

SKRIPSI GEOFISIKA

**PEMODELAN EMISI GAS RUMAH KACA PADA LAHAN SAWAH
MENGUNAKAN SISTEM DINAMIK DI KABUPATEN BONE**

Disusun dan diajukan oleh :

NURFADILLAH

H061181333



PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

HALAMAN JUDUL

**PEMODELAN EMISI GAS RUMAH KACA PADA LAHAN SAWAH
MENGUNAKAN SISTEM DINAMIK DI KABUPATEN BONE**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana

Sains Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH :

NURFADILLAH

H061181333

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

HALAMAN PENGESAHAN
PEMODELAN EMISI GAS RUMAH KACA PADA LAHAN SAWAH
MENGGUNAKAN SISTEM DINAMIK DI KABUPATEN BONE

Disusun dan diajukan oleh :

NURFADILLAH

H061181333

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 14 April 2022

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing utama



Dr. Samsu Arif, M.si
NIP. 196305181991031011

Pembimbing Pendamping



Dr. Sakka, M.si
NIP. 196410251991031002

Ketua Departemen Geofisika



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M. Eng
NIP. 19670929199031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nurfadillah
NIM : H061181333
Program Studi : Geofisika
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PEMODELAN EMISI GAS RUMAH KACA PADA LAHAN SAWAH MENGUNAKAN SISTEM DINAMIK DI KABUPATEN BONE

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 14 April 2022

Yang Menyatakan



Nurfadillah

SARI BACAAN

Gas rumah kaca terbentuk secara alami maupun hasil dari aktivitas manusia salah satunya dari kegiatan produktivitas lahan sawah yang mendorong bertambahnya konsentrasi emisi gas rumah kaca di atmosfer. Indonesia menjadi bagian dalam UNFCCC pada konvensi perubahan iklim yang memiliki komitmen dalam penurunan emisi gas rumah kaca, khususnya Sulawesi Selatan. Kabupaten Bone memiliki lahan sawah terbesar di Sulawesi Selatan, penyumbang emisi gas rumah kaca pada sawah dipengaruhi oleh luas lahan sawah. Perlu dilakukan upaya dengan melakukan pemodelan emisi gas rumah kaca dan analisis intervensi kebijakan guna mendukung perencanaan penurunan emisi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan untuk : 1) Menentukan luas lahan sawah Kabupaten Bone tahun 2011 – 2020; 2) Menganalisis parameter dan keterkaitan antar parameter dalam pemodelan sistem dinamik; 3) Menentukan besar emisi gas rumah kaca yang ditimbulkan oleh lahan sawah melalui pemodelan sistem dinamik. Metode yang digunakan yaitu sistem dinamik. Hasil penelitian menunjukkan : 1) Luas lahan sawah Kabupaten Bone mengalami pertambahan dan pengurangan luas; 2) Berdasarkan hasil analisis parameter, diperoleh beberapa parameter dan keterkaitannya yang telah dianalisis dengan studi literatur diantaranya pemupukan, simpanan karbon dalam tanah, faktor emisi pupuk, luas sawah irigasi dan non irigasi, faktor emisi sawah irigasi dan non irigasi, emisi pupuk, emisi budidaya hingga menghasilkan total emisi sawah; 3) Total emisi gas rumah kaca pada lahan sawah pada tahun 2030 sebesar 15.617,54 tonCO₂. Skenario indeks pertanian emisi gas rumah kaca pada lahan sawah pada tahun 2030 mengalami penurunan menjadi 13.556,03 tonCO₂. Untuk skenario penggunaan pupuk, total emisi gas rumah kaca juga mengalami penurunan menjadi 15.258,68 tonCO₂. Ini menunjukkan bahwa menggunakan skenario kebijakan efektif dalam rencana aksi penurunan emisi gas rumah kaca pada lahan sawah.

Kata kunci : Emisi Gas Rumah Kaca, Sistem Dinamik, Skenario Kebijakan

ABSTRACT

Greenhouse gases are formed naturally or as a result of human activities, one of which is the productivity of paddy fields which encourage an increase in the concentration of greenhouse gas emissions in the atmosphere. Indonesia is a part of the UNFCCC at the climate change convention which is committed to reducing greenhouse gas emissions, especially South Sulawesi. Bone Regency has the largest paddy field in South Sulawesi, the contributor to greenhouse gas emissions in rice fields is influenced by the area of rice fields. Efforts need to be made by modeling greenhouse gas emissions and analyzing policy interventions to support planning for reducing greenhouse gas emissions. This study aims to: 1) Determine the area of rice fields in Bone Regency in 2011 – 2020; 2) Analyzing parameters and interrelationships between parameters in dynamic system modeling; 3) Determine the amount of greenhouse gas emissions caused by paddy fields through dynamic system modeling. The method used is dynamic system. The results showed: 1) The area of rice fields in Bone Regency experienced an increase and decrease in area; 2) Based on the results of parameter analysis, several parameters and their relationships were obtained which have been analyzed with literature studies including fertilization, carbon storage in soil, fertilizer emission factors, irrigated and non-irrigated rice fields, irrigated and non-irrigated rice fields emission factors, fertilizer emissions, cultivation emissions to produce total rice field emissions; 3) The total emission of greenhouse gases in paddy fields in 2030 is 15,617.54 tonsCO₂. The scenario of the planting index of greenhouse gas emissions in paddy fields in 2030 has decreased to 13,556.03 tonsCO₂. For the scenario of using fertilizers, the total greenhouse gas emissions also decreased to 15,258.68 tonsCO₂. This shows that using the policy scenario is effective in the action plan for reducing greenhouse gas emissions in paddy fields.

Keywords: Greenhouse Gas Emissions, System Dynamic, Policy Scenario

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur bagi Allah, rabb semesta alam karena atas berkah limpahan rahmat dan nikmat-Nya sehingga penulis dapat merampungkan skripsi dengan judul *Pemodelan Emisi Gas Rumah Kaca p3ada Lahan Sawah Menggunakan Sistem Dinamik di Kabupaten Bone*. Shalawat serta salam tak lupa penulis curahkan kepada Nabi Muhammad shallallahu ‘alaihi wa sallam, kepada para sahabat dan pengikutnya yang senantiasa mengikuti sunnah beliau hingga akhir zaman.

Proses penyusunan skripsi ini atas izin Allah dapat berjalan dengan baik melalui bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua penulis, **Bapak Jurais Beddu** dan **Ibu Ida**, yang senantiasa mendoakan, memberikan dorongan, semangat, cinta dan kasih sayang, pengorbanan yang tiada terkira serta senantiasa mengingatkan dan mengajarkan berbagai hal hingga menjadi seperti sekarang ini. Juga kepada adik-adikku tersayang. Serta kepada kakek, nenek, om, tante dan keluarga yang lainnya yang telah memberikan dukungan dan bantuan.
2. Bapak **Dr. Samsu Arif, M.Si.** selaku pembimbing utama, Bapak **Dr. Sakka, M.Si.** selaku pembimbing pertama yang telah memberikan perhatian, bimbingan, nasihat dan masukan-masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi tugas akhir.

- 3. Bapak Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** dan **Bapak Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si.** selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam penulisan skripsi ini.
- 4. Bapak Sabrianto Aswad, S.Si, M.T.** selaku dosen penasihat akademik penulis. Terima kasih atas berbagai nasihat, motivasi dan segala kebaikan serta **kepada seluruh dosen-dosen** yang telah mendedikasikan waktunya sebagai pengajar. Terima kasih atas ilmu yang disampaikan. Semoga menjadi amal jariah di akhirat kelak. Dan juga kepada seluruh **staf Departemen Geofisika** dan **staf Fakultas MIPA** yang telah membantu menyelesaikan urusan-urusan akademik terkhusus selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Kanda **Iswar Edis Pratama, S.Si** yang telah memberikan dukungan, doa, maupun bantuan serta kebersamaan dan menemani penulis dalam menjalani perkuliahan dan menyelesaikan skripsi.
6. **Nilam Syukur, Resky Amelia, Mutmainnah** yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam menyelesaikan penelitian ini
7. Teman-teman seperjuangan **Geofisika 2018 dan Himafi 18** atas doa, dukungan, maupun bantuan dalam menjalani perkuliahan dan menyelesaikan skripsi.
8. Serta kepada **seluruh pihak** secara langsung maupun tidak langsung yang telah sangat banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi maupun studi yang tidak sempat disebutkan satu persatu.

Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca maupun penulis. Penulis menyadari dalam penelitian dan penulisan hasilnya ini banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik

dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan agar penelitian ini dapat dikembangkan.

Makassar, 10 April 2022

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | ii |
| PERNYATAAN KEASLIAN | ii |
| SARI BACAAN | v |
| ABSTRACT | vi |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| I.1 Latar Belakang | 1 |
| I.2 Rumusan Masalah | 5 |
| I.3 Ruang Lingkup | 5 |
| I.4 Tujuan Penelitian | 6 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| II.1 Gas Rumah Kaca | 7 |
| II.1.1 Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Pertanian | 8 |
| II.2 Global Warming Potential (GWP) | 12 |
| II.3 Perubahan Iklim | 13 |
| II.4 Sistem Dinamika | 15 |
| II.5 Simulasi | 19 |
| II.7 Tutupan Lahan | 20 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 23 |
| III.1 Lokasi Penelitian | 23 |
| III.2 Alat dan Bahan | 24 |
| III.2.1 Alat | 24 |
| III.2.2 Bahan | 24 |
| III.3 Prosedur Penelitian | 25 |

| | | |
|-----------------------|---|-----------|
| III.3.1 | Prosedur Pengambilan Data | 25 |
| III.3.2 | Prosedur Pengolahan Data..... | 25 |
| BAB IV | HASIL DAN PEMBAHASAN | 28 |
| IV. 1 | Hasil..... | 28 |
| IV.1.1 | Luas Lahan Sawah | 28 |
| IV.1.2 | Analisis Parameter yang Digunakan | 31 |
| IV.1.3 | Simulasi pemodelan sistem dengan menggunakan skenario kebijakan ... | 43 |
| IV.1.4 | Validasi Model Sistem Dinamik | 47 |
| IV.2 | Pembahasan..... | 49 |
| BAB V | PENUTUP..... | 52 |
| V.1 | Kesimpulan..... | 52 |
| V.2 | Saran..... | 53 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 54 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1 Sumber Emisi Non CO ₂ Sektor Pertanian | 10 |
| Gambar 2.2 Suhu Permukaan Rata-Rata Global | 12 |
| Gambar 2.3 Sistem Terbuka | 14 |
| Gambar 2.4 Sistem Tertutup | 14 |
| Gambar 2.5 Model Proses Sistem Dinamika | 16 |
| Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian | 22 |
| Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian..... | 25 |
| Gambar 4.1 Tutupan Lahan Sawah Kabupaten Bone..... | 28 |
| Gambar 4.2 Luas Lahan Sawah di Kabupaten Bone Tahun 2011-2020..... | 29 |
| Gambar 4.3 Causal Loop Diagram Emisi Lahan Sawah | 32 |
| Gambar 4.4 Stock Flow Diagram Emisi Lahan Sawah | 35 |
| Gambar 4.5 Grafik total emisi sawah..... | 36 |
| Gambar 4.6 Total emisi sawah menggunakan skenario indeks pertanaman | 37 |
| Gambar 4.7 Total emisi sawah menggunakan skenario penggunaan pupuk | 39 |
| Gambar 4.8 Grafik data aktual dan simulasi tahun 2020..... | 41 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Nilai GWP GRK..... | 11 |
| Tabel 2.2 Simbol-simbol <i>SFD</i> sistem dinamik..... | 16 |
| Tabel 4.1 Luas lahan sawah Kabupaten Bone | 28 |
| Tabel 4.2 Total emisi tahun 2011 – 2030 | 36 |
| Tabel 4.3 Total emisi sawah menggunakan skenario indeks pertanaman | 38 |
| Tabel 4.4 Total emisi sawah menggunakan skenario penggunaan pupuk..... | 39 |
| Tabel 4.5 Luas sawah tahun 2020 | 41 |

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai negara agraris karena sebagian besar wilayahnya merupakan lahan pertanian. Sawah sebagai salah satu sektor pertanian yang penting karena menghasilkan beras yang merupakan makanan pokok sehari-hari bagi masyarakat Indonesia. Maka dari itu, permintaan beras akan selalu meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk (Rahmawati dkk., 2015). Pertumbuhan penduduk Indonesia telah mencapai 270.203.917 jiwa pada tahun 2020. Produksi beras di Indonesia mencapai 31.627.132 ton. Sulawesi Selatan sebagai salah satu dari empat provinsi penghasil beras terbesar di Indonesia dengan produksi 2.670.814 ton (BPS, 2021).

Di balik upaya peningkatan produksi beras dalam jumlah besar, terdapat permasalahan pada beberapa kegiatan produktivitas lahan sawah yaitu sebagai sumber emisi gas rumah kaca (GRK) (Tian, Z., dkk., 2017). Sektor pertanian menghasilkan sekitar 10-12% dari total emisi gas rumah kaca global, yaitu 40% CH₄ dan 60% N₂O. (IPCC, 2013). Salah satu penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Tian, Z., *et al.* (2017), menghasilkan bahwa budidaya padi merupakan salah satu sumber utama emisi antropogenik metana (CH₄) dan nitrous oxide (N₂O). Beras dan gas rumah kaca merupakan produk gabungan dari budidaya sawah dan ada hubungan yang kompleks

antara pertumbuhan padi dan emisi gas rumah kaca. Dinamika pertumbuhan tanaman juga mempengaruhi mineral tanah melalui serapan tanaman, sehingga secara tidak langsung mempengaruhi emisi N₂O (Wibowo, 2018).

Gas rumah kaca terbentuk secara alami maupun hasil dari aktivitas manusia yang mendorong bertambahnya konsentrasi emisi gas rumah kaca di atmosfer. Sehingga hal tersebut menyebabkan timbulnya pemanasan global dan perubahan iklim (KLHK, 2018). Pemanasan global ini terjadi karena meningkatnya emisi gas rumah kaca seperti metana (CH₄), karbondioksida (CO₂), nitrogen oksida (N₂O) dan gas lainnya secara berlebihan di atmosfer, sehingga cahaya matahari yang dipantulkan bumi akan diteruskan ke luar angkasa, namun sebagian besar dipantulkan kembali ke bumi oleh gas rumah kaca yang terbentuk di atmosfer yang akan meningkatkan temperatur bumi (Latuconsina, 2010).

Kabupaten Bone merupakan kabupaten yang memiliki luas lahan sawah terbesar di Sulawesi Selatan. Data ATR-BPN merilis pada tahun 2020, luas lahan sawah Kabupaten Bone sebesar 117.842 ha. Penelitian ini dilakukan di Kabupaten Bone karena luasnya sawah Kabupaten Bone dibanding kabupaten sekitarnya, dimana penyumbang emisi GRK untuk sektor pertanian padi sangat dipengaruhi oleh luas lahan sawahnya (Sasmita, dkk., 2021).

Indonesia menjadi bagian dalam *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) pada konvensi perubahan iklim yang memiliki komitmen dalam penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) (BLP, 2020). Pertemuan para negara pihak UNFCCC yang ke-21 telah diselenggarakan di Paris, 30 November-12 Desember

2015. Pada pertemuan ini negara pihak telah menyepakati untuk mengadopsi keputusan yaitu Paris Agreement yang bertujuan untuk menahan peningkatan temperatur rata-rata global. Dengan mempertimbangkan kondisi nasional berbeda-beda, kemudian dibuat Nationally Determined Contribution (NDC) yaitu sebuah dokumen aksi mitigasi atau rencana penurunan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari setiap negara.

Terdapat 172 negara meratifikasi Paris Agreement termasuk Indonesia pada tanggal 22 April 2016 yang kemudian diratifikasi menjadi Undang-Undang Republik Indonesia nomor 16 tahun 2016 tentang pengesahan Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change (Persetujuan Paris atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai Perubahan Iklim), dimana memuat tentang kontribusi yang ditetapkan secara nasional mencakup aspek mitigasi dan adaptasi yang akan dicapai antara lain melalui sektor kehutanan, energi termasuk transportasi, limbah, proses industri dan penggunaan produk, dan pertanian. Melalui Perjanjian Paris, Indonesia merencanakan target pengurangan emisi GRK dalam Nationally Determined Contribution (NDC) sebesar 29% dengan upaya sendiri dan 41% dengan dukungan internasional. Kebijakan ini telah tertuang dalam Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN GRK) (Windyswara, 2019).

Pada tahun 2020 Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) memperkenalkan paradigma pembangunan baru yang disebut Pembangunan Rendah Karbon (PRK) yang merupakan transformasi dari RAN GRK. PRK bertujuan untuk menciptakan pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan sosial, selaras dengan

kelestarian lingkungan melalui pertimbangan daya dukung dan daya tampung dalam perumusan kebijakan dan perencanaan pembangunan. PRK merupakan salah satu Program Prioritas dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024.

Pembangunan Rendah Karbon tidak hanya pada tingkat pusat, namun juga sampai tingkat provinsi. Tercatat 4 (empat) provinsi telah menandatangani Nota Kesepahaman PRK dengan Bappenas. Provinsi Sulawesi Selatan merupakan provinsi percontohan pertama yang menandatangani nota kesepahaman tersebut untuk menunjukkan komitmen provinsi Sulawesi Selatan menjaga kelestarian lingkungan tanpa mengabaikan pembangunan. Komitmennya dibuktikan dengan terbitnya Peraturan Gubernur No 11/2020 tentang Perubahan Peraturan Gubernur No 59/2012 mengenai Rencana Aksi Daerah - Gas Rumah Kaca. PRK juga telah terintegrasi ke dalam dokumen perencanaan daerah, RPJMD Sulawesi Selatan 2018-2023 (Bappenas, 2020).

Strategi pengambilan keputusan sebagai bentuk aksi mitigasi dalam penurunan emisi khususnya sektor pertanian menjadi sangat diperlukan (Suryani, dkk., 2010). Pendekatan dinamika sebagai pendukung pembuat kebijakan dalam memahami hubungan kompleks antara parameter sebagai upaya strategi mitigasi pertumbuhan emisi (Jatmiko, dkk., 2019).

Beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan dalam menghitung emisi dengan menggunakan pemodelan sistem dinamik yaitu Tian, et al., (2018) yang meneliti tentang skenario pengelolaan air dan pupuk pada lahan sawah yang dapat menyebabkan pengurangan emisi CH₄ dan N₂O yang signifikan tanpa menyebabkan

pengurangan produksi beras. Selanjutnya Ku, dkk., (2017) meneliti tentang praktik pengelolaan air dan pupuk yang efisien dengan memperhitungkan efek musiman untuk mengurangi gas rumah kaca anpa mengurangi hasil dalam sistem padi tanam ganda.

Berdasarkan permasalahan yang telah dijelaskan sebelumnya, maka perlu dilakukan upaya dengan melakukan pemodelan emisi gas rumah kaca menggunakan sistem dinamik dan analisis intervensi kebijakan guna mendukung perencanaan penurunan emisi gas rumah kaca.

I.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah :

1. Berapa besar luas lahan sawah Kabupaten Bone tahun 2011 – 2020 ?
2. Bagaimana analisis parameter dan keterkaitan antar parameter dalam pemodelan sistem dinamik ?
3. Bagaimana menentukan besar emisi gas rumah kaca yang ditimbulkan oleh lahan sawah melalui pemodelan sistem dinamik ?

I.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah memodelkan emisi gas rumah kaca pada lahan sawah menggunakan sistem dinamik dengan beberapa parameter dan melakukan simulasi pemodelan emisi gas rumah kaca pada lahan sawah dengan menggunakan skenario kebijakan.

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan luas lahan sawah Kabupaten Bone tahun 2011 - 2020
2. Menganalisis parameter dan keterkaitan antar parameter dalam pemodelan sistem dinamik
3. Menentukan besar emisi gas rumah kaca yang ditimbulkan oleh lahan sawah melalui pemodelan sistem dinamik

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Gas Rumah Kaca

Istilah Gas Rumah Kaca berkembang seiring dengan perubahan iklim dan pemanasan global yang kini dampaknya telah dirasakan di berbagai wilayah Indonesia. Namun masih banyak masyarakat luas yang belum memahami secara tepat apa itu gas rumah kaca. Hingga ada yang memberi makna dan memaknai bahwa gas rumah kaca adalah gas yang dihasilkan oleh gedung-gedung tinggi berkaca di kota-kota besar. Disampaikan para ahli, istilah gas rumah kaca menggambarkan fungsi atmosfer bumi seperti kaca pada bangunan rumah kaca dalam praktek budidaya tanaman.

Atmosfer melewati cahaya matahari ke bumi dan menghangatkan permukaan bumi sehingga bumi dapat ditinggali makhluk hidup. Hal ini dapat terjadi karena adanya gas-gas di atmosfer yang mampu menyerap dan memancarkan kembali radiasi infra merah. Gas yang berada di atmosfer yang bersifat seperti rumah kaca disebut gas rumah kaca (Sinthiya dan Kusnadi, 2018).

Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan gas yang terdapat di atmosfer, menyerap dan memancarkan radiasi inframerah dari matahari. Gas rumah kaca dapat terbentuk baik secara alami maupun akibat aktivitas manusia (*anthropogenic*) (Jatmiko, 2019). Suhu panas yang terkandung dalam inframerah dan terperangkap dalam gas rumah

kaca akan mengakibatkan peningkatan suhu permukaan bumi hingga menyebabkan perubahan iklim (Wahyudi, 2016).

Konsentrasi gas di udara naik sebesar satu per tiga dari sebelumnya 200 tahun belakangan ini. Suhu udara menjadi semakin meningkat dari 0.5 hingga 1 derajat celcius. Apabila hal ini tidak segera diatasi, kenaikannya diperkirakan mencapai 2 sampai 6 derajat celcius di abad ke 21 ini. Adanya pembakaran hutan dan penggundulan yang berlangsung beberapa tahun belakangan ini, memberi sumbangan besar pada peningkatan gas-gas di atmosfer. Dampaknya pun saat ini sudah dirasakan hamper sepanjang tahun, contohnya adalah polusi udara. Selain itu, dampak yang lebih mencemaskan adalah memungkinkan adanya peningkatan air laut sehingga dapat menggenangi Kawasan yang ada di dataran rendah (Sinthiya dan Kusnadi, 2018).

Jenis-jenis gas pada gas rumah kaca diantaranya adalah karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), nitrogen oksida (N_2O), kelompok aldehid, gas-gas terflorinasi (HFCs, PFCs, dan SF_6), uap air dan ozon (O_3) (Uyigüe, dkk., 2010). Walaupun gas-gas rumah kaca terdapat secara alami di atmosfer bumi, namun aktivitas manusia telah meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer (IPCC, 2013).

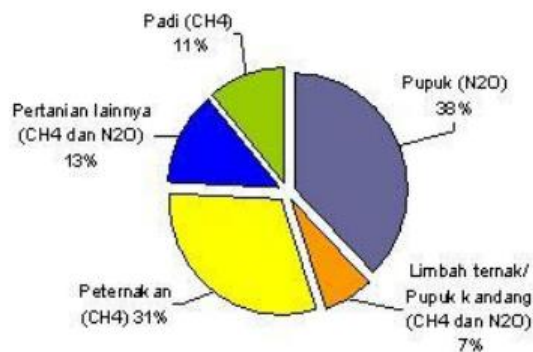
II.1.1 Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Pertanian

Pertanian utamanya pada subsektor tanaman pangan sangat rentan terhadap curah hujan karena umumnya merupakan tanaman musiman yang sensitive pada kelebihan dan kekurangan air. Namun sektor pertanian tidak hanya rentan dengan

perubahan pola curah hujan dan dampak perubahan iklim, tapi juga terhadap 14% emisi gas rumah kaca global (FAO, 2017)

Emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian mengalami peningkatan sebesar 10% antara tahun 1990-2000. Sektor pertanian menyumbang kurang lebih 14% dari total emisi gas rumah kaca dunia. Banyaknya kegiatan pertanian menjadi pemicu peningkatan emisi sektor pertanian yang bersumber dari penggunaan pupuk, peternakan, pembakaran sabana dan sisa pertanian serta budidaya padi sawah. Penggunaan pupuk menjadi sumber emisi terbesar bagi sektor pertanian yaitu sebesar 38%. Pada proses nitrifikasi dan denitrifikasi tanah melepaskan N_2O . Peningkatan kadar N_2O dipengaruhi baik dari pupuk organik maupun anorganik. Sedangkan pada budidaya padi sawah melepaskan sekitar 11% emisi karena pada penggenangan sawah, bahan organik terdekomposisi secara anaerob sehingga menghasilkan gas metana yang tinggi (Utaminingsih dan Hidayah, 2012).

Selain itu, penggunaan pupuk kandang baik dari proses pembuatan hingga penyimpanan menghasilkan 7% emisi sektor pertanian (Subagyono, K. dan Surmaini, E., 2007). Berbagai sumber emisi sektor pertanian, seperti pupuk (38%), padi (11%), Limbah ternak/pupuk kandang (7%), Peternakan (31%) dan pertanian lainnya (13%) seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Hasil kalkulasi emisi gas rumah kaca pada sektor pertanian di Indonesia oleh country study tahun 1990 memperlihatkan bahwa emisi gas rumah kaca terbesar adalah gas CH_4 (85.6%), N_2O (13,4%), kemudian sisanya adalah CO dan NO_x . Gas metana terbesar berasal dari padi sawah yaitu sebesar 2758 Gg (75.6%) (Utaminingsih dan Hidayah, 2012).



Gambar 2.1 Sumber Emisi Non CO₂ Sektor Pertanian (WRI dalam Utaminingsih, W., 2012)

Persamaan umum pendugaan emisi gas rumah kaca secara umum ditulis dalam bentuk persamaan berikut :

$$Emisi\ GRK = AD \times EF$$

Dimana AD adalah data aktivitas yaitu data kegiatan pembangunan atau aktivitas manusia yang menghasilkan emisi atau serapan gas rumah kaca dan EF adalah faktor emisi atau serapan gas rumah kaca yang menunjukkan besarnya emisi per satuan unit kegiatan yang dilakukan. Misalnya salah satu kegiatan manusia yang menimbulkan emisi adalah kegiatan pertanian untuk memproduksi padi. Dalam kasus ini data aktivitas yang digunakan adalah luas penanaman padi (dalam satuan hektar) yang dilakukan setiap tahun. Apabila dari hasil pengukuran emisi metan di lahan sawah pada beberapa titik contoh diperoleh factor emisi sebesar 10 Gg CH₄ per hektar per tahun. Apabila pada tahun 2012 dilaporkan luas kegiatan penanaman padi ialah seluar 100 ha, maka besarnya emisi metan tahun 2012 ialah sebesar $100 * 10 = 1000$ Gg CH₄ (1 Gg = 109 gram).

Persamaan untuk memperkirakan emisi CH₄ dari budidaya padi ditunjukkan pada Persamaan 2.2. Emisi CH₄ diperkirakan dengan mengalikan faktor emisi harian dengan periode budidaya padi dan luas panen tahunan. bentuk yang paling sederhana, persamaan ini diimplementasikan dengan menggunakan data aktivitas nasional (yaitu, rata-rata masa tanam padi nasional dan luas panen) dan faktor emisi tunggal. Namun, kondisi alam dan pengelolaan pertanian produksi beras mungkin sangat bervariasi dalam suatu negara. Ini adalah praktik yang baik untuk memperhitungkan variabilitas ini dengan memisahkan total luas panen nasional ke dalam sub-unit (misalnya, area panen di bawah rezim air yang berbeda). Luas panen untuk setiap sub-unit dikalikan dengan periode budidaya masing-masing dan faktor emisi yang mewakili kondisi yang menentukan sub-unit (Sass (2002) dalam IPCC (2019)). Dengan pendekatan terpilah ini, total emisi tahunan sama dengan jumlah emisi dari setiap sub-unit area panen.

$$CH_4_{padi} = \sum_{i,j,k} (FE_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \times 10^{-6}) \quad (2.1)$$

$$FE_{i,j,k} = FE_c \times SF_w \times SF_p \times Sf_0 \times SF_s \times SF_r \quad (2.2)$$

Dimana CH_4_{padi} merupakan emisi CH₄ dari lahan sawah (Gg CH₄ tahun-1), $FE_{i,j,k}$ adalah faktor emisi dari pada kondisi tertentu (kg CH₄ ha-1 hari-1), $t_{i,j,k}$ adalah periode tanam pada saat kondisi tertentu (hari), $A_{i,j,k}$ adalah luas panen lahan sawah kondisi tertentu (ha tahun-1), variabel i, j, dan k merepresentasikan kondisi lahan dengan ekosistem berbeda, kondisi pengaturan air, jenis dan tipe bahan organik dan kondisi lainnya yang mempengaruhi terbentuknya emisi CH₄, FE_c adalah Faktor emisi baseline untuk padi sawah dengan irigasi terus menerus dan tanpa pengembalian bahan

organik, menggunakan Tier 2 yaitu 1,61 kg ha⁻¹ hari⁻¹. SF_w (Faktor skala berbagai tipe pengairan). Faktor skala pengairan irigasi dengan penggenangan terus menerus sebesar 1 (satu), SF_p adalah (faktor skala rejim air sebelum tanam) membagi faktor skala rejim air sebelum tanam berdasarkan jumlah hari dimana lahan sawah tidak tergenang air (IPCC, 2019)

II.2 Global Warming Potential (GWP)

Tiap jenis emisi gas rumah kaca memiliki dampak yang berbeda pada pemanasan global, bergantung pada kemampuan gas menyerap energi dan estimasi waktu gas tersebut untuk bertahan di atmosfer. *Global Warming Potential* dikembangkan untuk menjadi perbandingan dampak pemanasan global dari masing-masing jenis gas. *Global Warming Potential* merupakan ukuran seberapa banyak energi yang akan diserap oleh 1 ton emisi gas rumah kaca dalam satu periode tertentu. Semakin besar *Global Warming Potential*, maka semakin besar kontribusi gas tersebut pada pemanasan global. Nilai *Global Warming Potential* ini yang digunakan untuk mengkonversi data non-CO₂ menjadi data emisi CO₂ ekuivalen. Apabila emisi CH₄ dikali dengan 21 dan emisi N₂O dikali dengan 310, maka hasilnya dapat dijumlahkan dengan emisi CO₂ sehingga menjadi CO₂ ekuivalen. Nilai ini dapat berubah sesuai dengan kesepakatan nasional (KESDM, 2018).

Tabel 2.1 Nilai GWP GRK (IPCC, 1995)

| Jenis | GWP |
|-----------------|------------|
| Karbondioksida | 1 |
| Metana | 21 |
| Nitrogen Oksida | 310 |

Indeks emisi gas rumah kaca pada hasil padi yang digunakan untuk menentukan potensi gas rumah kaca yang dihasilkan pada satu satuan produksi padi untuk menduga besarnya emisi gas rumah kaca dari satu wilayah (Utaminingsih dan Hidayah, 2012).

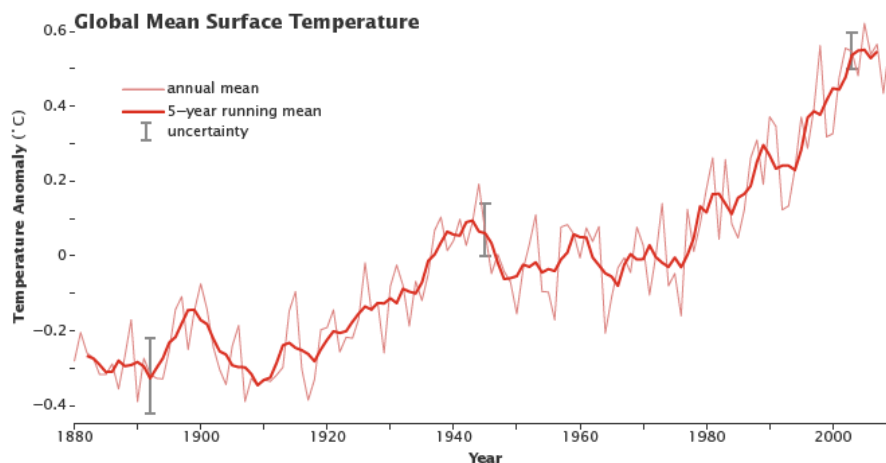
II.3 Perubahan Iklim

Perubahan iklim menjadi isu penting yang banyak dibicarakan di tingkat dunia saat ini. Iklim bumi berubah sangat cepat karena adanya peningkatan emisi gas rumah kaca. Hal ini dapat menimbulkan efek rumah kaca di atmosfer. Efek rumah kaca menyebabkan pelepasan panas terhambat dan terjadi penumpukan gas-gas rumah kaca di atmosfer hingga menghambat pantulan radiasi matahari dari permukaan bumi ke luar angkasa. Gas-gas yang termasuk gas rumah kaca yaitu metana (CH_4), karbondioksida (CO_2), nitrit oksida (N_2O), sulfat heksafluorida (SF_6), Perfluorokarbon (PFC) dan hidrofluorokarbon (HFC). Gas-gas itulah yang menyebabkan perubahan iklim di bumi (Subagyono dan Surmaini, 2007).

Konsentrasi GRK di atmosfer mampu menyerap sinar inframerah yang dipantulkan bumi sehingga meningkatkan efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Permasalahan ini berkaitan dengan waktu tinggal gas rumah kaca

di atmosfer, dimana makin panjang waktu tinggal gas rumah kaca dalam atmosfer maka akan semakin efektif pula pengaruhnya terhadap peningkatan temperatur bumi. (Latuconsina, 2010).

Menurut Konvensi Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim (*United Nation Framework Convention on Climate Change/UNFCCC*), sistem iklim dengan perubahan iklim didefinisikan sebagai totalitas atmosfer, hidrosfer, biosfer, dan geosfer dengan interaksinya. Sedangkan perubahan iklim yaitu dipengaruhi langsung atau tidak langsung oleh aktivitas manusia dan mengubah komposisi atmosfer, yang akan memperbesar keragaman iklim pada periode yang cukup panjang. Perubahan iklim terutama disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi CO₂ dan macam-macam jenis gas rumah kaca lainnya. Meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca merupakan akibat dari sejumlah aktivitas antropogenik, terutama akibat dari pembakaran bahan bakar fosil, hutan, pertanian dan lainnya (Fauziawan, dkk., 2020).



Gambar 2.2 Suhu Permukaan Rata-Rata Global (Riebeek, 2010)

Pemanasan global terjadi karena peningkatan temperatur global. Hal ini karena terjadinya efek rumah kaca yang disebabkan oleh meningkatnya emisi gas-gas seperti metana (CH₄), karbondioksida (CO₂), nitrogen oksida (N₂O) dan klorofluokarbon (CFC) sehingga energi matahari terperangkap di atmosfer bumi. Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa suhu bumi dari tahun ke tahun terus mengalami peningkatan. Pemanasan global lebih cepat terjadi karena aktivitas manusia yang membuat jumlah emisi gas rumah kaca berlebih terlepas ke atmosfer (Anggraeni, 2015).

II.4 Sistem Dinamika

Sistem merupakan kumpulan objek yang bekerja sama dan saling berinteraksi dalam mencapai tujuan dalam suatu lingkungan. Ruth dan Hannon (1997) menyebutkan bahwa sistem terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

1. Sistem Terbuka (*Open System*)

Sistem terbuka (*Open System*) merupakan sebuah output yang menjadi respon dari input dimana output tidak ada pengaruhnya terhadap input. Sistem terbuka ini, aksi sebelumnya (*past action*) tidak bisa mengontrol aksi yang akan datang (*future action*) (Gambar 2.3).

2. Sistem Tertutup (*Closed System*)

Sistem tertutup (*closed system*) dapat juga disebut *feedback system* yaitu yang dipengaruhi oleh perilaku sebelumnya. Aksi sebelumnya dapat kembali mengontrol aksi yang akan datang (Gambar 2.4).

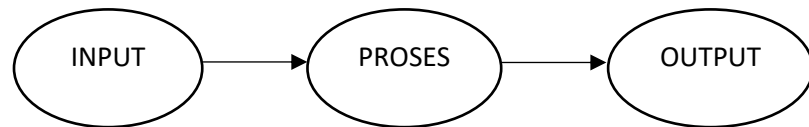
Ada dua kategori *feedback system*, diantaranya:

a. *Negative Feedback System*

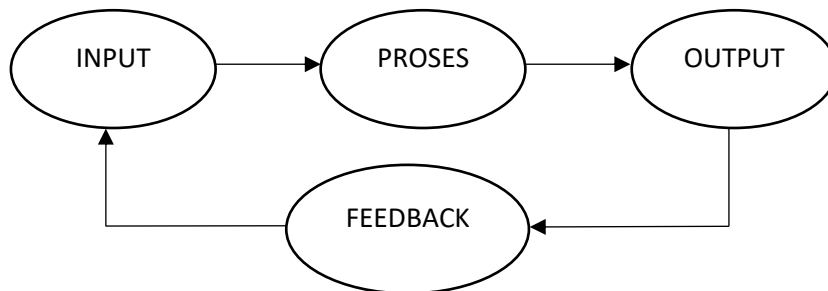
Yaitu mencari respon serta tujuan sebagai konsekuensi dari kegagalan dalam mencapai tujuan.

b. *Positive Feedback System*

Yaitu meningkatkan proses-proses pertumbuhan aksi yang dihasilkan dapat membangkitkan aksi yang lebih besar dari aksi sebelumnya. Hingga dapat mengontrol aksi berdasarkan hasil-hasil dari aksi sebelumnya.



Gambar 2.3 Sistem Terbuka



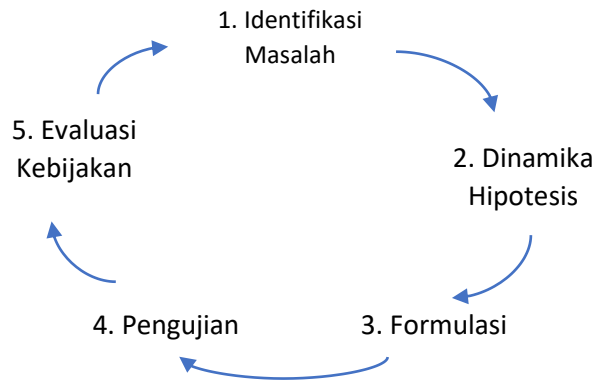
Gambar 2.4 Sistem Tertutup

Sistem dinamika merupakan pendekatan dengan bantuan komputer untuk menganalisis kebijakan dan pengambilan keputusan. Simulasi dinamika sistem adalah simulasi berkelanjutan yang dikembangkan oleh Jay Forrester (MIT) pada tahun 1960-an, dengan fokus pada struktur dan perilaku sistem yang terdiri dari interaksi antara

variabel dan loop umpan balik. Hubungan dan interaksi antara variabel dinyatakan dalam diagram terpusat. Proses umpan balik dapat dikelompokkan menjadi dua bagian (Suryani, 2006).

1. Umpan balik positif, yaitu menciptakan proses pertumbuhan, di mana suatu peristiwa dapat menyebabkan konsekuensi yang akan meningkatkan kejadian berikutnya terus menerus. Umpan balik ini dapat menyebabkan ketidakstabilan, ketidakseimbangan, dan terus menerus pertumbuhan. Contoh: sistem pertumbuhan penduduk.
2. Umpan balik negatif, yaitu menciptakan keseimbangan dengan memberikan koreksi agar tujuan dapat tercapai. Contoh: sistem pengatur suhu ruangan.


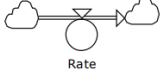

Lima langkah yang dikemukakan Sterman (2000) tentang pemodelan dinamis sebagai proses umpan balik loop atau siklus iteratif melalui model (Gambar 2.5). Proses yang dilakukan dibangun dengan tujuan merancang strategi dan keputusan baru untuk mengatasi masalah yang kompleks. Pertama, mengidentifikasi masalah yang akan dibahas. Kedua, dinamika hipotesis untuk menjelaskan proses umpan balik dan struktur aliran dalam sistem. Ketiga, merumuskan model simulasi menggunakan persamaan dan parameter. Keempat, pengujian yang bertujuan untuk membandingkan keakuratan model dengan sistem nyata. Kelima, evaluasi yang meliputi perumusan pembuatan strategi dan aturan pengambilan keputusan oleh jangkauan kepentingan dalam sistem.





Gambar 2.5 Model proses sistem dinamik (Suryani, 2006)

Pada model, variabel-variabel dihubungkan hingga membentuk suatu sistem yang menirukan kondisi sebenarnya. *Stock Flow Diagram (SFD)* yaitu akumulasi aliran dari informasi yang terdapat dalam suatu sistem (Sterman, 2000). *Stock Flow Diagram* ialah terjemahan dari *Causal Loop Diagram* menjadi hubungan *stock – flow* yang dapat dimengerti oleh komputer (Tarida, 2014). Beberapa simbol-simbol *Stock Flow Diagram* yang digunakan dalam pemodelan sistem dinamik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2.2 Simbol-simbol *SFD* sistem dinamik (Pruyt, 2013)

| No. | Simbol | Keterangan |
|-----|--|--|
| 1. |  level | Variabel level atau stok. Variabel ini merupakan akumulasi dari aliran |
| 2. |  Rate | Variabel flow/rate merupakan aliran masuk dan keluar dari level yang akan merubah kondisi level |
| 3. |  Auxiliary | Variabel Auxiliary adalah variabel membantu menyederhanakan hubungan sesuai dengan kondisi nyata atau konsep |

| | | |
|----|---|---|
| 4. |  Constant | Variabel Constant digunakan untuk membatu auxiliary menjadi lebih jelas |
| 5. |  | Causal link digunakan untuk menghubungkan antar variabel |

II.5 Simulasi

Suryani (2006) menyebutkan beberapa pengertian simulasi menurut para ahli yaitu:

1. Hoover dan Perry (1990) Simulasi merupakan proses perancangan model matematis atau logis dari sistem nyata, melakukan eksperimen terhadap model dengan menggunakan computer untuk menggambarkan, menjelaskan dan memprediksi perilaku sistem.
2. Law, Kelton, and Kelton (1991) Simulasi didefinisikan sebagai sekumpulan metode dan aplikasi untuk menirukan atau merepresentasikan perilaku dari suatu sistem nyata, yang biasanya dilakukan pada komputer dengan menggunakan perangkat lunak tertentu.
3. Khoshnevis (1994) Simulasi merupakan proses aplikasi membangun model dari sistem nyata atau usulan sistem, melakukan eksperimen dengan model tersebut untuk menjelaskan perilaku sistem, mempelajari kinerja sistem atau untuk membangun sistem baru sesuai dengan kinerja yang diinginkan.

Simulasi merupakan tool yang cukup fleksibel untuk memecahkan masalah yang sulit untuk dipecahkan dengan model matematis biasa. Model simulasi sangat efektif digunakan untuk sistem yang relatif kompleks untuk pemecahan analitis dari model

tersebut. Penggunaan simulasi akan memberikan wawasan yang lebih luas pada pihak manajemen dalam menyelesaikan suatu masalah. Oleh karena itu manfaat yang didapat dengan menggunakan metode simulasi adalah sebagai tool bagi perancang sistem atau pembuat keputusan, dalam hal ini manajer untuk menciptakan sistem dengan kinerja tertentu baik dalam tahap perancangan sistem (untuk sistem yang masih berupa usulan) maupun tahap operasional (untuk sistem yang sudah berjalan). Berbagai kelebihan yang bisa diperoleh dengan memanfaatkan simulasi, yaitu sebagai berikut :

1. Tidak semua sistem dapat direpresentasikan dalam model matematis, simulasi merupakan alternatif yang tepat.
2. Dapat bereksperimen tanpa adanya resiko pada sistem nyata. Dengan simulasi memungkinkan untuk melakukan percobaan terhadap sistem tanpa harus menanggung risiko terhadap sistem yang berjalan.
3. Simulasi dapat mengestimasi kinerja sistem pada kondisi tertentu dan memberikan alternatif desain terbaik sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.
4. Simulasi memungkinkan untuk melakukan studi jangka panjang dalam waktu relatif singkat.
5. Dapat menggunakan input data bervariasi

II.7 Tutupan Lahan

Tutupan lahan merupakan kenampakan fisik permukaan bumi. Tutupan lahan menggambarkan keterkaitan pada proses alami dan proses social. Selain itu juga dapat

menyediakan informasi yang sangat penting sebagai keperluan pemodelan serta dapat memahami fenomena alam yang terjadi di permukaan bumi (Sampurno dan Thoriq, 2016).

Tutupan lahan adalah data dan informasi strategis Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang selalu mengalami perubahan. Beberapa faktor penyebab perubahan tutupan lahan antara lain, konversi lahan, pembukaan lahan perkebunan, penambahan penduduk dan perubahan fungsi Kawasan hutan menjadi areal untuk penggunaan lahan lain (Kesaulija, dkk., 2020).

Penggunaan/penutupan lahan adalah wujud dari pengaruh aktivitas manusia terhadap fisik permukaan bumi. Tutupan lahan suatu wilayah berhubungan dengan jumlah penduduk dan aktivitas-aktivitas yang dilakukannya. Semakin tinggi jumlah penduduk dan semakin aktif aktivitasnya pada suatu tempat, maka akan meningkatkan perubahan tutupan lahan. Lahan merupakan suatu lingkungan fisik yang terdiri dari tanah, relief, hidrologi, iklim dan vegetasi dimana factor-faktor tersebut mempengaruhi potensi penggunaannya. Di dalamnya termasuk akibat dari banyak kegiatan manusia seperti penebangan hutan, reklamasi pantai dan lain-lain (Hardjowigeno dan Widiatmaka, 2001).

Sistem penggunaan/penutupan lahan dibagi menjadi dua kelompok, yaitu penggunaan/penutupan lahan pertanian dan non pertanian. Tutupan lahan pertanian diantaranya sawah, tegalan, ladang, padang rumput, kebun, hutan produksi, hutan lindung dan sebagainya. Sedangkan tutupan lahan non pertanian diantaranya perkotaan atau pedesaan, rekreasi, pertambangan, industry dan lain-lain (Arsyad, 1989).

Menurut Sitorus (2006), klasifikasi tutupan lahan merupakan upaya pengelompokan berbagai macam penutup/penggunaan lahan ke dalam suatu kesamaan sesuai sistem tertentu. Klasifikasi tutupan lahan ini sebagai acuan maupun pedoman dalam proses interpretasi citra di dalam penginderaan jauh yang bertujuan untuk pemetaan penutup/penggunaan lahan. Sistem klasifikasi penutup/penggunaan lahan telah banyak dikembangkan dan dilatarbelakangi oleh berbagai macam kepentingan tertentu. Pemetaan pada penutup/penggunaan lahan berhubungan dengan studi vegetasi, tanah dari biosfer dan tanaman pertanian. Data penggunaan/penutup lahan penting sebagai *planner* yang mengharuskan membuat keputusan dalam pengelolaan sumber daya lahan (Lo, 1995).

Perubahan penggunaan lahan adalah fenomena global yang jadi perhatian peneliti. Kajian tentang hal ini berkembang sangat cepat (Santun, dkk., 2012). Perubahan penggunaan lahan ini terdapat enam aspek yang harus diperhatikan, yaitu cakupan analisis, dinamika silang-skala (*cross-scale*), faktor pemicu, interaksi spasial dan dampak kedekatan lokasi, dinamika antar waktu dan proses penggabungan (Verburg, dkk., 2004).