah diakses, seperti *Vensim*, *Stella*, dan *Powersim*, yang memungkinkan pengguna untuk membangun dan menganalisis model sistem kompleks secara lebih efisien.

Pengembangan model dinamik secara umum terdiri dari empat tahap, yaitu tahap seleksi konsep dan variable, konstruksi model, analisis sensitivitas, dan analisis kebijakan. Model yang mempertimbangkan keempat dasar tersebut akan memiliki validitas yang baik dan dapat berkontribusi secara positif dalam mencapai keuntungan baik secara teknis, pengurangan resiko bencana, aspek keselamatan, maupun penghematan biaya secara finansial. Menurut Hilmi (2021), beberapa acuan yang digunakan dalam proses pembuatan model antara lain :

1. Pembuatan model diagram yang sederhana;
2. Penggunaan hubungan persamaan eksponensial matematika dasar (+, -, x, dan /);
3. Grafik dan tabel sebagai pembanding;
4. Pemakaian jenis satuan yang sesuai; dan
5. Memastikan bahwa nilai reservoir yang ada dalam aplikasi hanya ditentukan berdasarkan aspek OUTFLOW atau INFLOW saja dengan sistem mass balance, sehingga perlu dilakukan pengecekan berkala berdasarkan kondisi batasnya.

Sistem dinamik merupakan pendekatan berbasis komputer yang digunakan untuk menganalisis dan merancang kebijakan. Metode ini diterapkan pada sistem atau masalah yang bersifat dinamis, seperti sektor sosial, manajerial, ekonomi, ekologi, dan lainnya, yang ditandai dengan keterkaitan antar komponen, interaksi timbal balik, umpan balik, dan hubungan sebab-akibat (Artika & Chaerul, 2020). Sebagai pendekatan analisis, sistem dinamik sangat efektif digunakan untuk menggambarkan sistem yang bersifat kompleks dan dinamis, seperti sistem pengelolaan sumber daya, sistem ekonomi, sistem sosial, maupun sistem lingkungan. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk memantau efek dari perubahan yang terjadi pada suatu subsistem terhadap keseluruhan sistem, serta memahami hubungan sebab-akibat di dalamnya secara terstruktur. Dengan demikian, sistem dinamik tidak hanya menampilkan perubahan variabel secara kuantitatif, tetapi juga membantu menjelaskan mekanisme keterkaitan antar komponen secara kualitatif. Struktur utama dalam sistem dinamik digambarkan melalui diagram lingkaran sebab akibat (causal loop diagram/CLD). (Chaerul, 2008)



Gambar 6 Notasi Causal Loop Diagram

Diagram ini menggambarkan hubungan antar variabel dalam suatu sistem yang saling memengaruhi. Setiap hubungan antar variabel disebut causal link, yang dapat bertanda positif (+) atau negatif (-). Hubungan positif (+) menunjukkan bahwa perubahan pada satu variabel akan menyebabkan perubahan pada variabel lain dalam arah yang sama (misalnya, peningkatan pada variabel A menyebabkan peningkatan pada variabel B). Sebaliknya, hubungan negatif (-) menunjukkan bahwa perubahan pada satu variabel akan menyebabkan perubahan pada variabel lain dalam arah yang berlawanan (misalnya, peningkatan pada variabel A menyebabkan penurunan pada variabel B).

Kombinasi dari hubungan-hubungan kausal tersebut membentuk lingkaran umpan balik (*feedback loop*), yang menjadi dasar perilaku sistem. Lingkaran umpan balik dibedakan menjadi dua jenis, yaitu umpan balik positif (*reinforcing feedback*) dan umpan balik negatif (*balancing feedback*). Umpan balik positif memperkuat arah perubahan dalam sistem, sedangkan umpan balik negatif berfungsi menjaga stabilitas sistem agar kembali ke kondisi keseimbangan setelah mengalami gangguan.

Diagram *causal loop* memiliki dua fungsi utama dalam pemodelan sistem dinamik, yaitu (1) menyajikan hipotesis kausal secara visual selama proses pengembangan model, dan (2) menyederhanakan representasi sistem kompleks menjadi struktur yang lebih mudah dianalisis. Selanjutnya, model sistem dinamik dibangun dari empat komponen utama atau *building blocks*, yaitu stok (*stock*), aliran (*flow*), konverter (*converter*), dan konektor (*connector*).

1. *Stock* menggambarkan akumulasi suatu variabel dalam sistem,
2. *Flow* menunjukkan laju perubahan dari stock,
3. *Converter* digunakan untuk perhitungan variabel antara, dan
4. *Connector* menunjukkan hubungan antar elemen dalam sistem.

2.6.2 Perangkat Lunak Sistem Dinamik

Beberapa software yang digunakan untuk membuat dan mensimulasikan sistem dinamik diantaranya Vensim, STELLA, dan Powersim Studio. Ada pula software lainnya yang menunjang lebih luas seperti Dynaplan, Barkeley Madonna, Goldsim, Simile (dari Simulistik), dan Simgua (Popli dkk, 2017).

STELLA (Structural Thinking, Experiential Learning Laboratory with Animation) merupakan salah satu perangkat lunak populer yang digunakan untuk membangun dan mensimulasikan model sistem dinamik. Perangkat lunak ini pertama kali dikembangkan oleh Barry Richmond dan tim dari *isee systems* pada akhir tahun 1980-an. Tujuan utama pengembangannya adalah untuk membantu pengguna memahami sistem yang kompleks melalui pendekatan visual dan interaktif dengan menggunakan prinsip *system thinking* atau berpikir sistem.

STELLA dirancang untuk memfasilitasi proses pemodelan sistem dengan antarmuka yang mudah digunakan (*user friendly*). Melalui tampilan berbasis diagram, pengguna dapat membangun model dinamik dengan menghubungkan komponen-komponen utama seperti *stock*, *flow*, *converter*, dan *connector* secara intuitif. Komponen-komponen ini merepresentasikan elemen-elemen utama dalam sistem dinamik, di mana *stock* menggambarkan akumulasi sumber daya, *flow* menunjukkan laju perubahan, *converter* mengatur nilai-nilai perhitungan, dan *connector* menggambarkan hubungan antar variabel dalam sistem (*isee systems*, 2020).

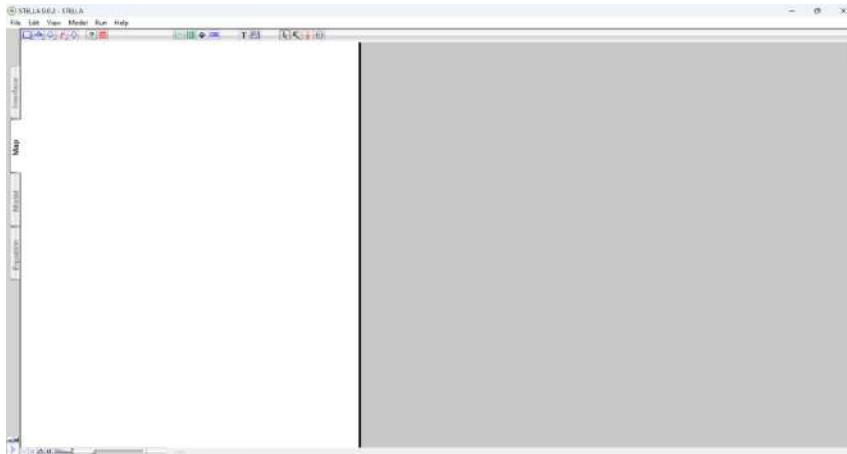
Keunggulan utama STELLA terletak pada kemampuannya menggabungkan antara pemodelan matematis dan visualisasi konseptual. Pengguna dapat dengan mudah membangun model berbasis persamaan matematis tanpa harus menulis kode secara manual, karena STELLA menyediakan lingkungan berbasis grafik yang intuitif. Selain itu, perangkat lunak ini juga memungkinkan simulasi skenario dengan mengubah parameter tertentu, sehingga pengguna dapat mengamati bagaimana perubahan pada satu variabel memengaruhi keseluruhan sistem dalam jangka waktu tertentu. Hal ini menjadikan STELLA sangat efektif dalam proses pembelajaran, analisis kebijakan, serta pengambilan keputusan strategis.

Dalam konteks penelitian STELLA banyak digunakan di berbagai bidang seperti manajemen lingkungan, kebijakan publik, pendidikan, ekonomi, kesehatan, dan energi. Misalnya, dalam studi lingkungan, STELLA dapat digunakan untuk memodelkan siklus karbon, emisi gas rumah kaca, atau dinamika sumber daya air. Sementara itu, dalam manajemen organisasi, perangkat lunak ini digunakan untuk menganalisis hubungan antara produktivitas, sumber daya manusia, dan efektivitas kebijakan internal. Keunggulan lainnya adalah kemampuan STELLA untuk menampilkan hasil simulasi dalam bentuk grafik dinamis dan animasi, yang membantu pengguna memahami perilaku sistem secara lebih komprehensif.

Selain itu STELLA juga mendukung proses eksperimen sistemik melalui fitur *sensitivity analysis* dan *scenario testing*. Fitur ini memungkinkan peneliti atau pengambil keputusan untuk mengevaluasi dampak dari berbagai alternatif kebijakan atau intervensi terhadap kinerja sistem. Dengan demikian, STELLA tidak hanya berperan sebagai alat bantu visualisasi, tetapi juga sebagai instrumen analisis kuantitatif yang mendukung pendekatan *evidence based decision making*.

Secara keseluruhan STELLA merupakan perangkat lunak yang kuat dan fleksibel untuk eksplorasi sistem kompleks. Pendekatan visual yang disediakan oleh STELLA menjadikannya alat yang sangat bermanfaat untuk memahami pola sebab-

akibat dalam sistem dinamik serta membantu pengguna dalam merancang solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan terhadap permasalahan nyata.



Gambar 7 Tampilan lembar kerja *Stella* 9.0.2

2.6.3 Aplikasi Sistem Dinamik

Secara umum model perencanaan matematis lebih sesuai digunakan untuk menyelesaikan persoalan teknis yang bersifat spesifik, karena model ini berfokus pada pencarian solusi optimal dari suatu fungsi tujuan tanpa memperhatikan proses perubahan atau evolusi dari sistem itu sendiri. Sebaliknya, model sistem dinamik memiliki kemampuan untuk menganalisis secara mendalam evolusi dinamis dari sistem yang kompleks. Pendekatan ini memungkinkan analisis terhadap perilaku sistem melalui interaksi antar faktor internal, dengan asumsi bahwa perubahan pada kondisi eksternal tidak memengaruhi struktur sistem secara langsung. Dengan demikian, sistem dinamik mampu mensimulasikan interaksi yang kompleks di antara berbagai variabel dalam sistem (Peng & Xiang, 2022).

Metode sistem dinamik dipilih karena dinilai efektif dalam menangani permasalahan yang bersifat kompleks dan memiliki keterkaitan dengan kebijakan publik. Selain itu, proses pemodelan menggunakan pendekatan ini dapat dilakukan secara bertahap, mulai dari model yang sederhana hingga yang lebih kompleks. Keunggulan lainnya adalah hubungan sebab-akibat antar variabel dalam model dapat divisualisasikan dan dijelaskan dengan cara yang mudah dipahami, bahkan oleh kalangan non-teknis, sehingga hasil analisisnya dapat lebih mudah dikomunikasikan kepada pembuat kebijakan dan masyarakat umum.

2.7 Penelitian Terdahulu

Tabel 3 Penelitian Terdahulu

No	Nama	Judul Penelitian	Tujuan/ Sasaran	Metodologi	Output
1	Siti Allifah dan Pini Wijayanti (2022)	Potensi Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca dan Kelayakan Finansial dari Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Cisalimar, Jawa Barat	Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi potensi emisi GRK sebelum adanya proyek PLTMH Cisalimar dan reduksi emisi GRK setelah adanya proyek PLTMH Cisalimar, serta menganalisis kelayakan finansial PLTMH tersebut.	Melakukan perhitungan reduksi emisi dari emisi GRK baseline dengan emisi GRK proyek dengan beberapa skenario dengan Metode <i>Clean Development Mechanism</i> (CDM) digunakan untuk mengestimasi potensi reduksi emisi GRK dan analisis kelayakan finansial untuk mengevaluasi kelayakan finansial proyek PLTMH	Hasil penelitian menunjukkan emisi GRK sebelum adanya proyek PLTMH adalah 25,50 t CO ₂ per tahun pada tahun 2005 dan berpotensi meningkat hingga 34,39 t CO ₂ per tahun pada tahun 2030. PLTMH Cisalimar berpotensi dalam mereduksi emisi GRK sebesar 99,87% hingga 99,91% pada kurun 2005-2030.
2	Faris Faza Ghaniyya, Nurlina Husnita	Upaya pengendalian perubahan iklim melalui pembatasan kendaraan berbahan bakar minyak di Indonesia berdasarkan Paris Agreement	Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai Perjanjian Paris dalam mengendalikan perubahan iklim dengan cara membatasi penggunaan kendaraan berbahan bakar minyak di Indonesia.	Metode penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu metode penelitian dengan pendekatan yuridis normatif serta metode analisis yuridis kualitatif.	Hasil penelitian adalah bahwa dapat dilakukan upaya pembatasan penggunaan kendaraan berbahan bakar minyak di Indonesia dengan didasarkan kepada Perjanjian Paris sehingga perubahan iklim dapat dikendalikan serta alternatif yang dapat digunakan yaitu energi terbarukan
3	Nadine Alzaghrini, Alenxander	Menutup kesenjangan mitigasi GRK dengan	Analisis distribusi emisi gas rumah kaca	Analisis sensitivitas digunakan untuk	Variabilitas emisi kumulatif hingga

Milovanoff, Riddhiman Roy, Amir FN Abdul Manan, Jon Mc Kechnie, Daniel Posen, Heather L. Maclean ; (2024)	Langkah-langkah yang menargetkan kendaraan ringan berbahan bakar bensin konvensional – Analisis berbasis skenario armada AS	• di seluruh dunia pada tahun 2020 di berbagai subsektor • Selidiki dampak pendidikan eco-driving terhadap pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂, • Evaluasi emisi gas rumah kaca kumulatif dari tahun 2021 hingga 2050 dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti perubahan stok kendaraan, kilometer perjalanan kendaraan (VKT) tahunan, reaksi pengemudi terhadap peningkatan efisiensi kendaraan, perubahan bobot kendaraan, dan batasan usia kendaraan , • Mempelajari dampak berbagai skenario	memahami dampak berbagai faktor seperti perubahan stok kendaraan, pertumbuhan VKT, respons pengemudi terhadap peningkatan efisiensi, perubahan bobot kendaraan, dan batasan usia kendaraan terhadap emisi kumulatif dari tahun 2021 hingga 2050 • Skenario yang dimodelkan untuk elektrifikasi armada penuh dengan peningkatan linear dalam pangsa pasar kendaraan listrik baterai (BEV) yang mengarah pada elektrifikasi armada penuh pada tahun 2035 • Melakukan simulasi untuk menilai konsumsi energi,	tahun 2050 terutama dipengaruhi oleh perubahan stok kendaraan dan proyeksi VKT • Skenario elektrifikasi armada penuh menunjukkan peningkatan linear dalam pangsa pasar BEV, yang berdampak pada konsumsi bahan bakar untuk kendaraan bermesin pembakaran internal dan kendaraan listrik hibrida menurut skenario. • Pendidikan eco-driving mempunyai dampak positif dalam mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂, menyoroti pentingnya pelatihan pengemudi dalam kelestarian lingkungan
---	---	--	--	---

			terhadap perjalanan kendaraan, elektrifikasi, dan dampak perubahan iklim terhadap rata-rata kendaraan yang berbasis di AS selama 100 tahun dan Periksa penggunaan E-fuel saat ini dan masa depan pada kendaraan ringan di Jerman	pengurangan biaya, penghematan bahan bakar, emisi partikel, dan emisi gas pada kendaraan listrik hibrida dibandingkan kendaraan konvensional dalam berbagai mode berkendara	
4	Puneet Kamboja, Mohammad Hijazi, Halaman Kyle, Gokul Iyer (2024)	Jalan menuju Net Zero Emission 2060 : Jalur jangka Panjang Arab Saudi untuk mengurangi emisi GRK	• Menganalisis kelayakan efisiensi energi dalam memfasilitasi Arab Saudi menuju Net Zero Emission	• Memanfaatkan pemodelan ekonomi untuk menilai kelayakan langkah-langkah efisiensi energi di Arab Saudi • Melakukan analisis ekonomi untuk memahami implikasi reformasi harga energi dalam negeri terhadap berbagai sektor di Arab Saudi	• Studi mengenai efisiensi energi menyoroti kelayakan ekonomi untuk melakukan transisi menuju emisi nol bersih di Arab Saudi • Reformasi ekonomi dalam penetapan harga energi ternyata mempunyai dampak spesifik pada sektor tertentu dan implikasi

				Menggunakan pemodelan ekonomi-energi untuk memperkirakan potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan penghematan biaya dalam sistem energi Arab Saudi	ekonomi yang lebih luas di Arab Saudi Analisis tersebut menunjukkan adanya potensi signifikan dalam mengurangi konsumsi dan biaya bahan bakar di sektor energi Arab Saudi tanpa membebani konsumen akhir dengan kenaikan harga.
5	Antonius Priyo N.S and Asep Sofyan	Evaluasi Usaha Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca melalui <i>Clean Development Mechanism</i> (Studi Kasus : PT Indocement Tungal Prakarsa Tbk)	- Mengevaluasi efektivitas Clean Development Mechanism (CDM) dalam mengurangi emisi CO₂ pada proses produksi semen PT Indocement Tungal Prakarsa Tbk - Menganalisis hubungan sebab akibat yang mempengaruhi emisi CO₂ pada produksi semen, dengan fokus	- Menggunakan data sekunder dari PT Indocement Tungal Prakarsa Tbk dan Dokumen Desain Proyek CDM untuk analisis - Mengembangkan diagram sebab akibat untuk memodelkan sistem dinamis dan memproyeksikan emisi CO₂ hingga tahun 2020 berdasarkan skenario baseline dan implementasi CDM	- Implementasi CDM menghasilkan penurunan emisi CO₂ yang signifikan dalam produksi semen, dengan potensi penurunan total emisi sebesar 11% pada tahun 2020 dibandingkan dengan proyeksi awal - Mengidentifikasi kontributor utama emisi CO₂ dalam produksi semen, seperti proses

			pada faktor-faktor seperti konsumsi energi, jenis bahan bakar, dan transportasi Menyelidiki tantangan yang menghambat pencapaian proyeksi pengurangan emisi karena keterlambatan dalam adopsi teknologi dan substitusi bahan bakar		kalsinasi, pembakaran bahan bakar, dan pembangkitan listrik, dengan persentase emisi yang bervariasi Tantangan dalam mencapai proyeksi pengurangan emisi disebabkan oleh beberapa faktor seperti tingkat produksi yang berfluktuasi dan target yang tidak terpenuhi untuk produk semen rendah CO2
6	Hossein Abolghasemzadeh, Elnaz Zekri, Mohsen Nasseri ; (2024)	Kerangka kerja hubungan energi-air berskala regional untuk menilai emisi GRK dalam skenario perubahan iklim dan pembangunan melalui pendekatan dinamika system	- Studi ini mengembangkan model energi-air-emisi (EWE) dengan menggunakan kerangka kerja dinamika sistem (SD). - Model ini mensimulasikan emisi gas rumah kaca (GRK) regional dari	- Kerangka kerja SD digunakan untuk mengembangkan model simulasi untuk penelitian ini. - SD dikenal sebagai metode yang mampu menganalisis sistem dinamis yang kompleks dan telah diterapkan dalam kebijakan energi.	- Validasi model menilai akurasi melalui analisis variabel kunci. - Hasil emisi GRK disajikan dalam berbagai skenario iklim. - Analisis sektoral menyoroti dampak skenario pembangunan terhadap emisi dan keseimbangan energi.

tahun 2011 hingga 2031.	• Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak perubahan iklim dan skenario pembangunan terhadap emisi GRK. • Model ini mencakup submodel energi, air, ekonomi, dan emisi GRK. • Hubungan antar variabel dikonseptualisasikan dengan menggunakan diagram sebab akibat (causal loop diagram/CLD). • Kondisi historis dan masa depan dipertimbangkan untuk mendapatkan estimasi emisi GRK yang akurat.	• Emisi langsung dan tidak langsung dianalisis, dengan fokus pada GRK utama. • Emisi yang terkait dengan konsumsi air dan produksi energi juga disoroti. • Studi ini menunjukkan emisi yang signifikan dari berbagai sektor, dengan industri sebagai kontributor utama. • Porsi emisi GRK sektoral dianalisis di bawah skenario iklim yang berbeda. • Sektor pertanian dan transportasi menunjukkan emisi tertinggi dalam skenario tertentu. • Studi ini mengungkapkan dampak perubahan iklim terhadap konsumsi energi dan
--------------------------------	---	---

					penggunaan air di berbagai sektor.
7	Rizka Permatayakti Rasyidta Nur , Herry Purnomo ; (2015)	Model Simulasi Emisi dan Penyerapan CO2 di Kota Bogor	• Penelitian ini bertujuan untuk menilai emisi dan penyerapan CO2 di Kota Bogor. • Sumber emisi CO2 meliputi knalpot kendaraan, asap industri, dan limbah rumah tangga.	Konsep yang digunakan dalam pemodelan ini adalah konsep <i>loss-gain emission</i> dari aktivitas penduduk perkotaan, yaitu dengan mendaftar aktivitas yang menambah CO2 dan mengurangi CO2 beserta interaksinya. Industri, pembangunan, rumah tangga, penggunaan energi listrik dan gas, peternakan, dan transportasi diasumsikan sebagai aktivitas yang meningkatkan CO2 (<i>gaining emission</i>). Di sisi lain, adanya RTH disertai beberapa upaya pengendalian emisi CO2 seperti penggunaan biodiesel, pengelolaan sampah, penggunaan biogas, dan reforestasi merupakan aktivitas yang menurunkan emisi CO2 (<i>losing emission</i>).	• Masalah utamanya adalah tingginya emisi CO2 di Bogor, mencapai 2.536.861 ton pada tahun 2012. • Penyerapan CO2 pada tahun yang sama adalah 113.893 ton. • Pemodelan ini bertujuan untuk memproyeksikan emisi dan penyerapan selama 30 tahun ke depan. • Model ini berfokus pada kota Bogor dan mempertimbangkan berbagai sumber emisi dan area RTH.
8	Hanif; Ahmed Z. Khan; Muhammad Idrus Alhamid;	<i>Building Stock and Emission Models for Jakarta</i>	Menginventarisasi dan menganalisis emisi gas rumah kaca (CO ₂ e) dari sektor bangunan di Jakarta,	Pendekatan kuantitatif berbasis bottom-up Building Stock Model (BSM). Emisi dihitung dari konsumsi energi (listrik	• Inventarisasi emisi GRK sektor bangunan Jakarta (CO₂e)

Yohei Yamaguchi (2024)	baik emisi operasional maupun emisi non operasional, serta memproyeksikan emisi hingga tahun 2050 dalam berbagai skenario kebijakan.	dan LPG) untuk emisi operasional serta penggunaan material bangunan untuk emisi terbenam. Analisis dilakukan pada periode historis 2010–2022 dan diproyeksikan hingga 2050 menggunakan regresi linier dan Prophet Forecasting Model, dengan validasi model menggunakan MAE dan MAPE.	• Identifikasi dominasi emisi operasional dibanding emisi terbenam • Proyeksi emisi BaU dan skenario mitigasi hingga 2050 • Rekomendasi kebijakan bangunan hijau untuk penurunan emisi jangka panjang.
---------------------------	--	--	--
