



TESIS - IS185401

**PENGEMBANGAN MODEL SISTEM DINAMIK UNTUK MITIGASI
EMISI GAS RUMAH KACA PADA PRODUKTIVITAS LAHAN
SAWAH (STUDI KASUS: PROVINSI JAWA TIMUR)**

ANDRIYAN RIZKI JATMIKO

NRP. 05211750012020

DOSEN PEMBIMBING:

Erma Suryani, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197004272005012001

Departemen Sistem Informasi

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



TESIS - IS185401

**DEVELOPMENT OF SYSTEM DYNAMIC MODELS FOR
MITIGATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE RICE
FIELD PRODUCTIVITY (CASE STUDY: EAST JAVA PROVINCE)**

ANDRIYAN RIZKI JATMIKO

NRP. 05211750012020

DOSEN PEMBIMBING:

Erma Suryani, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197004272005012001

Department of Information Systems

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Komputer (M.Kom)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ANDRIYAN RIZKI JATMIKO

NRP: 05211750012020

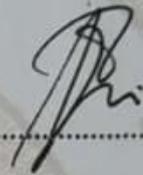
Tanggal Ujian: 13 Januari 2020

Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:

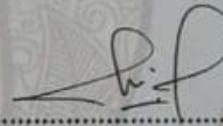
Pembimbing:

1. Erma Suryani, S.T, M.T, Ph.D
NIP: 197004272005012001

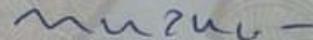

.....

Penguji:

1. Mahendrawathi ER, S.T., M.Sc, Ph.D
NIP: 197610112006042001


.....

2. Dr. Mudjahidin, S.T.,M.T
NIP: 197010102003121001


.....

Kepala Departemen Sistem Informasi
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas



Dr. Mudjahidin, S.T.,M.T

NIP: 197010102003121001

(Halaman sengaja dikosongkan)

**PENGEMBANGAN MODEL SISTEM DINAMIK UNTUK
MITIGASI EMISI GAS RUMAH KACA PADA
PRODUKTIVITAS LAHAN SAWAH (STUDI KASUS:
PROVINSI JAWA TIMUR)**

Nama Mahasiswa : Andriyan Rizki Jatmiko
NRP : 05211750012020
Dosen Pembimbing : Erma Suryani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Luas sawah di Indonesia pada tahun 2016 mencapai 8,19 juta hektar (ha), meningkat 1,16% dari tahun sebelumnya, jumlah ini terdiri dari 4,78 juta hektar sawah irigasi dan 3,4 juta hektar sawah non-irigasi. Pada 2017, terutama di Jawa Timur, area panen 2.278.460 hektar, dan produksi beras 13.633.701 ton. Dengan tingginya permintaan beras sebagai makanan pokok, pemerintah terus melakukan upaya peningkatan produksi beras. Di sisi lain, peningkatan kegiatan pertanian juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi yang dapat memicu perubahan iklim melalui gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan. Efek samping dari akumulasi gas rumah kaca dapat menyebabkan perubahan iklim ekstrem yang mempengaruhi produktivitas lahan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengurangi laju pertumbuhan emisi GRK khususnya CO₂, CH₄ dan N₂O pada produktivitas lahan namun tidak mengurangi nilai dari produktivitas lahan tersebut. Dalam penelitian ini, proses produktivitas lahan dimodelkan dengan menggunakan sistem dinamik untuk menganalisa kondisi saat ini dan mengevaluasi permasalahan yang ada. Model kemudian disimulasikan untuk mendapatkan skenario terbaik guna mengurangi emisi GRK. Model memuat informasi GRK yang dihasilkan dari produktivitas lahan sawah sehingga dapat digunakan sebagai pertimbangan bagi pemerintah dan pemangku kepentingan sebagai referensi untuk membuat kebijakan teknologi mitigasi emisi GRK sebagai bagian dari *smart agriculture*. Hasil penelitian ini adalah skenario simulasi model yang dilakukan pada kurun waktu 2007 hingga 2030 untuk menekan laju emisi CH₄ sebesar 7%, emisi CO₂ sebesar 10% dan emisi N₂O sebesar 1%.

Kata kunci: mitigasi gas rumah kaca, simulasi, sistem dinamik

(Halaman sengaja dikosongkan)

DEVELOPMENT OF SYSTEM DYNAMIC MODELS FOR MITIGATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE RICE FIELD PRODUCTIVITY (CASE STUDY: EAST JAVA PROVINCE)

Student Name : Andriyan Rizki Jatmiko
Student Number : 05211750012020
Supervisor : Erma Suryani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Paddy fields in Indonesia in 2016 reached 8.19 million hectares (ha), an increase of 1.16% from the previous year, this number consisted of 4.78 million hectares of irrigated fields and 3.4 million hectares of non-irrigated fields. In 2017, especially in East Java, the harvest area was 2,278,460 hectares, and rice production was 13,633,701 tons. With the high demand for rice as a staple food, the government continues to make efforts to increase rice production. On the other hand, increased agricultural activities also contribute to increased emissions that can trigger climate change through greenhouse gases (GHGs) produced. Side effects from the accumulation of greenhouse gases can cause extreme climate changes that affect land productivity. Therefore, this study aims to reduce the growth rate of GHG emissions, especially CO₂, CH₄ and N₂O on land productivity but does not reduce the value of land productivity. In this study, the process of land productivity is modeled using a system dynamic to analyze current conditions and evaluate existing problems. The model is then simulated to get the best scenario to reduce GHG emissions. The model contains GHG information generated from paddy field productivity so that it can be used as a consideration for the government and stakeholders as a reference for making GHG emission mitigation technology policies as part of smart agriculture. The results of this study are model simulation scenarios conducted in the period 2007 to 2030 to reduce the rate of CH₄ emissions by 7%, CO₂ emissions by 10% and N₂O emissions by 1%.

Keywords: greenhouse gas mitigation, simulation, system dynamic

(Halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, yang telah memberikan ridho, rahmat, dan hidayah-nya sehingga tesis yang berjudul “Pengembangan Model Sistem Dinamik untuk Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca pada Produktivitas Lahan Sawah (Studi Kasus: Provinsi Jawa Timur)” dapat disusun dengan baik dan sholawat serta salam smoga terus tercurahkan kepada suri tauladan nabi besar Muhammad Shallallahu Alaihi Wa Sallam beserta keluarga dan sahabat-sahabat beliau. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan pada Program Magister Sistem Informasi, Departemen Sistem Informasi, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam proses penyelesaian tesis ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, baik bantuan moral maupun materiil dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada :

1. Orang tua penulis, Bapak Andi Poerwanto dan ibu Sri Herdiyanti yang telah banyak memberikan bantuan berupa doa, nasihat, dan dukungan selama proses pengerjaan tesis ini. Terdapat doa Ibu di balik kesuksesan seorang anak manusia.
2. Ibu Erma Suryani, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing dan Dosen Wali Akademik yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran, serta memberikan ilmu, dukungan, dan kesabaran selama membimbing penulis dari awal hingga tesis ini selesai.
3. Ibu Mahendrawathi Er., ST., M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Penguji I yang telah bersedia menguji dan memberikan masukan untuk penelitian ini.
4. Bapak Dr. Mudjahidin, ST., MT., selaku Dosen Penguji II yang telah bersedia menguji dan memberikan masukan untuk penelitian ini.
5. Bapak dan Ibu dosen yang telah mendidik dan memberikan ilmu selama Penulis menempuh pendidikan di Departemen Sistem Informasi, Fakultas Teknologi Informasi dan Komunikasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
6. Segenap staf dan karyawan di Departemen Sistem Informasi, Fakultas Teknologi Informasi dan Komunikasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang membantu Penulis dalam pelaksanaan tesis ini.
7. Para sahabat seperjuangan Sativandi Putra, Achmad Wildan Nabila dan Fizar Syafa'at.
8. Teman-teman lab. SE yang selalu membantu Dhyna Octabriyantiningtyas, Anindo Saka, Mala Rosa A, Anisa Dzulkarnain, Seftin Fitri A, Karina Nine A dan Semua teman-teman yang tidak dapat di sebutkan satu persatu.
9. Retno Diah Ayu L yang setia dan sabar memberikan inspirasi, semangat serta motivasi kepada penulis.

Dengan keterbatasan pengalaman, ilmu maupun pustaka yang ditinjau, penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangan dan pengembangan lanjut agar benar benar bermanfaat. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran agar tesis ini lebih sempurna serta sebagai masukan bagi penulis untuk penelitian dan penulisan karya ilmiah di masa yang akan datang.

Akhir kata, penulis berharap tesis ini memberikan manfaat bagi kita semua terutama untuk pengembangan ilmu pengetahuan untuk Indonesia kedepannya.

Surabaya, 13 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	5
1.4 Kontribusi Dan Manfaat	5
1.4.1 Kontribusi di Bidang Keilmuan	5
1.4.2 Kontribusi Praktis	6
1.5 Batasan Penelitian	6
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA	9
2.1 Emisi Gas Rumah Kaca	9
2.2 Gas Metana (CH ₄)	10
2.3 Gas Nitro Oksida (N ₂ O)	11
2.4 Gas Karbon Dioksida (CO ₂)	12
2.5 Mitigasi Gas Rumah Kaca	13
2.6 Produktivitas	14
2.7 Produksi	15
2.8 Konsep Dasar Sistem Simulasi	17
2.8.1 Sistem	17
2.8.2 Pemodelan	17
2.8.3 Simulasi	18
2.9 Sistem Dinamik	19
2.10 Penelitian Terkait	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Kajian Pustaka	28

3.2	Pengumpulan Data	28
3.3	Konseptualisasi Sistem	28
3.3.1	<i>Boundary Adequacy</i>	28
3.3.2	Diagram Kausatik	29
3.3.3	Verifikasi Struktur	31
3.3.4	Data Flow Diagram	31
3.3.5	Verifikasi Dan Validasi	32
3.3.6	Membuat Skenario Model	33
3.3.7	Analisis dan Pembahasan Hasil Simulasi	33
3.3.8	Membuat Kesimpulan	34
3.4	Metode Perhitungan IPCC 2006	34
3.4.1	Faktor Emisi CH ₄	34
3.4.2	Faktor Emisi N ₂ O.....	38
3.4.3	Faktor Emisi CO ₂	40
3.4.4	Nilai <i>Global Warming Potential</i> (GWP).....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		42
4.1	Budidaya Padi Sawah sebagai Penyumbang Emisi GRK.....	42
4.2	Pengumpulan Data	44
4.2.1	Data Emisi CH ₄	45
4.2.2	Data Emisi N ₂ O	46
4.2.3	Data Emisi CO ₂	47
4.3	Pengembangan Model Penelitian.....	47
4.3.1	Problem Articulation	48
4.3.2	Dynamic Hypothesis	48
4.3.3	Boundary Adequacy	49
4.3.4	Causal Loop Diagram	50
4.4	Pemodelan Sistem.....	52
4.4.1	Sub Model Emisi CH ₄	52
4.4.2	Sub Model Emisi N ₂ O	53
4.4.3	Sub Model Emisi CO ₂	55
4.4.4	Sub Model Produktivitas Lahan Sawah.....	55
4.5	Validasi Model.....	56
4.5.1	Validasi Sub Model Emisi CH ₄	57
4.5.2	Validasi Sub Model Emisi N ₂ O	59
4.5.3	Validasi Sub Model Emisi CO ₂	60

4.6	Pengembangan Skenario	61
4.6.1	Skenario CH ₄	61
4.6.2	Skenario CO ₂	63
4.6.3	Skenario N ₂ O	65
4.7	Simpulan Hasil Pengembangan Model	67
4.8	Analisis Intepretasi Hasil	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		71
5.1	Kesimpulan	71
5.2	Saran	72
DAFTAR PUSTAKA		73
BIOGRAFI PENULIS		77

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skenario mitigasi emisi pada lahan sawah	14
Gambar 2.2 Representasi Struktur Stock and Flow	23
Gambar 3.1 Tahapan Penelitian	27
Gambar 3.2 Diagram Kausatik López Astudillo, et. al (2014)	30
Gambar 3.3 Diagram Kausatik Penelitian.....	31
Gambar 4.1 Kerangka Teoritis.....	49
Gambar 4.2 CLD Penelitian.....	51
Gambar 4.3 Sub Model CH4 Emisi	53
Gambar 4.4 Sub Model N2O Emisi	54
Gambar 4.5 Sub Model CO2 Emisi	55
Gambar 4.6 Hasil Check Model.....	56
Gambar 4.7 Hasil Check Units	57
Gambar 4.8 Grafik Validasi CH4	58
Gambar 4.9 Grafik Validasi N2O	59
Gambar 4.10 Grafik Validasi CO2	61
Gambar 4.11 Sub Model Skenario CH4	62
Gambar 4.12 Grafik Model Skenario CH4	62
Gambar 4.13 Sub Model Skenario CO2	64
Gambar 4.14 Sub Model Skenario CO2	64
Gambar 4.15 Sub Model Skenario NO2	66
Gambar 4.16 Sub Model Skenario NO2	66

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Simbol CLD.....	22
Tabel 3.1 Variabel Eksogen dan Endogen.....	29
Tabel 3.2 Faktor Koreksi untuk Rejim Air selama Periode Budidaya.....	35
Tabel 3.3 Faktor Skala Emisi CH ₄ untuk Rejim Air Sebelum Periode Penanaman.....	35
Tabel 3.4 Faktor Emisi dan Faktor Koreksi Emisi Metana (CH ₄) dari Lahan Sawah untuk Berbagai Varietas Padi.....	36
Tabel 3.5 Faktor Koreksi untuk Jenis Tanah	36
Tabel 3.6 Faktor Koreksi untuk Rejim Air selama Periode Budidaya.....	37
Tabel 3. 7 Default Faktor Emisi untuk Menghitung Emisi N ₂ O dari Tanah yang Dikelola	38
Tabel 3.8 Default Emisi, Faktor Volatisasi dan Pencucian untuk Emisi N ₂ O Tidak Langsung dari Tanah.....	39
Tabel 3.9 Nilai GWP.....	41
Tabel 4.1 Data Aktivitas Sumber Emisi.....	44
Tabel 4.2 Data Emisi CH ₄	46
Tabel 4.3 Data Emisi N ₂ O.....	46
Tabel 4.4 Data Emisi CO ₂	47
Tabel 4.5 Boundary Adequacy.....	49
Tabel 4.6 Validasi Emis CH ₄	58
Tabel 4.7 Validasi Emis N ₂ O	59
Tabel 4.8 Validasi Emisi CO ₂	60
Tabel 4.9 Tabel Hasil Skenario CH ₄	63
Tabel 4.10 Tabel Skenario CO ₂	64
Tabel 4.11 Tabel Skenario NO ₂	67
Tabel 4.12 Kesimpulan Skenario	68
Tabel 4. 13 Cara Pengelolaan Pengairan	69

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

Pada pendahuluan ini, akan dijelaskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian ini, perumusan masalah yang diteliti, tujuan dan manfaat dilakukannya penelitian, batasan penelitian, dan kontribusi dari penelitian.

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah salah satu negara berkembang yang dikenal sebagai negara agraris karena sebagian besar wilayahnya digunakan sebagai lahan pertanian. Pertanian dalam arti luas terdiri dari lima sektor, yaitu tanaman pangan, perkebunan, peternakan, perikanan dan kehutanan. Kelima sektor pertanian tersebut bila ditangani dengan baik dapat memberikan sumbangan yang besar bagi perkembangan perekonomian Indonesia mendatang (Soekartawi, 1999). Salah satu sektor pertanian yang menjadi tulang punggung adalah tanaman padi, mengingat tingginya permintaan beras yang terus meningkat setiap tahunnya. Beras adalah kebutuhan pokok yang digunakan sebagai makanan sehari-hari dan salah satu sumber karbohidrat. Oleh karena itu, kebutuhan akan beras akan selalu meningkat seiring dengan meningkatnya populasi (Rahmawati, Neve, & Heru, 2015). Sedangkan menurut data *World Bank*, pertumbuhan populasi di Indonesia sendiri telah mencapai angka 263 juta jiwa pada tahun 2017.

Produksi beras di Indonesia pada tahun 2017 tumbuh sebesar 2,16 persen dari tahun sebelumnya. Empat provinsi penghasil beras terbesar di Indonesia, termasuk Jawa Timur, Jawa Tengah, Jawa Barat, dan Sulawesi Selatan. Jawa Timur adalah penghasil beras terbesar di Indonesia dengan luas panen 2.278.460 hektar, dan produksi beras 13.633.701 ton. Sejalan dengan ini, dapat dikatakan bahwa beras adalah salah satu komoditas terbesar di Jawa Timur, diikuti oleh jagung, tebu, kelapa dan buah-buahan (BPS-Statistics Indonesia, 2018). Ini mendorong pemerintah Indonesia untuk terus berupaya meningkatkan bisnis pertanian padi melalui layanan pertanian di setiap daerahnya.

Usaha untuk meningkatkan produksi beras dalam skala besar merupakan hal positif guna menjaga keseimbangan anatara permintaan dan pasokan beras,

namun hal ini menyimpan permasalahan permasalahan tersendiri. Dengan semakin meningkatnya produktivitas pada lahan sawah yang tinggi, dapat memicu timbulnya emisi. Para ilmuwan dan akademisi telah menemukan bahwa dalam beberapa kegiatan, produktivitas lahan sawah merupakan sumber dihasilkannya emisi gas rumah kaca (GRK) (Murniyanto, Wicaksono, & Muhsoni, 2011). Emisi GRK dari pertanian merupakan masalah lingkungan yang besar, dengan pertanian mengeluarkan sekitar 4,6 Gt setara karbon dioksida (Tubiello et al., 2013). Dari GRK non CO₂, metana (CH₄) dan nitro oksida (N₂O) adalah gas paling penting yang dipancarkan dari kegiatan pertanian, masing-masing 50% dan 60% dari total emisi antropogenik. Emisi metana dan N₂O adalah GRK potensial yang dipancarkan dari penanaman padi (Tian et al., 2017). Sementara itu, tiga GHG yang dapat bertindak sebagai pembentuk filter sinar infra merah dan akibatnya meningkatkan suhu bumi adalah CO₂, CH₄ dan N₂O. Selain memantulkan cahaya inframerah, ketiga gas ini juga menyebabkan penipisan ozon. Jumlah karbon (C) dalam bentuk senyawa GHG, seperti gas CH₄, yang lolos ke atmosfer karena proses biologis dan aktivitas manusia menyebabkan terbentuknya lapisan di stratosfer yang menghasilkan pantulan radiasi inframerah yang seharusnya dilepaskan ke atmosfer Bumi (Setyanto, 2008).

Kegiatan yang dapat menghasilkan emisi secara umum dimulai dari pengolahan tanah pertanian ketika pembajakan lahan hingga pengolahan residu jerami. Kegiatan pemeliharaan berupa pemupukan urea atau nitrogen dan irigasi (Masykur, 2013). Secara lebih spesifik (Zhang, Pang, Chen, & Lu, 2019) menyebutkan sumber emisi karbon pertanian lebih beragam dan kompleks, yang utamanya terdiri dari empat jenis. Jenis pertama adalah emisi CO₂ yang disebabkan oleh input lahan pertanian, termasuk irigasi pertanian, pengolahan tanah pertanian dan penggunaan pupuk kimia, pestisida dan mesin pertanian. Kedua adalah emisi CH₄ dan N₂O yang disebabkan oleh produksi ternak, termasuk emisi CH₄ yang disebabkan oleh fermentasi usus hewan, dan emisi CH₄ dan N₂O yang disebabkan oleh pengelolaan kotoran hewan. Ketiga adalah emisi CH₄ dari proses penanaman padi, dan yang keempat adalah N₂O yang dilepaskan oleh tanah selama penanaman tanaman. Dengan luasnya lahan pertanian yang ada

di Indonesia, maka tidak heran jika Indonesia merupakan salah satu negara yang berkontribusi secara signifikan terhadap pertumbuhan emisi GRK.

Indonesia adalah penghasil emisi GRK ke-18 dunia, sumber emisi GRK adalah sektor energi, limbah, pertanian dan industri dengan total emisi GRK pada 2012 diperkirakan 1.454 juta metrik ton setara karbon dioksida MtCO_{2e} karbon dioksida. Dua sektor utama yang berkontribusi hampir 83% dari total emisi GRK, yaitu sekitar 48% perubahan penggunaan lahan dan imbuhan gambut, serta sekitar 35% di sektor energi (Hidayatno & Rahmawan, 2019). Oleh karena itu, sesuai dengan Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011 Pasal 2 tentang Rencana Aksi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca yang disingkat RAN-GRK, maka Indonesia sebagai negara yang menyumbang emisi dari sektor pertanian menargetkan pengurangan GHG sebesar 0,008 gigaton pada tahun 2020. Tindakan mitigasi yang tercantum dalam RAN-GRK mencakup berbagai kebijakan dan tindakan untuk penggunaan lahan (kehutanan dan pertanian), energi (termasuk transportasi dan industri), dan pengelolaan limbah.

Ancaman terbesar yang dapat ditimbulkan dari GRK adalah terjadinya perubahan iklim yang ekstrem. Pertanian, di sektor tanaman pangan, sangat rentan terhadap perubahan curah hujan, karena tanaman pangan umumnya merupakan tanaman musiman yang relatif sensitif terhadap kelebihan dan kekurangan air (Marino et al., 2016). Banjir yang semakin sering mengakibatkan berkurangnya area panen secara signifikan dan penurunan produksi beras secara signifikan. Meningkatnya intensitas banjir dapat mempengaruhi produksi karena meningkatnya serangan organisme hama tanaman. Pergeseran pola hujan mempengaruhi sumber daya dan infrastruktur pertanian yang menyebabkan pergeseran waktu tanam, musim, dan pola tanam, serta degradasi lahan. (Mallari, 2016).

Dengan mempertimbangkan persoalan di atas, maka dibutuhkan upaya dan strategi untuk pengambilan keputusan sehingga dapat mengurangi emisi GRK yang dihasilkan dari produktivitas lahan sawah. Metode yang digunakan untuk mendapatkan keputusan terbaik adalah dengan pendekatan sistem dinamik yang difokuskan pada penentuan kebijakan pada permasalahan yang dapat dimodelkan. Sistem Dinamik adalah metode pendekatan dengan model dinamis yang

didasarkan pada konsep umpan balik yang memetakan arus, proses, dan hubungan dalam sistem yang kompleks (Sterman, 2000).

Kompleksitas pada sistem produktivitas lahan sawah diantaranya disebabkan oleh variabel yang saling berkaitan erat seperti pemberian pupuk yang sangat diperlukan untuk produktivitas lahan namun dapat bertindak sebagai sumber emisi N₂O. Selain itu faktor umpan balik seperti *balancing* pada penanaman padi yang dapat menyerap emisi CO₂, namun dilain sisi aktivitas penanaman padi memerlukan irigasi yang memicu reaksi kimia sebagai penghasil emisi CH₄. Terjadinya hubungan sebab akibat yang saling mempengaruhi pada banyak skala waktu menyebabkan terjadinya perubahan pada sistem secara kontinu, sehingga diperlukan pendekatan dengan sistem dinamik yang memiliki karakteristik dinamika sistem yang kompleks, non-linear, perubahan perilaku sistem terhadap waktu dan adanya umpan balik yang menggambarkan informasi baru tentang keadaan sistem, yang kemudian akan menghasilkan keputusan selanjutnya.

Pada penelitian ini, penulis menganalisis dan mengembangkan model sistem produktivitas lahan sawah berdasarkan pengamatan dari sistem nyata dan literatur yang didapatkan untuk disimulasikan sehingga menghasilkan skenario yang mampu untuk mengurangi emisi GRK. Skenario terbaik yang dihasilkan digunakan sebagai bahan pertimbangan pemerintah maupun pemangku kepentingan dalam membuat kebijakan untuk mengurangi emisi GRK. Model yang didalamnya menggambarkan aliran jaringan informasi yang saling terhubung dapat digunakan sebagai salah satu sumber informasi dan acuan untuk mendukung teknologi mitigasi emisi sebagai salah satu bagian dari *smart agriculture* bagi pemerintah maupun pemangku kepentingan untuk mengurangi emisi GRK sebagai bagian dari *smart agriculture*.

1.2 Perumusan Masalah

Hasil penelitian para ahli menunjukkan bahwa pada proses produktivitas lahan sawah tidak sepenuhnya ramah lingkungan. Terdapat aktivitas-aktivitas yang berpotensi menghasilkan emisi GRK dalam jumlah yang besar. Setiap tahunnya jumlah emisi GRK yang dihasilkan oleh lahan sawah di Indonesia semakin meningkat dan berpotensi merusak lingkungan alam secara global. Hal

ini membuat pemerintah Indonesia senantiasa berupaya untuk menurunkan angka emisi yang dihasilkan dari produktivitas lahan sawah.

Sehingga dari permasalahan tersebut dapat diperjelas lebih detail melalui perumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Faktor apa saja yang mempengaruhi emisi GRK pada produktivitas lahan sawah dengan mempertimbangan beberapa faktor internal maupun eksternal yang berkontribusi signifikan terhadap dinamika sistem?
2. Bagaimana mengurangi emisi GRK pada produktivitas lahan sawah sebagai bagian dari *smart agriculture* melalui skenario terhadap struktur komponen sistem?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan model yang merepresentasikan sistem produktivitas lahan sawah untuk disimulasikan guna mengurangi emisi GRK pada lahan persawahan.
2. Merancang skenario terbaik untuk mengurangi produksi emisi GRK dari serangkaian aktivitas produksi tanaman padi untuk mendukung *smart agriculture*.

1.4 Kontribusi Dan Manfaat

Terdapat beberapa kontribusi yang akan diberikan dari penelitian ini, antara lain:

1.4.1 Kontribusi di Bidang Keilmuan

- a. Dapat memberikan kontribusi berupa pengembangan model produksi emisi GRK dari produktivitas lahan sawah.
- b. Terbentuknya sebuah rekayasa model sistem dinamik dengan beberapa skenario untuk para pengambil kebijakan dengan pemanfaatan teknologi untuk mengurangi emisi GRK pada lahan sawah.
- c. Penelitian ini diharapkan dapat menambahkan referensi dan bahan informasi khususnya bagi peneliti yang akan melakukan penelitian

sejenis untuk dapat dikembangkan lebih lanjut dan lebih detail pada masa yang akan datang.

1.4.2 Kontribusi Praktis

- a. Melakukan uji coba sistem dinamik untuk mengurangi emisi GRK pada lahan persawahan yang diinginkan pada beberapa kurun waktu tertentu.
- b. Hasil dari penelitian ini akan memberikan sumbangan pemikiran yang dapat digunakan sebagai referensi bagi pihak terkait dalam mengambil alternatif kebijakan dengan tujuan untuk mengurangi terbentuknya emisi karbon pada lahan persawahan.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki ruang lingkup yang akan menjadi batasan penelitian. Batasan penelitian ini antara lain:

1. Penelitian ini dilakukan pada lahan persawahan wilayah Jawa Timur.
2. Penelitian ini dilakukan pada produktivitas lahan tanaman padi.
3. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah perancangan model produksi emisi gas rumah kaca pada produktivitas lahan tanaman padi, pembuatan skenario dari hasil model yang dibuat, dan analisis hasil yang diperoleh dari pembuatan model dan skenario model.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan proposal penelitian ini adalah sebagai berikut:

a) Bab 1 Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, kontribusi penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

b) Bab 2 Kajian Pustaka

Bab ini berisi tinjauan pustaka dan penelitian-penelitian yang sudah ada mengenai emisi gas rumah kaca, produktivitas lahan sawah dan serangkaian teori yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan sistem dinamik untuk topik penelitian.

c) Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini mengulas tentang tahapan-tahapan sistematis yang digunakan untuk melakukan penelitian.

d) Daftar Pustaka

Berisi daftar referensi yang digunakan dalam penelitian ini, baik jurnal, buku maupun artikel.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai dasar teori yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan. Selain itu akan dibahas mengenai penelitian-penelitian sebelumnya. Teori yang dijelaskan diantaranya meliputi emisi gas rumah kaca, emisi metana (CH₄), emisi nitro oksida (N₂O), emisi karbon dioksida (CO₂), mitigasi gas rumah kaca, produktivitas, produksi, simulasi dan sistem dinamik yang merupakan pendekatan pada penelitian ini.

2.1 Emisi Gas Rumah Kaca

Perubahan iklim yang drastis dan terjadi secara tiba-tiba dikarenakan pemanasan global telah memberikan permasalahan serius terhadap sistem ekologi dan sosial ekonomi (Alley, Marotzke, Nordhaus, & Overpeck, 2003). Catatan sejarah menunjukkan bahwa dari tahun 1901 hingga 2012, suhu permukaan rata-rata global meningkat sebesar 0,89 ° C. Tren pemanasan ini diperkirakan akan terus berlanjut di dekade mendatang dan akan memberikan dampak yang lebih signifikan pada ekosistem dan masyarakat manusia (IPCC, 2014). Penyebab utama pemanasan global saat ini adalah emisi GRK antropogenik, yang menyebabkan peningkatan konsentrasi di atmosfer. Emisi adalah proses terbebasnya gas rumah kaca ke atmosfer, melalui dekomposisi bahan organik oleh mikroba yang menghasilkan gas CO₂ atau CH₄, proses terbakarnya bahan organik menghasilkan CO₂ dan proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang menghasilkan gas N₂O (Agus, Santosa, & Dewi, 2014). Pertanian intensif modern, yang sangat bergantung pada aplikasi pupuk kimia dan irigasi, adalah sumber tunggal terbesar dari emisi N₂O (IPCC, 2014). Emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari sektor pertanian ini nantinya akan berdampak langsung pada produktivitas lahan.

Pertanian, terutama subsektor tanaman pangan, sangat rentan terhadap perubahan musim, karena tanaman pangan pada umumnya merupakan tanaman semusim yang sensitif terhadap kelebihan dan kekurangan air. Boer et al., (2011) dalam (Pramudia, et al., 2013) menyatakan bahwa dampak perubahan iklim global

terhadap sektor pertanian dibedakan menjadi: (1) dampak yang bersifat kontinu, berupa kenaikan suhu udara, perubahan hujan, dan kenaikan salinitas air tanah untuk wilayah pertanian dekat pantai yang akan menurunkan produktivitas tanaman dan perubahan panjang musim yang mengubah pola tanam dan indeks penanaman, (2) dampak yang bersifat diskontinu seperti meningkatnya gagal panen akibat meningkatnya frekuensi dan intensitas kejadian iklim ekstrem (banjir, kekeringan, dan angin kencang) dan meningkatnya gagal panen akibat munculnya serangan atau ledakan hama penyakit baru tanaman, dan (3) dampak yang bersifat permanen berupa berkurangnya luas kawasan pertanian di kawasan pantai akibat kenaikan muka air laut.

Berdasarkan Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011, GRK merupakan sekumpulan gas yang terkandung dan tersimpan di dalam atmosfer baik berupa gas alami maupun antropogenik, dengan kemampuan untuk menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah. Istilah GRK oleh para ahli disampaikan sebagai fungsi dari atmosfer bumi yang digambarkan seperti kaca pada bangunan rumah kaca dalam praktek budidaya tanaman. Cahaya matahari yang melewati atmosfer kemudian mencapai dan menghangatkan permukaan bumi sehingga memungkinkan untuk ditinggali makhluk hidup. Kemampuan untuk menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah yang disebabkan oleh gas-gas yang mengendap di atmosfer merupakan penyebab pemanasan tersebut.

2.2 Gas Metana (CH₄)

Sawah, adalah lahan basah antropogenik terbesar di bumi dan merupakan sumber biologis antropogenik penting dari metana (CH₄) atmosfer. CH₄ diproduksi oleh dekomposisi bahan organik anaerob, amandemen organik dan rezim air adalah dua faktor penting yang mengendalikan emisi CH₄ dari sawah. Residu tanaman adalah sumber utama untuk input bahan organik di lahan pertanian. Pembakaran jerami di lokasi biasanya merupakan pendekatan umum untuk persiapan lahan yang mudah. Namun, pembakaran jerami skala besar menyebabkan polusi udara yang parah yang mempengaruhi kesehatan masyarakat. Karena itu, pembakaran jerami telah dilarang, dan penerapan jerami direkomendasikan untuk meningkatkan kesuburan tanah. Secara umum, dalam

sistem padi rangkap intensif, jerami dari padi awal biasanya dibajak ke tanah. Namun, praktik ini merangsang emisi CH₄ karena dekomposisi jerami padi segar secara anaerob mempercepat proses reduksi dan melepaskan substrat organik untuk produksi CH₄. Sebaliknya, mulsa jerami, yang memungkinkan jerami membusuk di tanah, dapat mengurangi input karbon ke dalam zona anaerobik tanah dan mengurangi dampak pada kondisi redoks tanah. Irigasi banjir berkelanjutan bermanfaat untuk emisi CH₄ (Wu et al., 2019).

Secara umum proses terjadinya gas emisi gas metana dari padi sawah ke atmosfer didasarkan atas tiga proses berikut:

- a. Pelepasan gas metana yang berupa gelembung-gelembung udara (eubulisi), mekanisme pelepasan gas metana ini merupakan penyebab dari hilangnya metana sekitar 49%-70% dari total emisi (Barlett et al., 1988)
- b. Proses difusi yang ditentukan oleh adanya perbedaan konsentrasi metana dalam air, kecepatan mensuplai metana ke permukaan air.
- c. *Aerenchyma*, yang terdapat dalam tanaman padi dapat mencapai hingga sebesar 90%.

2.3 Gas Nitro Oksida (N₂O)

Metode awal untuk meningkatkan produktivitas lahan adalah dengan menggunakan pupuk kimia dan pestisida. Namun, sejak 1990-an telah terjadi penurunan kesuburan tanah, dan ketergantungan pupuk kimia (anorganik) semakin meningkat. Kemudian dikembangkan pertanian organik yang ramah lingkungan; ciri utama pertanian organik adalah penggunaan varietas lokal diikuti dengan pemupukan dengan pupuk organik, dan pengendalian hama dengan pestisida alami. Namun, dengan karakteristik tanaman padi yang ditanam dengan tanah banjir dan input nitrogen yang tinggi, pelepasan N₂O dari tanah melalui peningkatan denitrifikasi dan berkontribusi terhadap pemanasan global (Rahmawati et al., 2015).

N₂O memiliki kapasitas penyerapan inframerah yang kuat dan menjebak radiasi dari permukaan bumi. Diperkirakan bahwa N₂O memiliki kapasitas penyerapan inframerah sekitar 300 kali lebih banyak daripada CO₂ (IPCC, 2013). Di stratosfer atas, N₂O dioksidasi menjadi NO oleh aksi sinar UV, dan NO

menghancurkan lapisan ozon yang melindungi makhluk hidup terhadap radiasi sinar UV-matahari. Pemupukan nitrogen meningkatkan emisi N₂O dari banjir terus-menerus dan pemeliharaan drainase pertengahan musim karena dipancarkan melalui tanaman padi yang dibanjiri. Penerapan mineral N meningkatkan ketersediaan substrat untuk nitrifikasi dan denitrifikasi dapat memberikan lebih banyak N yang tersedia untuk mikroba tanah dan akan mengarah pada penghabisan N₂O yang lebih tinggi (Rahmawati et al., 2015).

2.4 Gas Karbon Dioksida (CO₂)

Besarnya emisi CO₂ dari tanah dipengaruhi oleh tekstur tanah, tingkat kesuburan dan rotasi tanaman. Pada tanah sawah emisi CO₂ dipengaruhi oleh aktifitas respirasi tanaman padi. Selain itu terjadi oksidasi bahan organik pada daerah rizosfer karena tanaman padi maupun mengalirkan oksigen dari atmosfer ke perakaran melalui jaringan aeranchyma. Semakin tinggi akumulasi biomassa di atas tanah meningkat pula kemampuan respirasi dan daya oksidasi akar (Murdiyarso dan Husin, 1994).

Bahan organik yang mudah terdekomposisi merupakan bahan baku utama bagi bakteri metanogenik dalam membentuk CO₂ di lahan sawah. Neue (1984) menghitung total emisi CO₂ dari lahan sawah dari total biomassa kalau dikembalikan ke dalam tanah. Dengan asumsi rata-rata 15% jerami, 50% gulma tanah dan seluruh akar tanaman ditambah biomassa aquatik (algae dan gulma), jumlah yang dikembalikan itu setiap tahun (kurang lebih setara 390 juta t-1 biomassa atau setara 156 juta t-1 karbon) dan 30 % karbon yang dikembalikan tersebut diubah menjadi CO₂.

Selain bahan organik, bahan bakar fosil yang mulai dikenal selama revolusi industri pertama dan sampai sekarang masih digunakan dalam skala yang sangat luas juga merupakan akar dari masalah lingkungan seperti pemanasan global, permukaan laut, dan cuaca ekstrem yang sering terjadi (Lin & Xu, 2018). Energi fosil adalah energi matahari terkonsentrasi dengan senyawa karbon. Ketika karbon dibakar, ia menghasilkan partikel CO₂ yang memanjang melalui seluruh atmosfer (López Astudillo et al., 2014). Penggunaan peralatan pertanian yang masih menggunakan bahan bakar fosil adalah faktor pendorong untuk produksi

gas buang dalam bentuk CO₂. Peralatan pertanian yang digunakan seperti mesin bajak, mesin irigasi dan mesin panen.

2.5 Mitigasi Gas Rumah Kaca

Peraturan Presiden (Perpres) No. 61/2011 memberikan mandat kepada Kementerian/Lembaga di tingkat pusat dan provinsi untuk menyusun Rencana Aksi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK), serta mengembangkan data acuan perkiraan emisi GRK pada skenario *Business as usual (BAU)*. Emisi pada skenario *BAU* akan menjadi bagian penting dalam menentukan status emisi GRK saat ini dan proyeksinya di masa datang, yang selanjutnya penting dalam menentukan perhitungan pengurangan emisi/tingkat absorpsi dan merumuskan aksi-aksi penurunan emisi GRK serta pemantauan keberhasilan pelaksanaan aksi-aksi ini.

Terdapat beberapa aktivitas dalam produktivitas lahan sawah yang menghasilkan emisi. Berikut adalah beberapa sumber pada sektor pertanian yang menghasilkan emisi:

1. Pupuk sebagai sumber emisi terbesar (38%) bagi sektor pertanian. Tanah melepaskan N₂O pada proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Penggunaan pupuk baik organik maupun anorganik meningkatkan kadar N₂O yang dilepaskan tanah.
2. Budidaya padi sawah melepaskan sekitar 11% emisi. Penggenangan pada sawah menyebabkan bahan organik tidak dapat terdekomposisi dengan adanya oksigen sehingga terjadi dekomposisi secara anorganik yang menghasilkan metana. Besarnya emisi dari budidaya padi sawah tergantung pada pengelolaan air dan jumlah pupuk yang digunakan.
3. Penggunaan pupuk kandang, termasuk proses pembuatan dan penyimpanan menyebabkan 7% emisi sektor pertanian. Metana diemisikan pada saat pupuk kandang disimpan pada kondisi oksigen yang cukup yang menyebabkan dekomposisi anorganik, sebaliknya nitrogen pada *faces* dan *urine* ternak memicu terjadinya nitrifikasi dan denitrifikasi yang menghasilkan N₂O.

4. Pembakaran sabana dan sisa pertanian, pembukaan hutan dengan pembakaran menyumbang emisi non CO₂ sebesar 13%.

Oleh karena itu, sebagai upaya untuk menurunkan emisi pada lahan sawah, (Litbang Pertanian, 2011) menyusun enam skenario mitigasi seperti terlihat pada Gambar 2.1.

Skenario	Teknologi mitigasi
S0	Sawah irigasi dengan pupuk an organik (berdasarkan Kepmentan)
S1	Irigasi berselang (termasuk SRI, PTT)
S2	Suplemen Pupuk (ZA dan urea briket)
S3	Varietas rendah emisi *
S4	Irigasi berselang + suplemen pupuk (kombinasi S1 and S2)
S5	Irigasi berselang + suplemen pupuk + varietas rendah emisi (kombinasi S1, S2 & S3)
S6	S5 + <i>iron material</i> /silikat

Gambar 2.1 Skenario mitigasi emisi pada lahan sawah

(Sumber: Litbang Pertanian, 2011)

2.6 Produktivitas

Produktivitas adalah kemampuan untuk menghasilkan atau tingkat hasil yang diperoleh seseorang. Balai pengembangan dan penelitian departemen pertanian merumuskan produktivitas padi yang didapat dari jumlah produksi padi (Ton) dibagi luas panen (Ha), sehingga produktivitas adalah (Ton/Ha). Faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas padi diantaranya adalah :

a. Hama

Departemen pertanian mengklasifikasikan wabah organisme pengganggu tanaman pangan (OPT) menjadi aman, potensial, sporadic, dan endemic. Iklim, curah hujan, serta luas tanam mempengaruhi adanya hama. Untuk tanaman padi, OPT utama yang dapat menurunkan produktivitas padi atau bahkan menyebabkan gagal panen adalah tikus, penggerek batang, dan wareng batang coklat. Diantara ketiga OPT yang paling sulit dibasmi adalah wareng batang coklat.

b. Pupuk

Untuk meningkatkan produktivitas padi, penggunaan pupuk menjadi salah satu hal yang penting. Terdapat berbagai macam jenis pupuk sesuai dengan fungsi dan kegunaannya masing-masing. Jenis pupuk yang paling umum adalah organik dan anorganik. Dosis dan pemupukan padi yang tepat dapat memberikan hasil maksimal.

c. Bibit unggul

Untuk meningkatkan suatu produksi tanaman padi, bibit memiliki peranan yang sangat penting.

d. Adopsi Teknologi

Peran teknologi dibutuhkan dalam meningkatkan produktivitas padi. Adapun teknologi yang digunakan terdiri dari teknologi ketersediaan irigasi, varietas unggul, dan teknologi pasca panen.

2.7 Produksi

Produksi merupakan perangkat prosedur dan kegiatan yang terjadi dalam penciptaan komoditas berupa kegiatan usaha tani maupun lainnya. Faktor yang mempengaruhi produksi pertanian adalah sebagai berikut:

a. Lahan Pertanian

Lahan pertanian merupakan penentu dari faktor produksi komoditas pertanian. Semakin luas lahan (yang digarap/ditanam), semakin besar jumlah produksi yang dihasilkan oleh lahan tersebut dan ukuran lahan pertanian dapat dinyatakan dengan hektar (Ha).

b. Pupuk

Pupuk merupakan konsumsi vitamin sebagai tambahan makanan tanaman, untuk memperoleh pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang optimal.

c. Pestisida

Pestisida merupakan racun yang mengandung zat-zat aktif yang digunakan untuk membasmi hama dan penyakit yang menyerang tanaman.

d. Bibit

Bibit menentukan keunggulan dari suatu komoditas. Bibit yang unggul biasanya tahan terhadap penyakit dan menghasilkan hasil yang berkualitas tinggi.

e. Teknologi

Penggunaan teknologi dapat menciptakan rekayasa perlakuan terhadap tanaman dan dapat mencapai tingkat efisiensi yang tinggi.

f. Tenaga Kerja

Pengertian dari tenaga kerja dalam hal ini adalah petani. Petani merupakan faktor penting dan perlu diperhitungkan dalam proses produksi komoditas pertanian. Tenaga kerja harus mempunyai kualitas berfikir yang maju seperti petani yang mampu mengadopsi inovasi- inovasi baru, terutama dalam menggunakan teknologi untuk mencapai komoditas yang bagus sehingga nilai jual tinggi.

g. Modal

Dalam proses produksi komoditas pertanian, modal dibagi menjadi dua, yaitu modal tetap (fixed cost) dan modal tidak tetap (variable cost). Biaya variable adalah jumlah biaya produksi yang berubah menurut tinggi rendahnya jumlah output yang akan dihasilkan. Biaya variable pada pertanian padi adalah pengadaan bibit, pupuk, obat/pestisida, dan tenaga kerja. Sementara biaya tetap adalah biaya yang timbul akibat penggunaan sumber daya tetap dalam proses produksi. Sifat utama biaya tetap adalah jumlahnya tidak berubah walaupun jumlah produksi mengalami perubahan (naik atau turun). Biaya tetap pada pertanian padi adalah sewa lahan, mesin, dan peralatan pertanian.

h. Indek Pertanaman (IP)

Indek pertanaman adalah cara tanam dan panen padi dalam satu tahun pada satu lahan yang sama. IP 400 berarti tanam dan panen empat kali dalam satu tahun di satu lahan yang sama. Bertujuan untuk stabilitas produksi beras untuk ketahanan pangan nasional dengan efisiensi penggunaan lahan sawah, pelestarian produktivitas lahan sawah, pemanfaatan tenaga kerja secara optimal. (Badan Litbang Pertanian , 2009).

2.8 Konsep Dasar Sistem Simulasi

2.8.1 Sistem

Sistem adalah kumpulan obyek yang saling berinteraksi dan bekerjasama untuk mencapai tujuan logis dalam suatu lingkungan yang kompleks. Menurut Hannon & Ruth (1997), sistem terbagi menjadi 2 jenis, yaitu :

1. Sistem Terbuka (open system)
2. Sistem Tertutup (closed system)

Open system yang bercirikan sebuah output sebagai respon dari input di mana output diisolasi dari dan tidak ada pengaruhnya terhadap input. Dalam sistem terbuka ini, aksi sebelumnya (past action) tidak bisa mengontrol aksi yang akan datang (future action). Sementara itu, feedback system merupakan sistem tertutup (closed system), yang dipengaruhi perilaku sebelumnya. Feedback system memiliki struktur closed loop dimana aksi sebelumnya dapat kembali mengontrol aksi yang akan datang. Ada dua kategori feedback system antara lain:

- a. Negative feedback system Mencari tujuan dan respon sebagai konsekuensi dari kegagalan mencapai tujuan.
- b. Positive feedback system Meningkatkan proses-proses pertumbuhan di mana aksi yang dihasilkan dapat membangkitkan aksi yang lebih besar. Jadi feedback system dapat mengontrol aksi berdasarkan hasil-hasil dari aksi sebelumnya.

2.8.2 Pemodelan

Terdapat beberapa cara untuk dapat merancang, menganalisis dan mengoperasikan suatu sistem. Salah satunya adalah dengan melakukan pemodelan yaitu membuat model dari sistem tersebut. Model adalah sebuah rancangan yang sangat berguna untuk menganalisis maupun merancang sebuah sistem. Model juga sebagai alat komunikasi yang sangat efisien, model dapat menunjukkan bagaimana suatu operasi bekerja dan mampu merangsang untuk meningkatkan atau memperbaikinya. Dengan membuat model dari sistem maka diharapkan dapat lebih mudah untuk melakukan analisis. Dalam membuat suatu model harus dimulai dari bentuk yang paling sederhana dengan cara mendefinisikan permasalahan secara detail, selanjutnya digunakan analisis

sensivitas untuk membantu menentukan rincian model. Selanjutnya tahap penyempurnaan 6 dilakukan dengan menambahkan variabel secara gradual, sehingga diperoleh model yang logis dan dapat mempresentasikan keadaan sebenarnya (Kholil, 2005). Menurut Suryani (2006), dalam buku Pemodelan dan Simulasi, model merupakan representasi sistem dalam kehidupan nyata yang menjadi fokus perhatian dan menjadi pokok permasalahan. Pemodelan dapat didefinisikan sebagai proses pembentukan model dari sistem tersebut dengan menggunakan bahasa tertentu. Sebuah pemodelan akan diterima jika hasil dari pemodelan tersebut valid. Model dikatakan valid, jika jarak (atau kesalahan) yang diberikan dalam pemodelan antara hasil simulasi dan eksperimen kurang dari nilai kritis yaitu nilai yang telah ditetapkan mula-mula atau nilai yang error.

2.8.3 Simulasi

Menganalisis proses dalam bentuk model dapat dilakukan dengan menggunakan simulasi komputer. Simulasi merupakan penyelesaian persamaan matematis secara bertahap dari suatu sistem untuk mengetahui perubahan yang terjadi, sehingga dapat dipelajari perilaku sistem tersebut. Metode simulasi mempunyai keunggulan yaitu pada kemampuannya memberikan informasi secara cepat. Beberapa pengertian simulasi menurut para ahli dalam (Suryani, 2006):

1. Hoover dan Perry (1990) Merupakan sebuah proses perancangan model matematis atau logis dari sistem nyata, melakukan eksperimen terhadap model dengan menggunakan komputer untuk menggambarkan, menjelaskan dan memprediksi perilaku sistem.
2. Law dan Kelton (1991) 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. Khosnevis (1994) Merupakan sebuah proses aplikasi untuk 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 konsep yang cukup fleksibel untuk dapat mengerjakan masalah yang sulit untuk dipecahkan dengan model matematis. Model simulasi juga efektif jika digunakan untuk sistem yang relatif kompleks. Penggunaan simulasi akan memberikan wawasan yang lebih luas pada pihak manajemen dalam menyelesaikan suatu masalah. Berikut ini kelebihan dari pemanfaatan simulasi sebagai berikut (Suryani, 2006):

- a) Tidak semua sistem dapat direpresentasikan dalam model matematis, simulasi merupakan alternatif yang tepat.
- b) Dapat bereksperimen tanpa adanya resiko pada sistem nyata. Dengan simulasi memungkinkan untuk melakukan percobaan terhadap sistem tanpa harus menanggung risiko terhadap sistem yang berjalan.
- c) Simulasi dapat mengestimasi kinerja sistem pada kondisi tertentu dan memberikan alternatif desain terbaik sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.
- d) Simulasi dapat memungkinkan untuk melakukan proyeksi jangka panjang dalam waktu relatif singkat.
- e) Dapat menggunakan inputan data yang bervariasi.

Simulasi juga memiliki kekurangan diantaranya sebagai berikut (Suryani, 2006) :

1. Kualitas dan analisis model tergantung pada pembuat model. Tidak immune terhadap GIGO (Garbage In, Garbage Out). Yang berarti apabila kita memasukkan data yang salah, maka kita akan mendapatkan output simulasi yang salah juga.
2. Simulasi hanya mengestimasi karakteristik sistem berdasarkan masukan tertentu.

2.9 Sistem Dinamik

Sistem Dinamik adalah metode untuk meningkatkan pembelajaran dalam sistem yang kompleks (Sterman, J. D, 2000). Sistem dinamik difokuskan pada penentuan kebijakan dan bagaimana kebijakan tersebut menentukan tingkah laku masalah-masalah yang dapat dimodelkan. Metodologi sistem dinamik yang dimodelkan adalah berupa struktur informasi sistem yang didalamnya terdapat

sumber informasi dan jaringan aliran informasi yang saling terhubung. Penerapan sistem dinamik ini bisa digunakan dalam berbagai bidang seperti dalam bidang sosial, ekonomi, manajerial atau ekologi yang kompleks. Model sistem dinamik dapat dinyatakan dan dipecahkan secara numerik dalam sebuah bahasa pemrograman. Software atau tools yang dapat digunakan untuk mendukung pembuatan model sistem dinamik seperti Dynamo, Simile, Powersim, Vensim, I-think dan lain-lain.

Permasalahan dalam sistem dinamik merupakan permasalahan yang menggambarkan hubungan umpan balik atau sistem umpan balik. Proses umpan balik dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu (Suryani, 2006):

1. Umpan balik positif

Umpan balik ini menciptakan proses pertumbuhan, dimana suatu kejadian dapat menimbulkan akibat yang akan memperbesar kejadian berikutnya secara terus menerus. Umpan balik ini dapat menyebabkan ketidakstabilan, ketidakseimbangan, serta pertumbuhan yang kontinyu. Contoh: sistem pertumbuhan penduduk.

2. Umpan balik negatif

Umpan balik ini berusaha menciptakan keseimbangan dengan memberikan koreksi agar tujuan dapat dicapai. Contoh : sistem pengatur suhu ruangan. Dalam pemodelan Sistem Dinamik dilakukan proses feedback bersama struktur stock and flow, time delay, dan kenonlinieran yang menentukan alur suatu sistem. Perilaku yang paling kompleks biasanya timbul dari interaksi (feedback) antara komponen dari suatu sistem, bukan dari kompleksnya komponen tersebut. Namun sistem dinamik dapat menjadi lebih kompleks. Sistem Dinamik menekankan pada banyak loop, banyak kondisi, karakter nonlinear dari feedback sistem di kehidupan nyata. Menurut Sterman, J. D (2000) Dynamics Complexity timbul karena sistem bersifat:

1. *Dynamic*, perubahan sistem terjadi pada banyak skala waktu, dan perbedaan skala waktu ini kadang saling berinteraksi.

2. *Tightly coupled*, pelaku dalam sistem berinteraksi kuat dengan yang lainnya dan dunia sekelilingnya. Semuanya terhubung dengan yang lainnya.
3. *Governed by feedback*, karena kaitan erat diantara para pelaku, maka kegiatan di antara mereka saling feedback. · Nonlinear, suatu akibat kadang jarang sesuai dengan sebab. Nonlinieritas kadang berasal dari dasar fisik suatu sistem. Nonlinieritas juga timbul ketika berbagai faktor saling berhubungan dalam pengambilan keputusan.
4. *History-dependent*, pengambilan satu jalan sering menghalangi pengambilan yang lain dan menentukan dimana kita berakhir (ketergantungan alur).
5. *Self-organizing, dynamics* suatu sistem timbul secara spontan dari internal strukturnya. Seringkali sedikit gangguan kecil secara acak diperbesar dan dibentuk oleh struktur feedback, membangkitkan pola di dalam ruang dan waktu dan menciptakan ketergantungan alur.
6. *Adaptive*, adaptasi terjadi seperti orang yang belajar dari pengalaman, terutama ketika mereka belajar cara baru untuk mencapai tujuannya sewaktu mereka menghadapi rintangan.
7. *Counterintuitive*, dalam sistem yang kompleks sebab dan akibat jauh dalam ruang dan waktu ketika kita cenderung untuk mencari sebab yang mendekati kejadian yang kita cari untuk dijelaskan. Perhatian kita tertuju pada gejala- gejala yang rumit daripada mendasari penyebabnya.
8. *Policy resistant*, kompleksitas dari suatu sistem yang kita sertakan pada kemampuan kita untuk memahaminya, hasilnya malah banyak solusi yang nampaknya jelas nyata ke permasalahan gagal atau malah menambah buruk situasi.
9. *Characterized by trade-offs*, waktu tunda pada saluran umpan balik berarti respons jangka panjang dari sistem untuk intervensi selalu berbeda dari respons jangka pendeknya.

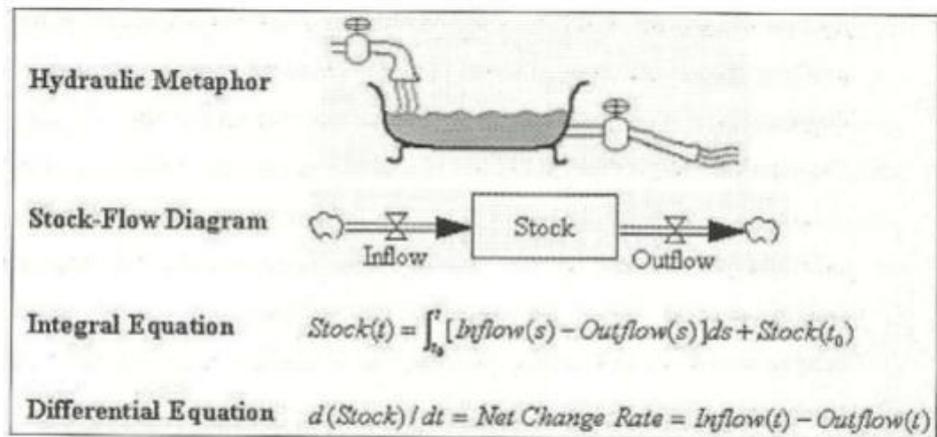
Hubungan sebab akibat dapat merupakan hubungan positif atau Reinforcing dengan simbol + atau R, maupun hubungan negatif atau Balancing

dengan simbol – atau B. Simbol-simbol pada CLD dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Simbol CLD

No	Simbol	Keterangan
1	+ / - atau S / O	+ / S menunjukkan kesamaan arah antara sebab akibat - / O menunjukkan perbedaan arah antara sebab dan akibat
2	B (Balancing) R (Reinforcing)	Balancing jika terjadi feedback loop negatif Reinforcing jika terjadi feedback loop positif (Untuk mengetahui B atau R adalah dengan menghitung jumlah - / O. Jika ganjil maka loop tersebut adalah B)

Stock Flow Diagram (SFD) sebagai konsep sentral dalam teori sistem dinamik. Menggambarkan struktur secara fisik, yang mana stock merupakan akumulasi yang dapat bertambah dan berkurang, sedangkan flow adalah proses yang menyebabkan stock bertambah atau berkurang. (Sterman, J. D, 2000) menjelaskan empat representasi setara atau ekuivalen dengan struktur stock dan flow : Hydraulic Metaphor, Stock-Flow Diagram, Integral Equation dan Differential Equation pada Gambar 2.5 (Sterman, J. D, 2000). Dalam Hydraulic Metaphor stok diwakili melalui air di bak mandi setiap saat. Jumlah air di bak mandi meningkat (air yang mengalir melalui keran) atau menurun (air yang mengalir keluar melalui saluran pembuangan), tidak termasuk faktor-faktor luar seperti penguapan. Untuk Stock-Flow Diagram telah memiliki makna matematika tidak ambigu sebagai stock terakumulasi flow-nya. Stock meningkatkan arus masuk melalui bahan dan penurunan arus keluar melalui materi. Untuk Integral Equation menggambarkan prinsip saham-aliran yang sama, sebagai Stock baru (t) didefinisikan melalui Stock awal (t₀) ditambah semua Inflow (t) dikurangi dengan Outflow (t).



Gambar 2.2 Representasi Struktur Stock and Flow

Pada model yang telah dibuat, data kuantitatif dimasukan dengan mengklik variabel-variabel yang tersedia seperti level, rate, dan auxiliary. Kemudian nilai atau formula matematika di inputkan ke dalam variabel-variabel tersebut untuk mengkalkulasi model. Adapun definisi dari masing-masing jenis variabel tersebut adalah sebagai berikut.

1. Variabel Level

Level merupakan variabel yang menyatakan akumulasi sejumlah benda, contohnya jumlah kendaraan, jumlah populasi. Level dipengaruhi oleh variabel rate dan dalam Vensim dinyatakan dengan simbol persegi panjang.

2. Variabel Rate

Rate adalah penambahan atau pengurangan pada level per satuan waktu. Dalam Vensim, rate dinyatakan dengan simbol seperti berikut :

3. *Auxiliary*

Auxiliary adalah merupakan variabel tambahan untuk menyederhanakan hubungan informasi antara level dan rate, variabel ini dihitung dari variabel lain. Simbol variabel ini adalah sebuah lingkaran.

Selain variabel-variabel tersebut, terdapat beberapa simbol yang berlaku lainnya yaitu simbol sumber (source dan sink), garis-garis aliran, titik awal informasi, heksagonal untuk konstanta, dan tabel.

2.10 Penelitian Terkait

Dalam penelitian ini terdapat beberapa penelitian terkait emisi gas rumah kaca pada produktivitas lahan sawah yang digunakan penulis sebagai referensi dalam penyusunan penelitian ini.

1. Penelitian dari (López Astudillo et al., 2014) yang berjudul “Evaluating Carbon Footprint Behavior in the Agriculture and Energy Sectors”. Penelitian ini menggunakan sistem dinamik sebagai alat fundamental yang memungkinkan untuk mengadopsi pendekatan sistemik-kompleks untuk proses penelitian pemodelan perilaku emisi gas rumah kaca di berbagai sektor. Penelitian ini menyajikan literatur review tentang studi kasus terkait, terutama di sektor pertanian dan energi. Dengan menggunakan model yang ada pada penelitian ini, sangat memungkinkan untuk mengidentifikasi skenario alternatif untuk indikator jejak karbon guna mendukung pengambilan keputusan strategis di lingkungan yang aman dengan risiko, biaya, dan waktu yang rendah. Penelitian ini menekankan pentingnya pemodelan perilaku jejak karbon sebagai sistem dinamis yang kompleks, terutama difokuskan pada sektor pertanian, yang memberikan kontribusi 38,1% dari emisi gas rumah kaca ke atmosfer.
2. Penelitian dari (Nieto, Meñaca-Guerrero, Osa, & Bellido-Odriozola., 2014) yang berjudul “Application Of The System Dynamics Methodology For Modeling And Simulation Of The Greenhouse Gas Emissions (GGE) In Cartagena De Indias (Colombia)”. Penelitian ini menerapkan metodologi sistem dinamik untuk pemodelan dan simulasi emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂) di distrik Cartagena de Indias (Kolombia). Tools yang digunakan oleh peneliti adalah Ventana Simulation (Vensim). Dalam model yang dikembangkan, variabel kunci yang menyebabkan emisi gas rumah kaca telah diidentifikasi. Berdasarkan data historis dari penelitian yang dilakukan, hasil simulasi dalam skenario yang berbeda dari skenario baseline, menunjukkan bahwa emisi CO₂ mengalami tren peningkatan bertahap dari waktu ke waktu. Situasi ini memerlukan perhatian khusus oleh otoritas perencanaan lingkungan dan perkotaan dalam menetapkan kebijakan dan strategi lingkungan. Pemodelan sistem dinamis dapat menjadi

alat yang sangat kuat dan murah yang memungkinkan peningkatan pengambilan keputusan.

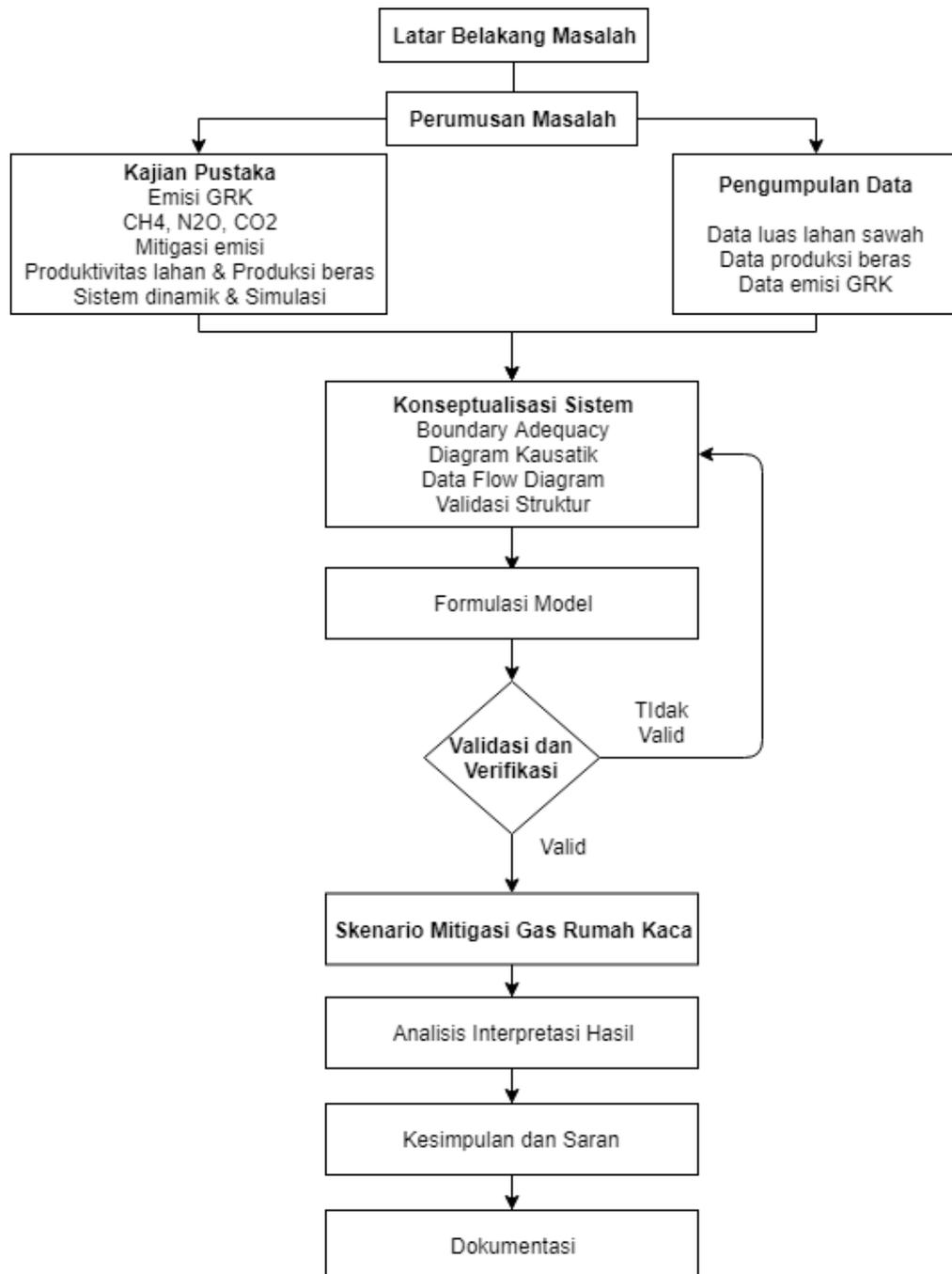
3. Penelitian dari (Tian et al., 2017) yang berjudul “Maintaining rice production while mitigating methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in China: Evaluating tradeoffs by using coupled agricultural systems models”. Dalam penelitian ini, peneliti melakukan evaluasi sistematis pertukaran timbal balik dari waktu ke waktu untuk mengkarakterisasi interaksi kompleks di seluruh komponen sistem pertanian. Penelitian ini menggunakan beberapa model yang akan disimulasikan untuk mengurangi produksi CH₄ dan N₂O pada sistem pertanian. Hasil dari penelitian ini adalah dengan skenario pengelolaan air dan pupuk yang tepat, yang dapat mengurangi emisi CH₄ dan N₂O secara signifikan tanpa menyebabkan pengurangan produksi beras. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengurangan aplikasi pupuk sebesar 5–35% dan pengenalan drainase midseason di sembilan lokasi penelitian menghasilkan penurunan emisi CH₄ sebesar 17-40% dan emisi N₂O sebesar 12–60%, tanpa konsekuensi negatif pada hasil padi.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan tahapan-tahapan yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini. Berikut ini merupakan tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini seperti pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

3.1 Kajian Pustaka

Tahap kajian pustaka digunakan untuk memperkuat dasar teori guna mendukung pengerjaan dan penelitian tesis. Pada tahapan ini dilakukan pengkajian terhadap literature-literatur yang terkait. Pengkajian dilakukan pada jurnal yang relevan, penelitian terdahulu, buku teks dan wawancara, terkait emisi GRK yang dihasilkan dari produktivitas lahan sawah serta metode untuk mitigasi GRK, khususnya di provinsi Jawa Timur.

3.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data, yang merupakan lanjutan daritahapan studi literature. Pengumpulan data dilakukan melalui penggalian informasi dari berbagai sumber yang berkaitan seperti artikel atau paper, situs bank data, dan penelitian sebelumnya. Tahapan ini dilakukan agar memperoleh data nilai mengenai luas lahan sawah, produksi beras, bibit padi yang digunakan, produktivitas padi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya, ketersediaan lahan di Jawa timur untuk pertanian padi, serta faktor-faktor yang menyebabkan meningkatnya emisi gas N₂O, CH₄ dan CO₂ akibat pertanian padi dan cara menanganinya.

3.3 Konseptualisasi Sistem

3.3.1 *Boundary Adequacy*

Validasi bertujuan untuk mengidentifikasi kesesuaian struktur variabel. Tes yang dapat digunakan untuk validasi struktural model SD adalah *boundary adequacy*, mengidentifikasi apakah konsep dan struktur penting untuk mengatasi masalah kebijakan bersifat endogen terhadap model (Qudrat-ullah, 2008). Tabel 3.1 menunjukkan variabel endogen dan variabel eksogen di setiap model. Proses validasi struktural dilakukan dengan menggunakan referensi dari masing-masing variabel.

Tabel 3.1 Variabel Eksogen dan Endogen

Sub model	Endogenous Variabel	Eksogenous Variabel	Reference
N2O emission	a. N2O Managed Soils b. Direct Emission c. Indirect Emission		Tian, et. al (2017), Lopez, et. al (2014), Rahmawati, et. al (2015),
CH4 emission	d. Rice Cultivation e. Irrigation		Tian, et. al (2017), Lopez, et. al (2014), Begum, et. al(2019), Feng, et. al (2013), Wu, et. al (2019)
CO2 emission	f. Urea g. Paddy land area		Lin, et. al (2018), C, A. E (2016), Marino, et. al (2016), Lopez, et. al (2014)
GHG Accumulation		a. Global warming b. Climate change	IPCC (2013), IPCC (2014), C, A. E (2016), Marino, et. al (2016), Lopez, et. al (2014)
Land productivity	h. Land productivity i. Harvesting land	c. Rainfall d. Temperature	Jiang, et. al (2017), Chen, et. al (2018)

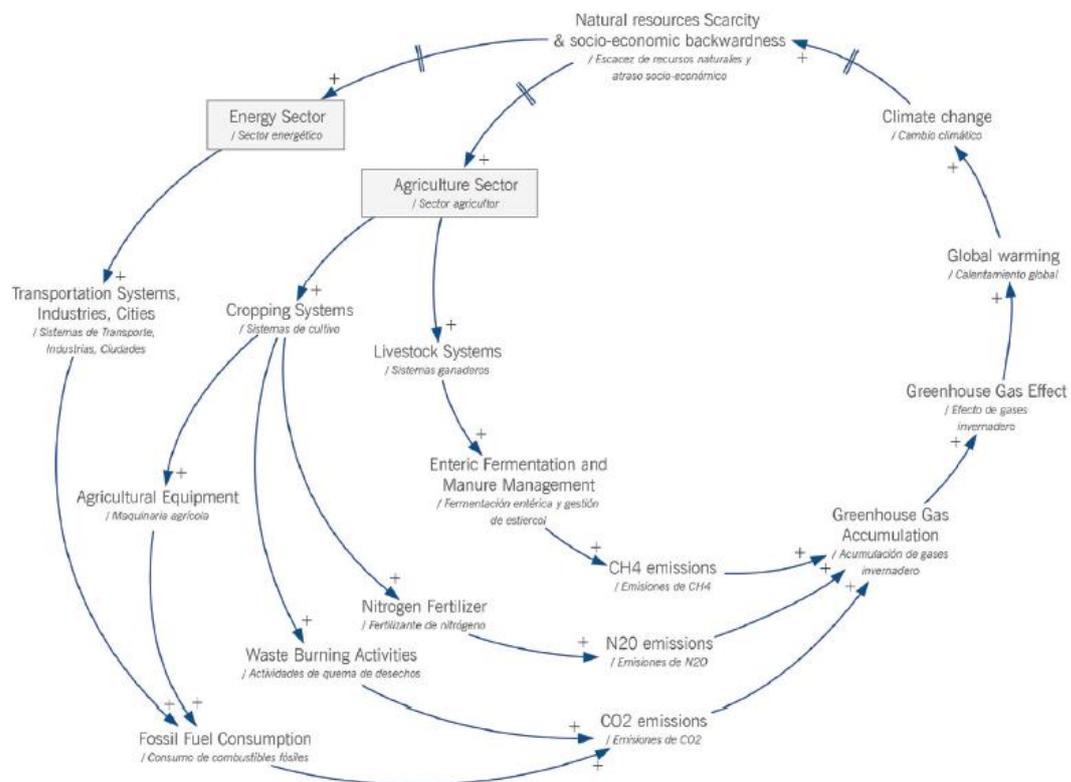
3.3.2 Diagram Kausatik

Diagram kausal ini digunakan untuk memvisualisasi sistem secara umum yang nantinya akan disimulasikan dengan metode sistem dinamik melalui komponen-komponen yang terlihat. Komponen-komponen inilah yang nanti akan menjadi variabel, parameter, dan konstanta yang saling tergantung dan mempengaruhi perilaku sistem. Pembuatan diagram kausal didasarkan pada hasil dari tahapan sebelumnya yaitu tahapan pengumpulan data dan kajian pustaka.

Diagram kausatik yang dibuat oleh peneliti nantinya akan bertujuan untuk memodelkan emisi GRK dari N2O, CH4 dan CO2 yang dihasilkan dari prouktivitas lahan sawah sehingga kemudian dapat dilakukan simulasi untuk melakukan mitigasi GRK pada lahan sawah.

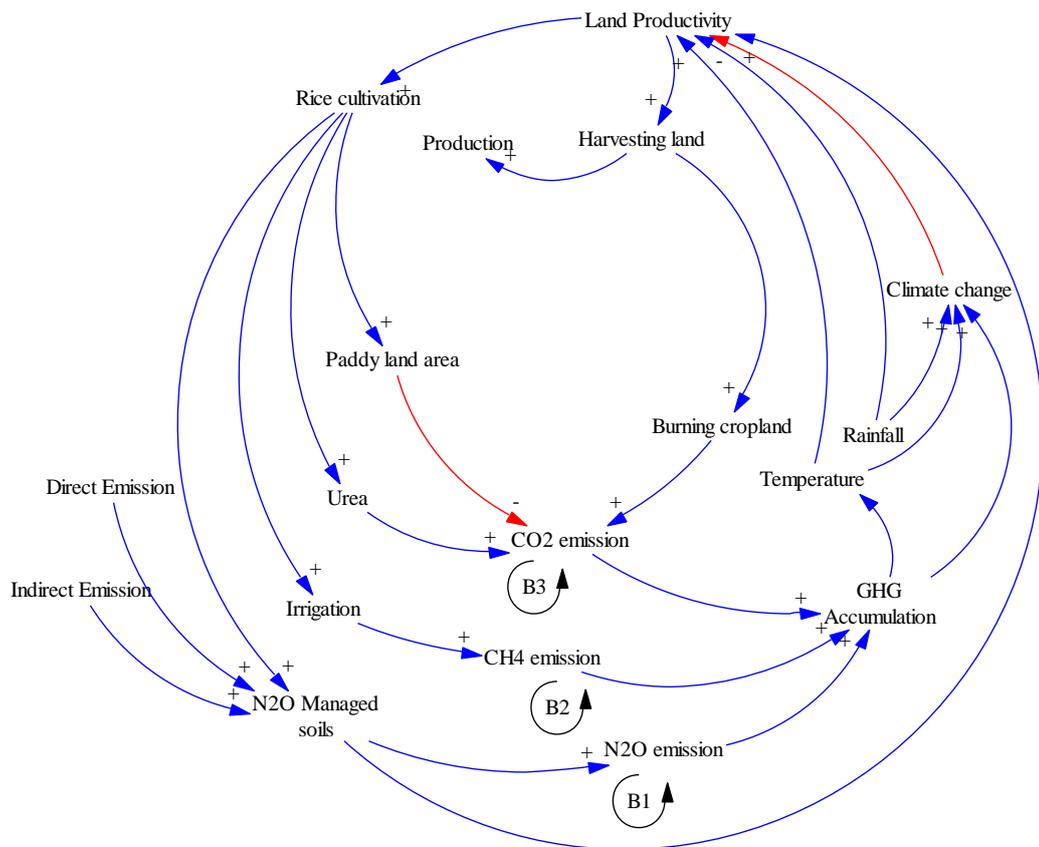
Berikut merupakan referensi yang digunakan dalam membuat pemodelan sistem oleh (López Astudillo et al., 2014). Perubahan iklim dapat dipengaruhi oleh global warming. Global warming disebabkan oleh akumulasi dari GRK

yang terdiri dari CO₂, CH₄ dan N₂O. Pada penelitian ini juga disebutkan faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi dihasilkannya GRK tersebut. Gambar 3.2 menunjukkan diagram kausatik dari penelitian ini.



Gambar 3.2 Diagram Kausatik López Astudillo,. et. al (2014)

Berdasarkan referensi yang diperoleh, maka dibuatlah diagram kausatik yang menggambarkan tujuan dari penelitian ini, yakni mengurangi emisi gas rumah kaca yang disebabkan oleh produktivitas padi. Berikut keterkaitan antar variabel yang digambarkan pada CLD:



Gambar 3.3 Diagram Kausatik Penelitian

3.3.3 Verifikasi Struktur

Verifikasi struktur bertujuan untuk mengidentifikasi apakah struktur model konsisten dengan pengetahuan deskriptif yang relevan dari sistem yang dimodelkan. Pada tahap ini, causal loop diagram yang telah dibuat di validasi strukturnya apakah struktur model sudah merepresentasikan sistem aktualnya atau belum. Verifikasi struktural melakukan dua pendekatan. Pertama, selama pembangunan model, menggunakan pengetahuan yang tersedia tentang sistem nyata dan yang kedua model struktur dari variable model, seperti yang diberikan pada Tabel 3.1.

3.3.4 Data Flow Diagram

Pada tahapan ini, dari model kausatik yang sudah dibuat, selanjutnya model tersebut akan diterjemahkan menjadi model sistem dinamik yang digambarkan melalui diagram stock dan flow (flow diagram). Diagram tersebut bertujuan untuk memudahkan dalam merancang skenario serta melakukan

analisis dari hasil yang dikeluarkan. Dalam pembuatan flow diagram ini terdapat beberapa komponen untuk membetuknya.

1. *Level*: Sebuah Kuantitas yang terakumulasi dari waktu ke waktu dan nilainya dirubah dengan mengakumulasikan nilai Rate.
2. *Rate*: Merupakan aliran yang mengubah nilai level
3. *Auxiliary*: Merepresentasikan formulasi yang dapat mempengaruhi rate atau variabel lainnya
4. *Source* dan *Sink* : Source adalah sistem diluar batasan model, Sink adalah Terminasi sistem

Selanjutnya dari tiap-tiap variabel pada model, dilakukan dengan cara memahami dan menguji konsistensi model apakah sudah sesuai dengan tujuan dan batasan sistem yang dibuat. Setelah model dibuat selanjutnya dilakukan tahap validasi dan verifikasi.

3.3.5 Verifikasi Dan Validasi

Hasil dari model flow diagram yang sudah dibuat selanjutnya akan dilakukan proses Verifikasi dan Validasi. Verifikasi adalah proses pengecekan terhadap model apakah sudah tidak terjadi kesalahan. Verifikasi dilakukan dengan cara memeriksa formulasi yang sudah dibuat sudah sesuai hubungan variabel dengan variabel lain dan memeriksa satuan satuan variabel dalam model. Jika tidak terdapat kesalahan pada model, maka model telah terverifikasi. Selanjutnya dilakukan proses Validasi untuk memastikan apakah model sudah sesuai menggambarkan kondisi sistem nyatanya. Proses Validasi ini dilakukan dengan dua cara pengujian yaitu validasi model dengan tatistik Uji Perbandingan Rata-Rata (mean comparison) atau dengan validasi model dengan Uji Perbandingan Variasi Aplitudo (% error variance) (Barlas, 1989).

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

$$E1 = \left| \frac{\bar{S}}{\bar{A}} \right|$$

Keterangan:

\bar{S} = Nilai Rata-rata Hasil Simulasi

\bar{A} = Nilai Rata-Rata Data

Model dianggap valid apabila $E1 \leq 5 \%$

b. Uji Perbandingan Variasi Amplitudo (% Error Variance)

$$E2 = \left| \frac{S_s - S_a}{S_a} \right|$$

Keterangan :

S_s = Standar Deviasi Model

S_a = Dtandar Deviasi Data

Model dianggap valid apabila $E2 \leq 30 \%$

3.3.6 Membuat Skenario Model

Pada tahapan ini model yang telah diverifikasi dan divalidasi akan dibuatkan skenario. Skenario model bertujuan untuk mengurangi produksi emisi GRK yang dihasilkan pada produktivitas lahan sawah. Dua alternatif skenario yang bisa digunakan dalam sistem dinamik, yaitu (Suryani, 2006):

1. Skenario Parameter

Skenario ini dilakukan dengan cara melakukan perubahan pada nilai parameter dari model yang sudah dibuat untuk mendapatkan hasil yang paling optimal atau sesuai dengan kebutuhan model yang telah kita bangun sebelumnya.

2. Skenario Struktur

Skenario ini dilakukan dengan cara melakukan perubahan sehingga di dapat struktur model yang baru dengan tujuan untuk mendapatkan peningkatan kinerja sistem dibandingkan sistem yang lama. Skenario jenis ini memerlukan pengetahuan yang cukup tentang sistem supaya struktur baru yang terbentuk dapat memperbaiki kinerja sistem.

3.3.7 Analisis dan Pembahasan Hasil Simulasi

Data hasil simulasi skenario model yang sudah dibuat kemudian akan dilakukan analisis untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh secara signifikan pada hasil yang diinginkan, pada tahapan ini keputusan atau kebijakan yang terkait dalam mengatasi kemacetan di kota surabaya dapat di tentukan untuk mendukung teknologi mitigasi emisi sebagai bagian dari *smart agriulture*.

3.3.8 Membuat Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan selanjutnya akan dilakukan kesimpulan hasil yang diperoleh dan kemudian memberikan saran-saran yang berkaitan dengan penelitian selanjutnya.

3.4 Metode Perhitungan IPCC 2006

Penelitian ini menggunakan metode IPCC Guidelines 2006 dengan pendekatan tier 1 dan 2. Tier 1 adalah penghitungan emisi GRK dengan menggunakan persamaan dasar (*basic equation*) dan default EF (*emission factor*) yang disediakan dalam IPCC Guidelines, sedangkan tier 2 merupakan metode yang lebih detail, persamaan yang sedikit kompleks, faktor emisi lebih spesifik lokasi berdasarkan hasil-hasil penelitian.

Perhitungan emisi GRK meliputi emisi CH₄ dari budidaya padi sawah, emisi N₂O dan CO₂ dari pemupukan urea, emisi N₂O dari pengelolaan tanah. Metode perhitungan yang dikuti dalam Pedoman IPCC untuk menghitung emisi/serapan GRK adalah melalui perkalian antara informasi aktivitas manusiadi dalam jangka waktu tertentu (data aktivitas, DA) dengan emisi/serapan per unitaktivitas (faktor emisi/serapan, FE).

$$\text{Emisi/Serapan GRK} = \text{DA} \times \text{FE}$$

keterangan:

DA : Data aktivitas, yaitu informasi terhadap pelaksanaan suatu kegiatan yang melepaskan atau menyerap gas rumah kaca yang dipengaruhi oleh kegiatan manusia, sedangkan

FE : Faktor Emisi, yaitu besaran yang menunjukkan jumlah emisi gas rumah kaca yang akan dilepaskan atau diserap dari suatu aktivitas tertentu.

3.4.1 Faktor Emisi CH₄

Angka acuan (*default*) emisi lahan sawah yang diberikan IPCC (2006) adalah 475 kg CH₄/ha/tahun atau sekitar = 0.475 ton CH₄ * 21 CO₂-e/CH₄ = 10 ton CO₂-e/ha/tahun dengan asumsi dua musim tanam dalam satu tahun. Untuk Indonesia diperkirakan emisi 160 kg CH₄/ha/musim atau sekitar = 6.72 ton CO₂-e/(ha . musim) (KLH, 2012). Berbagai sistem pengelolaan air, varietas padi dan jenis tanah mempunyai efek yang berbeda terhadap emisi dari lahan sawah.

Untuk itu jika tersedia data sebaran lahan sawah dengan berbagai sistem pengelolaan air, berbagai varietas padi dan jenis tanah , maka faktor koreksi seperti pada Tabel 3.2, Tabel 3.3, Tabel 3.4 Tabel 3.5, dan Tabel 3.6 dapat digunakan dalam perhitungan emisi.

Tabel 3.2 Faktor Koreksi untuk Rejim Air selama Periode Budidaya

Kategori	Pengelolaan air		Faktor koreksi (IPCC,1996)	Faktor Koreksi (Prihasto, et al. 2000,2002,2011)	
Padi Ladang	Tidak ada		0		
Padi sawah	Irigasi	Tergenang terus menerus (Default Acuan)	1	1	
		Pengairan berselang	Single Aeration (pengerinan satu kali)	0,5 (0,2-0,7)	0,46 (0,38-0,53)
			Single Multiple (Pengerinan berkali kali)	0,2 (0,1-0,3)	0,49 (0,19-0,75)
	Tadah hujan	Rawan Banjir	0,8 (0,5-1,0)	0,49 (0,19-0,75)	
		Rawan Kekeringan	0.4 (0-0.5)		

Sumber : IPCC 2006

Tabel 3.3 Faktor Skala Emisi CH4 untuk Rejim Air Sebelum Periode Penanaman

No.	Rejim air sebelum penanaman	Agregrat		Disagregat	
		Faktor Skala	Kisaran Bias	Faktor Skala	Kisaran Bias
1	Tidak tergenang sebelum penanaman (< 180 hari)	1.22-1.07	1.40	1	0.88-1.44
2	Tidak tergenang sebelum penanaman (>180 hari)			0.68	0.58-0.80
3	Tergenang sebelum penanaman (>30 hari)			1.90	1.65-2.18

Sumber : IPCC 2006

Tabel 3.4 Faktor Emisi dan Faktor Koreksi Emisi Metana (CH₄) dari Lahan Sawah untuk Berbagai Varietas Padi

No	Varietas	Rata-rata emisi (kg CH ₄ /ha/musim)	Faktor koreksi terhadap Varietas IR64
1	Gilirang	496,9	2,46
2	Fatmawati	365,9	1,81
3	Aromatic	273,6	1,35
4	Tukad Unda	244,2	1,21
5	IR 72	223,2	1,1
6	Cisadane	204,6	1,01
7	IR 64 ¹⁾	202,3	1
8	Margasari	187,2	0,93
9	Cisantana	186,7	0,92
10	Tukad Petanu	157,8	0,78
11	Batang Anai	153,5	0,76
12	IR 36	147,5	0,73
13	Memberamo	146,2	0,72
14	Dodokan	145,6	0,72
15	Way Apoburu	145,5	0,72
16	Muncul	127	0,63
17	Tukad Balian	115,6	0,57
18	Cisanggarung	115,2	0,57
19	Ciherang	114,8	0,57
20	Limboto	99,2	0,49
21	Wayrareem	91,6	0,45
22	Maros	73,9	0,37

Tabel 3.5 Faktor Koreksi untuk Jenis Tanah

No	Jenis Tanah	Faktor Koreksi Jenis Tanah
1	Alfisols	1.93
2	Andisols	1.02
3	Entisols	1.02
4	Histosols	2.39
5	Inceptisols	1.12
6	Oksisols	0.29
7	Ultisols	0.29
8	Vertisols	1.06

Sumber : IPCC 1996

Tabel 3.6 Faktor Koreksi untuk Rejim Air selama Periode Budidaya

No.	Bahan Organik	Faktor Konversi (CFOA)	Kisaran Bias
1	Jerami di tambahkan dalam jangka waktu pendek (< 30 hari) sebelum penanaman	1.0	0.97 - 1.04
2	Jerami di tambahkan dalam jangka waktu lama (> 30 hari) sebelum penanaman	0.29	0.20 - 0.40
3	Kompos	0.05	0.01 - 0.08
4	Pupuk Kandang	0.14	0.07 - 0.20

Sumber : IPCC 1996

Metode untuk menghitung jumlah emisi harian emisi CH₄ pada lahan sawah:

a. Data Aktivitas:

1. Luas panen padi sawah dalam setahun (A)
2. Lama budidaya padi dalam 1 tahun (t)
3. EF padi sawah dengan irigasi terus-menerus dan tanpa pengembalian bahan organik (EF_c) = 1.61 kg/ha/hari
4. Faktor skala lahan sawah irigasi intermitten = 0.46 (SF_w)
5. Faktor skala rejim air sebelum periode budidaya (SF_p) tidak digunakan = 0, karena tergenang sebelum penanaman < 30 hari
6. Jumlah pupuk kandang yang digunakan (ROA)
7. Faktor skala untuk jenis tanah inceptisols (SF_s)
8. Faktor skala varietas padi mekongga (SF_r)

b. Tahapan Perhitungan:

1. Menghitung faktor skala:

$$SF_0 = (1 + ROA_i \cdot CFOA_i)^{0.59}$$

2. Menghitung faktor emisi:

$$EF_i = (EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_0 \times SF_{s,r})$$

3. Menghitung emisi metan dari lahan sawah:

$$CH_4Rice = A \times t \times EF_i \times 10^{-6} \times 21$$

3.4.2 Faktor Emisi N₂O

Terdapat beberapa sumber gas N yang menyebabkan emisi langsung N₂O dari tanah yang dikelola adalah sebagai berikut: Pupuk N sintetis misalnya, Urea, ZA, NPK (*FSN*), N-organik yang digunakan menjadi pupuk contohnya, pupuk kandang, kompos, (*FON*), dan kotoran mengandung N yang disimpan di padang rumput atau tempat hewan merumput (*FPRP*), N dalam sisa tanaman bertindak sebagai tanaman yang memfiksasi N dan dari pembaharuan hijauan atau padang rumput (*FCR*)

Tabel 3.7 menunjukkan faktor emisi untuk menduga emisi N₂O langsung dari tanah yang dikelola menggunakan default faktor emisi IPCC (2006).

Tabel 3. 7 Default Faktor Emisi untuk Menghitung Emisi N₂O dari Tanah yang Dikelola

Faktor emisi (FE)	Angka acuan	Kisaran
EF ₁ untuk faktor emisi untuk emisi N ₂ O dari input N untuk lahan kering, kg N ₂ O-N per kg N input.	0.01	0.003 - 0.03
EF _{1FR} untuk faktor emisi untuk emisi N ₂ O dari input N untuk sawah irigasi, kg N ₂ O-N per kg N input.	0.003	0.000 - 0.006
EF _{2CG,Temp} untuk tanaman organik dan tanah padang rumput di daerah temperatur , kg N ₂ O-N per ha)	8.0	2-24
EF _{2CG,Trop} untuk tanaman organik dan tanah padang rumput di daerah tropis , kg N ₂ O-N / ha)	16.0	5-48
EF _{2F,Temp,Org,R} untuk tanah hutan yang kaya hara tanah di daerah temperate dan boreal, kg N ₂ O-N per ha	0.6	0.16 - 2.4
EF _{2F,Temp,Org,P} untuk tanah hutan yang miskin hara tanah di daerah temperate & boreal, kg N ₂ O-N per ha	0.1	0.02 - 0.3
EF _{2F,Trop} untuk tanah hutan organik di daerah tropis, kg N ₂ O-N per ha	8.0	0 – 24
EF _{3PRP, CPP} untuk sapi (sapi perah, sapi potong dan kerbau), unggas dan babi, kg N ₂ O-N per ha	0.02	0.007 - 0.06
EF _{3PRP, SO} untuk domba & ternak lain, kg N ₂ O-N per ha	0.01	0.003 - 0.03

Sumber : IPCC

Sumber-sumber N dari emisi N₂O tidak langsung dari tanah yang dikelola adalah 2006 sebagai berikut: Pupuk N sintetis misalnya, Urea, ZA, NPK (FSN), Norganik yang digunakan sebagai pupuk misalnya, pupuk kandang, kompos, lumpur limbah, limbah (FON), Urin dan kotoran mengandung N yang disimpan di padang rumput, padang penggembalaan atau tempat hewan merumput (FPRP), N dalam sisa tanaman (di atas tanah dan di bawah tanah) termasuk dari tanaman yang memfiksasi N dan dari pembaharuan hijauan atau padang rumput (FCR), Mineralisasi N yang berhubungan dengan hilangnya bahan organik tanah akibat perubahan penggunaan lahan atau pengelolaan tanah mineral (FSOM).

Tabel 3.8 menunjukkan faktor emisi untuk menduga emisi N₂O tidak langsung dari tanah yang dikelola menggunakan default faktor emisi IPCC (2006).

Tabel 3.8 Default Emisi, Faktor Volatilisasi dan Pencucian untuk Emisi N₂O Tidak Langsung dari Tanah

Faktor emisi (FE)	Angka acuan	Kisaran
EF ₄ [volatilisasi dan redeposit N], kg N ₂ O-N per kg NH ₃ -N + NO _x -N tervolatilisasi	0.010	0.002 -0.05
EF ₄ [volatilisasi dan redeposit N], kg N ₂ O-N per kg NH ₃ -N + NO _x -N tervolatilisasi	0.0075	0.0005-0.025
Frac _{GASF} [volatilisasi dari pupuk sintetis], kg NH ₃ -N + NO _x -N per kg N yang digunakan	0.10	0.03 -0.3
Frac _{GASM} [Volatilisasi dari semua pupuk N organik, urin dan kotoran yang dideposit ternak], kg NH ₃ -N +NO _x -N per kg N yang digunakan atau dideposit	0.20	0.05 -0.5
Frac _{LEACH-(H)} [N yang hilang karena pencucian/aliran permukaan untuk daerah dengan Σ CH pada musim hujan) - Σ evapotranspirasi potensial pada periode yang sama) > kapasitas tanah memegang air, OR dengan menggunakan irigasi (kecuali irigasi tetes)], kg N per N yang ditambahkan atau dideposit oleh ternak	0.30	0.1 - 0.8

Sumber : IPCC (2006)

Metode untuk menghitung jumlah emisi harian emisi Dinitrogen Oksida (N₂O) langsung dari pengolahan tanah:

a. Data Aktivitas:

1. Konsumsi pupuk Urea, ZA dan NPK ton/tahun.
2. Luas areal tanam padi
3. Penggunaan pupuk kandang tanaman padi sawah ton/ha/tahun
4. Kandungan N pada Urea, ZA dan NPK = 46%, 21% dan 15%
5. Kandungan N pada pupuk kandang, kompos, crop residu 16%, 0,5% dan 0.5%
6. Produksi padi ton/tahun
7. EF₁ = 0.01 dan EF_{1FR} = 0.03, EF₄ = 0.01
8. FracGASF = 0.1, FracGASM = 0.2

b. Tahapan Perhitungan:

FSN Lahan sawah = (ton urea x 0.46)+(ton ZA x 0.21)+(ton NPK x 0.15)

FON pupuk kandang padi = (ton pupuk kandang x luas lahan) x 0.16

FCR padi = (produksi padi per tahun/ton x 1000 x 0,005)

Menghitung emisi langsung N₂O:

N₂O Direct = {(FSN + FON + FCR) x EF_{1FR}} x 10⁻⁶ x 310

Metode untuk menghitung jumlah emisi harian emisi Dinitrogen Oksida (N₂O) tidak langsung dari pengolahan tanah:

Menghitung emisi N₂O tidak langsung:

N₂O-Indirect = (N₂O(ATD)-N)

=[(FSN x FracGASF)+((FON + FCR)x FracGASM)]x EF₄ x 10⁻⁶ x 310

3.4.3 Faktor Emisi CO₂

Faktor emisi adalah Jumlah GRK yang dikeluarkan oleh satu unit luas lahan, satu ekor ternak atau satu satuan berat pupuk N per satuan waktu. Faktor emisi, ton C per urea (EfUrea) sendiri menggunakan Default IPCC (Tier 1)

untuk faktor emisi urea sebesar 0.20 atau setara dengan kandungan karbon pada pupuk urea berdasarkan berat atom (20% dari CO(NH₂)₂) (IPCC, 2006).

Untuk menghitung emisi gas karbon dioksida (CO₂) dari lahan sawah yang menggunakan pupuk urea adalah dengan rumus berikut:

$$\text{CO}_2\text{- Emission} = (\text{Murea} \times \text{EFUrea})$$

Dimana :

CO₂- Emission = Emisi C tahunan dari aplikasi Urea, ton CO₂/tahun

M urea = Jumlah pupuk Urea yang diaplikasikan, ton/tahun (dari Kuisisioner)

EFurea = Faktor emisi, ton C per (Urea).

Default IPCC Tier 1 untuk faktor emisi urea adalah 0,20 atau setara dengan kandungan karbon pada pupuk urea berdasarkan berat atom (20% dari CO(NH₂)₂).

3.4.4 Nilai *Global Warming Potential* (GWP)

Nilai Global Warming Potential (GWP) digunakan untuk mengkonversi data emisi GRK non-CO₂ menjadi karbon dioksida ekuivalen (CO₂e), dengan mengikuti Second Assessment Report (2nd AR of IPCC). Nilai GWP dimaksud sebagaimana Tabel 3.9 di bawah ini.

Tabel 3.9 Nilai GWP

No.	Gas	GWP (CO ₂ e)
1	CO ₂	1
2	Methane (CH ₄)	21
3	Nitrous Oxide (N ₂ O)	310
4	PFC-14 (CF ₄)	6.500
5	PFC-116 (C ₂ F ₆)	9.200
6	Sulfur hexafluoride (SF ₆)	23.900

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai pengembangan model mitigasi banjir pada sektor pertanian di Jawa Timur. Dalam penelitian ini pengembangan model dilakukan dengan menganalisis kondisi saat ini dan mengumpulkan data terkait variabel yang signifikan. Ruang lingkup dari penelitian ini adalah mengenai identifikasi emisi GRK pada lahan sawah dan cara mitigasinya sesuai konsep *smart agriculture*. Hasil dari identifikasi tersebut akan dilakukan analisa lanjutan mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi emisi GRK pada lahan sawah. Dari hasil analisis data dan faktor-faktor berpengaruh tersebut, kemudian dibangun model stockflow diagram sesuai dengan tujuan dan batasan dari penelitian ini.

4.1 Budidaya Padi Sawah sebagai Penyumbang Emisi GRK

Lahan sawah di Provinsi Jawa Timur sebagian besar terbagi menjadi dua jenis tanah yaitu inceptisol dan latosol. Tanah berjenis ini sesuai untuk dijadikan sebagai lahan pertanian karena memiliki pH 4,5 – 6,5. Tanah jenis inceptisol dan latosol mengandung unsur hara yang dengan klasifikasi sedang hingga tinggi. Pengolahan tanah dengan pembajakan dan pemberian pupuk organik maupun kimia dapat meningkatkan kesuburan tanah jenis ini.

Pertanian di wilayah Jawa Timur tergolong tradisional bercampur modern. Dimulai saat pengolahan lahan sebelum ditanami, penyemaian benih, penanaman, pemupukan, penyiangan hingga proses panen menggunakan tenaga campuran antara manusia, hewan dan mesin. Cara tradisional dikerjakan dengan menggunakan hewan saat pembajakan, singkal dan cangkul, sedangkan disebut modern apabila dikerjakan dengan menggunakan alat seperti traktor tangan (*Hand Tractor*).

Proses pengolahan lahan sawah diawali dengan memisahkan sisa jerami, rumput dan tanaman gulma yang nantinya akan ditanam pada saat pembajakan berlangsung. Lahan sawah digenangi dengan tujuan pori-pori tanah terbuka dan struktur tanah menjadi lembek. Kemudian dilanjutkan dengan proses

pembajakan dan tanah didiamkan antara 15-20 hari dengan tujuan rumput gulma dan jerami dalam tanah dapat menyatu dan membusuk. Penambahan bahan organik dan pupuk kandang diperlukan untuk memperbaiki sifat fisika, kimia dan biologi tanah serta faktor lain yang tidak bisa didapatkan dari pupuk kimia. Lalu tanah digemburkan dan dibajak kembali menggunakan bantuan alat berupa papan kayu yang ditarik sapi atau kerbau. Setelah tanah siap untuk ditanami benih padi yang sudah disemai setelahnya akan dilakukan pemupukan. Pemupukan tanaman padi dilakukan sebanyak 2 kali yaitu saat tanaman padi berusia 18-25 hari setelah tanam dengan pupuk kimia urea per 1000 m untuk masing-masing kecamatan adalah antara 15-20 Kg. Pada pemupukan kedua pupuk urea 10 kg-15 kg dilakukan saat padi berusia sekitar 30-45 hari setelah tanam. Sedangkan untuk jenis pupuk NPK diberikan sekitar 15 kg-30 kg selama masa budidaya. Pemupukan ini diberikan dan disesuaikan dengan kondisi lapangan. Pupuk urea dapat digantikan dengan pupuk organik seperti pupuk kandang dari kotoran ternak, kompos, dan pupuk hijau.

Varietas benih padi yang dominan ditanam oleh petani di Jawa Timur sebagian besar adalah mikongga, ciherang dan IR 64. Varietas padi yang ditanam untuk varietas mikongga memiliki masa tanam 125 hari, varietas IR64 dengan masa tanam 120 hari, dan varietas ciherang dengan masa tanam 135 hari.

Namun berdasarkan laporan para peneliti, dari aktifitas pengolahan sawah dilansir sebagai salah satu penyebab utama peningkatan pemanasan global. Budidaya padi sawah menyumbang emisi gas rumah kaca ke atmosfer yang menyebabkan suhu dipermukaan bumi meningkat serta perubahan iklim termasuk perubahan pola curah hujan. Perubahan ini menimbulkan dampak negatif dalam penentuan musim tanam padi yang akan membuat hasil produksi menurun akibat kegagalan panen.

Budidaya padi sawah berkontribusi dalam peningkatan emisi gas rumah kaca berupa karbon dioksida (CO₂) dari penggunaan pupuk urea, nitrogen dioksida (N₂O) dari pemupukan dan CH₄ dari pengelolaan sawah. Data yang didapat dari profil emisi *Indonesia Second National Communication to the UNFCCC*, 2009 menunjukkan aktifitas pertanian menyumbang emisi CO₂ sebesar 4,5 % untuk skala global. Pada tahun 1998/1999 emisi N₂O yang dihasilkan dari

penggunaan pupuk kimia di Indonesia sebesar 22,23 Gg N₂O. Melalui aktifitas pengelolaan sawah menyumbang 76% dari total gas metan (CH₄) yang diemisikan dari sektor pertanian berdasarkan laporan ADB-GEF-UNDP/ALGAS pada tahun 1998. Pemerintah berkomitmen untuk menurunkan emisi menjadi 26% lebih rendah dari skenario proyeksi BAU pada tahun 2020. Dari sektor pertanian diharapkan dapat menyumbangkan penurunan jumlah emisi sebesar 0,3 % di tahun 2020 mendatang. Langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi tersebut adalah dengan memperhitungkan beban emisi gas rumah kaca menggunakan metode yang dikeluarkan oleh IPCC tahun 2006.

4.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui penggalian informasi dari berbagai sumber yang berkaitan seperti artikel atau paper, situs bank data, dan penelitian sebelumnya. Melalui tahap pengumpulan data ini diperoleh data nilai mengenai luas lahan sawah, produksi beras, bibit padi yang digunakan, produktivitas padi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya, ketersediaan lahan di Jawa timur untuk pertanian padi serta faktor-faktor atau jenis aktivitas yang menyebabkan meningkatnya emisi gas N₂O, CH₄ dan CO₂ akibat pertanian padi dan cara menanganinya. Pada tabel berikut menunjukkan jenis data dan sumber data sejak tahun 2007 hingga 2018.

Tabel 4.1 Data Aktivitas Sumber Emisi

No	Aktivitas Sumber Emisi	Jenis Data	Sumber Data
1	Lahan Sawah	Jenis varietas	Dinas Pertanian Provinsi Surabaya
		Jenis sawah irigasi	
		Kedalaman air	
		Masa penggenangan sebelum penanaman	
		Jenis tanah	

2	Pemupukan Urea	Dosis urea	Permentan (2007)	
		Jenis Pupuk		
3	Emisi langsung dan tidak langsung N ₂ O dari tanah	Dosis pupuk N sintetis (urea, ZA, phonska)	Permentan (2007)	
		Dosis pupuk N organik		
4	Lahan Sawah	Faktor koreksi varietas	Studi literatur	
		Faktor konversi untuk penggunaan berbagai jenis bahan organik		
		Faktor skala berdasarkan rejim air		
		Faktor koreksi jenis tanah	IPCC (2006)	
		Luas sawah padi		BPS
		Luas panen		BPS
5	Pemupukan Urea	Faktor Emisi Urea	IPCC (2006)	
6	Emisi langsung dan tidak langsung N ₂ O dari tanah	Dosis pupuk N sintetis (urea, ZA, phonska)	IPCC (2006)	
		Dosis pupuk N organik		

4.2.1 Data Emisi CH₄

Data historis mengenai pertumbuhan emisi CH₄ dari tahun 2007 sampai 2018 mengalami perubahan naik turun. Selama kurun waktu tersebut rata-rata emisi CH₄ sebesar 18.292,5 Gg CO₂ eq dengan nilai tertinggi pada tahun 2018 sebesar 22.312 Gg CO₂ eq. Data mengenai produktivitas padi dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Emisi CH4

Tahun	Data (Gg CO₂eq)
2007	14.761
2008	15.053
2009	16.253
2010	16.181
2011	17.857
2012	18.476
2013	18.922
2014	18.477
2015	18.621
2016	19.341
2017	19.553
2018	19.800

(Sumber: Website Kementerian Lingkungan Hidup)

4.2.2 Data Emisi N₂O

Data historis mengenai pertumbuhan emisi N₂O dari tahun 2007 sampai 2018 mengalami perubahan naik turun. Selama kurun waktu tersebut rata-rata emisi N₂O sebesar 8.566,18 Gg CO₂ eq dengan nilai teeringgi pada tahun 2010 sebesar 9907 Gg CO₂ eq. Data mengenai produktivitas padi dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Emisi N₂O

Tahun	Data (Gg CO₂ eq)
2007	7.187
2008	7.728
2009	8.349
2010	9.998
2011	9.200
2012	9.310
2013	8.095
2014	8.857
2015	8.461
2016	9.065
2017	8.786
2018	7.920

(Sumber: Website Kementerian Lingkungan Hidup)

4.2.3 Data Emisi CO2

Data historis mengenai pertumbuhan emisi CO2 dari tahun 2007 sampai 2018 mengalami perubahan naik turun. Selama kurun waktu tersebut rata-rata emisi CO2 sebesar 893 Gg CO2 eq dengan nilai tertinggi pada tahun 2018 sebesar 1098 Gg CO2 eq. Data mengenai produktivitas padi dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Emisi CO2

Tahun	Data (Gg CO2 eq)
2007	770
2008	859
2009	853
2010	915
2011	901
2012	931
2013	906
2014	985
2015	967
2016	1020
2017	1124
2018	1096

(Sumber: Website Kementerian Lingkungan Hidup)

4.3 Pengembangan Model Penelitian

Pada tahap pengembangan model penelitian ini terdiri dari 5 tahapan (Stermann, 2000) yaitu *problem articulation*, *dynamics hypothesis*, *formulating a simulation model*, *testing*, dan *policy design and evaluation*. Berikut merupakan tahapan pemodelan berdasarkan Stermann.

Langkah awal yaitu *problem articulation* dilakukan untuk mendefinisikan permasalahan dalam sistem produktivitas padi di Jawa Timur. Langkah kedua *formulating a dynamics hypothesis* untuk merumuskan hipotesis awal untuk membentuk proses pemodelan meliputi pembuatan subsystem diagram pertanian, model boundary pertanian, causal loop diagram, dan stock and flow. Langkah ketiga *formulating a simulation model* untuk menguji hipotesis dari causal loop diagram dengan persamaan, parameter dan kondisi existing pada

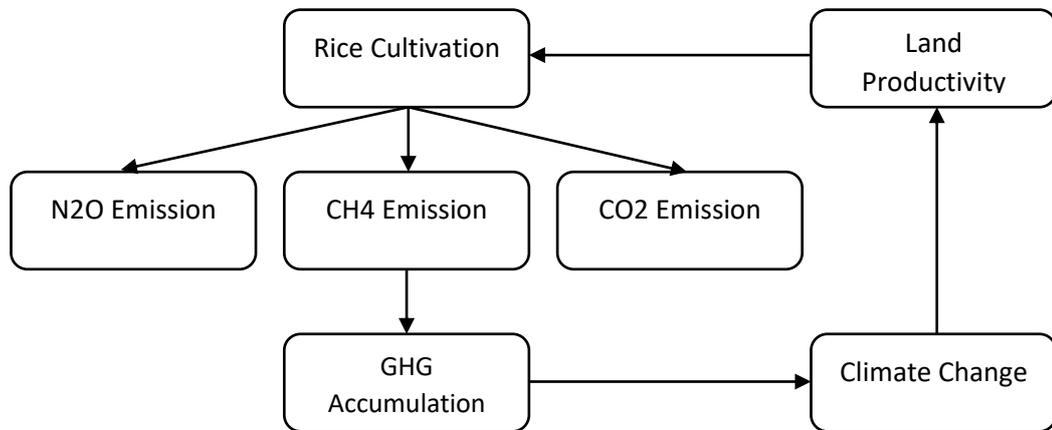
sistem pertanian di Jawa Timur. Langkah keempat testing meliputi pengujian membandingkan model simulasi dengan sistem sebenarnya. Langkah kelima adalah policy design and evaluation mencakup pembuatan strategi, struktur, dan aturan keputusan yang sepenuhnya baru.

4.3.1 Problem Articulation

Budidaya padi sawah berkontribusi dalam peningkatan emisi gas rumah kaca berupa karbon dioksida (CO₂) dari penggunaan pupuk urea, nitrogen dioksida (N₂O) dari pemupukan dan CH₄ dari pengelolaan sawah. Data yang didapat dari profil emisi *Indonesia Second National Communication to the UNFCCC, 2009* menunjukkan aktifitas pertanian menyumbang emisi CO₂ sebesar 4,5 % untuk skala global. Pada tahun 1998/1999 emisi N₂O yang dihasilkan dari penggunaan pupuk kimia di Indonesia sebesar 22,23 Gg N₂O. Melalui aktifitas pengelolaan sawah menyumbang 76% dari total gas methan (CH₄) yang diemisikan dari sektor pertanian berdasarkan laporan ADB-GEF-UNDP/ALGAS pada tahun 1998. Pemerintah berkomitmen untuk menurunkan emisi menjadi 26% lebih rendah dari skenario proyeksi BAU pada tahun 2020. Dari sektor pertanian diharapkan dapat menyumbangkan penurunan jumlah emisi sebesar 0,3 % di tahun 2020 mendatang. Langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi tersebut adalah dengan memperhitungkan beban emisi gas rumah kaca menggunakan metode yang dikeluarkan oleh IPCC tahun 2006.

4.3.2 Dynamic Hypothesis

Setelah melalui tahap pengumpulan informasi, data dan kajian pustaka awal, kerangka pemikiran teoritis yang diajukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.1. Berdasarkan kerangka teoritis yang telah dirancang dapat diketahui keterhubungan antar aktivitas utama pada sistem produktivitas lahan persawahan. Di mana produktivitas lahan sawah meningkatkan aktivitas budidaya padi yang berpengaruh pada tumbuhnya emisi GRK. Akumulasi dari emisi GRK akan meningkatkan efek pemanasan global sehingga menyebabkan perubahan iklim. Perubahan iklim akan berpengaruh pada produktivitas lahan mengingat padi sangat rentan terhadap cuaca pada saat proses pertumbuhannya. Diagram pusat yang dirancang berikut akan menggambarkan sistem tentang bagaimana proses GRK terjadi dalam produktivitas sawah.



Gambar 4.1 Kerangka Teoritis

4.3.3 Boundary Adequacy

Tahapan *boundary adequacy test* dilakukan dalam langkah-langkah pengembangan model untuk mengukur bahwa model sesuai untuk tujuan yang ditetapkan yaitu mengurangi laju emisi GRK pada lahan sawah. Hal ini digunakan untuk membantu tahap pendefinisian batasan model penelitian dengan mendata variabel apa saja yang perlu digunakan dan dihapus dari model, diantaranya variabel yang masuk dalam faktor endogen, eksogen yang saling berpengaruh dan excluded. Hasil pengujian memungkinkan mengumpulkan bukti bahwa faktor penting dan parameter menentukan perilaku dinamis sistem yang sebenarnya termasuk dalam model dan bahwa batas-batas dan tingkat detail menggambarkan sistem nyata dengan memadai (Dace, Elina 2015). Batasan sistem untuk model emisi gas rumah kaca pada lahan pertanian ditunjukkan pada Tabel 4.5 sebagai berikut.

Tabel 4.5 Boundary Adequacy

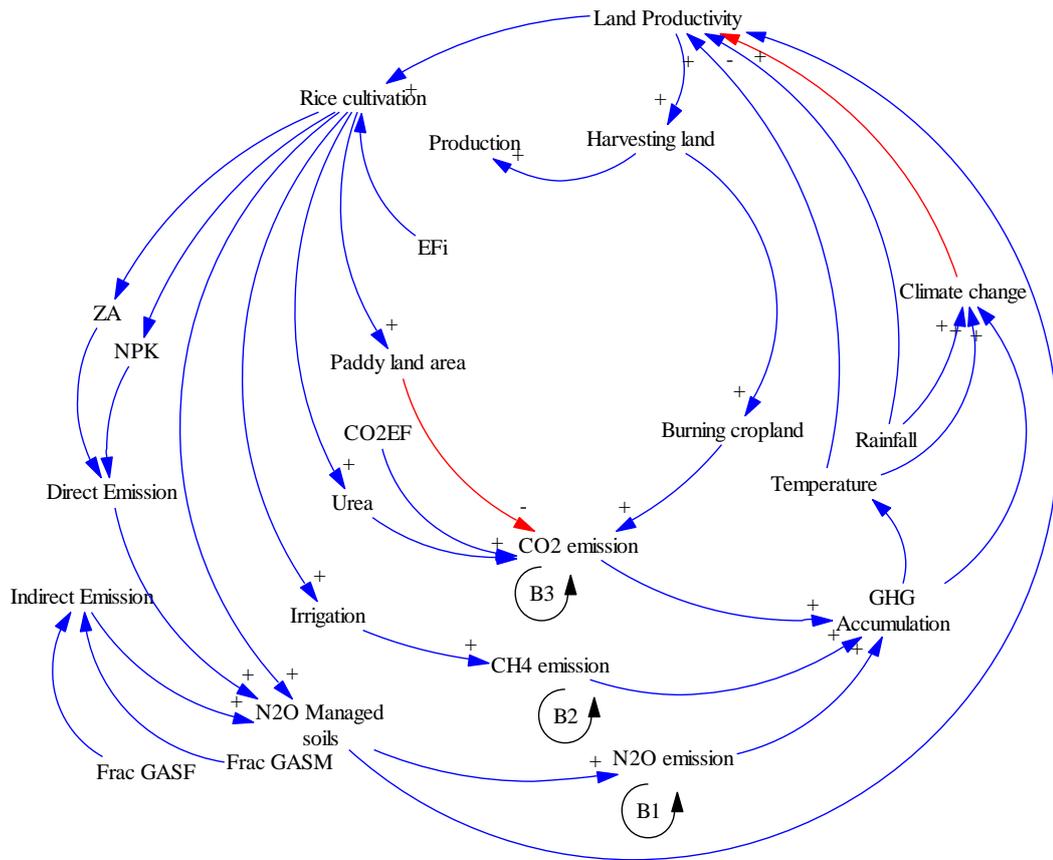
Sub model	Endogenous Variabel	Eksogenous Variabel	Reference
N2O emission	a. N2O Managed Soils b. Direct Emission c. Indirect Emission		Tian, et. al (2017), Lopez, et. al (2014), Rahmawati, et. al (2015),
CH4 emission	d. Rice Cultivation e. Irrigation		Tian, et. al (2017), Lopez, et. al (2014), Begum, et. al(2019),

CO2 emission	f. Urea g. Paddy land area		Feng, et. al (2013) Lin, et. al (2018), C, A. E (2016), Marino, et. al (2016), Lopez, et. al (2014)
GHG Accumulation		e. Global warming f. Climate change	IPCC (2013), IPCC (2014), C, A. E (2016), Marino, et. al (2016), Lopez, et. al (2014)
Land productivity	h. Land productivity i. Harvesting land	g. Rainfall h. Temperature	Jiang, et. al (2017), Chen, et. al (2018)

4.3.4 Causal Loop Diagram

Diagram kausal ini digunakan untuk memvisualisasi sistem secara umum dan disimulasikan dengan metode sistem dinamik melalui komponen-komponen yang terlihat. Pembuatan diagram kausal didasarkan pada hasil dari tahapan sebelumnya yaitu tahapan pengumpulan data dan kajian pustaka. Diagram kausal pada penelitian ini memodelkan emisi GRK dari N₂O, CH₄ dan CO₂ yang dihasilkan dari produktivitas lahan sawah dimulasikan untuk melakukan mitigasi GRK pada lahan sawah. Berikut merupakan Causal Loop Diagram ditunjukkan seperti pada Gambar 4.2.

Lahan persawahan yang ada di Indonesia sebagian besar masih diolah dengan keadaan tergenangi air. Petani menginginkan air menggenangi tanaman padi karena dapat mengurangi pertumbuhan gulma yang kerap menguras biaya dan tenaga petani dalam mengelola sawah. Metana adalah salah satu GRK yang dihasilkan melalui dekomposisi anaerobik bahan organik. Untuk mengurai bahan organik menjadi CH₄ dibutuhkan kondisi redoks potential dibawah -100 mV dan pH berkisar antara 6-7. Lahan sawah tergenang adalah kondisi ideal untuk proses ini. Selain dekomposisi bahan organik, sumber pelepasan CH₄ lainnya adalah fermentasi enterik dari pencernaan hewan ternak, proses pembakaran bahan organik yang tidak sempurna (*incomplete combustion*), serta akibat proses eksplorasi pertambangan minyak dan gas.



Gambar 4.2 CLD Penelitian

Data aktifitas yang paling sederhana untuk menghitung emisi N2O adalah jumlah pupuk N yang digunakan untuk lahan pertanian, baik yang berasal dari pupuk buatan, maupun pupuk organik. Estimasi jumlah penggunaan pupuk organik dan kandungan N-nya jauh lebih rumit dibandingkan dengan penggunaan pupuk buatan. Karena itu data aktifitas adalah jumlah penggunaan masing masing pupuk dikalikan dengan kandungan N-nya.

Penggunaan pupuk urea pada budidaya pertanian menyebabkan lepasnya CO2 yang diikat selama proses pembuatan pupuk. Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) diubah menjadi amonium (NH_4^+), ion hidroksil (OH^-), dan bikarbonat (HCO_3^-) dengan adanya air dan enzim urease. Mirip dengan reaksi tanah pada penambahan kapur, bikarbonat yang terbentuk selanjutnya berkembang menjadi CO2 dan air.

4.4 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem dilakukan dengan menggambarkan karakteristik sistem produktivitas lahan sawah dengan menggunakan *flow diagram*. Hal ini dilakukan dengan cara menghubungkan keterkaitan antar indikator keberlanjutan yang telah ditentukan sebelumnya dengan data-data yang tersedia. Dalam menggambarkan keterkaitan antara masing-masing indikator dan data yang dipergunakan, penulis menggunakan teknik-teknik perhitungan standar dalam perhitungan emisi GRK yang berasal dari berbagai sumber baik literatur dan sumber-sumber lain.

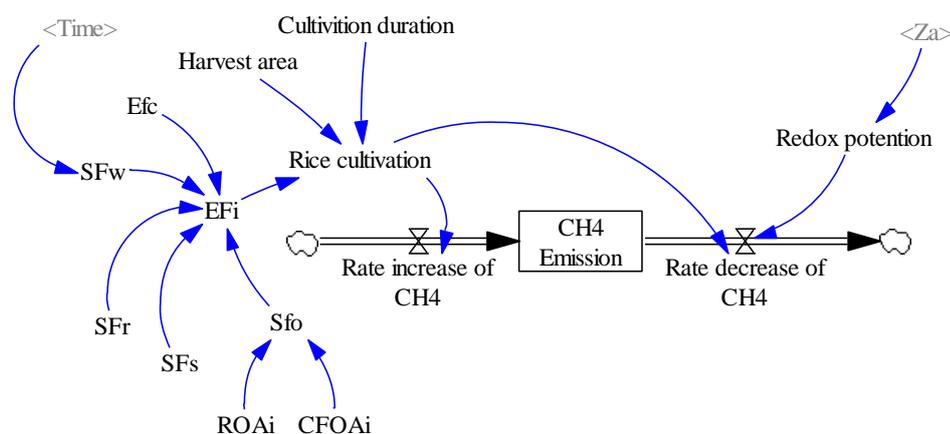
4.4.1 Sub Model Emisi CH₄

Lahan sawah di Indonesia rata-rata dikelola dalam keadaan tergenang air. Tujuan petani dalam menggenangi tanaman padi karena dapat mengurangi pertumbuhan gulma yang menguras biaya dan tenaga petani dalam pengolahan sawah. Salah satu GRK yang dihasilkan melalui dekomposisi anaerobik bahan organik adalah metana. Guna mengurai bahan organik menjadi CH₄ diperlukan kondisi redoks potential di bawah -100 mV dan pH berkisar antara 6-7. Lahan sawah dengan kondisi tergenang merupakan kondisi yang ideal untuk proses ini. Gas metana memiliki daya pemanasan global (GWP) sekitar 21 kali gas CO₂, maksudnya satu ton CH₄ mempunyai efek pemanasan global setara dengan 23 ton CO₂. Untuk itu, dalam perhitungan emisi metana perlu dikonversi ke CO₂ ekuivalen (CO₂e) dengan menggunakan faktor pengali 23.

Luas lahan sawah atau luas panen sawah adalah data aktivitas yang sangat penting untuk menentukan emisi CH₄ dari lahan sawah. Perbedaan data luas sawah beririgasi teknis dan non teknis serta sawah tadah hujan akan memberikan pengaruh perkiraan jumlah musim tanam dan lama penggenangan lahan sawah dalam satu tahun. Selain itu, sistem pengelolaan air, misalnya irigasi terus menerus dan irigasi terputus (*intermittent*) juga mempengaruhi lama penggenangan.

Setyanto et al. (2002) dan Wiharjaka et al. (1999) berpendapat bahwa berbagai varietas tanaman padi dapat mempengaruhi jumlah CH₄ yang diemisikan. Sehingga penggunaan data dari aktivitas yang membedakan luas lahan sawah yang ditanami dengan jenis-jenis varietas tersebut akan dapat

meningkatkan akurasi perhitungan. Jika data aktivitas yang tersedia adalah luas panen, maka pada saat perhitungan emisi di lahan sawah, tidak perlu mengalikannya dengan jumlah musim tanam dalam satu tahun. Akan tetapi jika data aktivitas yang tersedia adalah luas baku lahan sawah, maka perhitungan harus dikalikan dengan jumlah musim tanam dalam satu tahun, karena faktor emisi yang tersedia adalah emisi dalam 1 musim tanam. Berikut adalah sub model luas lahan padi dan luas panen ditunjukkan pada Gambar 4.3.



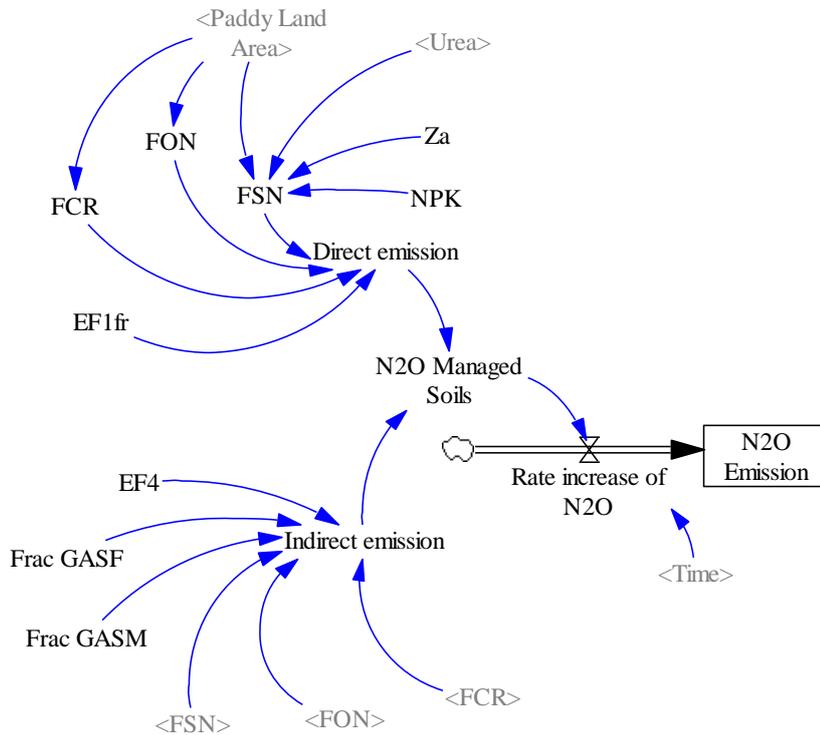
Gambar 4.3 Sub Model CH4 Emisi

4.4.2 Sub Model Emisi N₂O

Emisi N₂O dari pengelolaan tanah secara langsung terjadi melalui volatilisasi N menjadi NH₃ dan oksidasi N, serta deposisi gas dan produk sampingan yang terbentuk yaitu NH₄⁺ dan NO₃⁻ di dalam tanah dan dipermukaan air (IPCC,2006; Glenn *et al*,2012). Proses leaching atau pencucian dalam bentuk nitrat dan aliran dari lahan padi sawah yang telah dipupuk juga menjadi penentu terjadinya Emisi N₂O (IPCC, 2006). Nilai emisi N₂O dapat meningkat seiring dengan meningkat nya penggunaan pupuk N sintesis (urea, ZA, NPK), unsur N organik (pupuk kandang, kompos, lumpur limbah, dan limbah) dan N dalam sisa tanaman (jerami). Perhitungan N₂O langsung dari pengelolaan tanah adalah dengan menambahkan Jumlah N organik lalu dikali dengan faktor emisi gas N₂O senilai 0,003 kg N₂O-N/kg N. Sebelum dijumlahkan , masing-masing sumber N di kalikan dengan nilai kandungannya. Nilai kandungan masing-masing berbeda, misalnya untuk kandungan N pada

urea senilai 0,46, ZA senilai 0,21, npk phonska senilai 0,15, pupuk kandang senilai 0,16 dan crop residu senilai 0,005.

Emisi gas N₂O tidak langsung berasal dari segala unsur N baik dari pupuk sintesis, N dari jerami, dan N dari bahan organik yang tercuci atau menguap ke atmosfer dalam bentuk N₂O. Dalam pedoman IPCC afolu 2006 fraksi volatisasi dari pupuk sintesis menggunakan nilai 0,1 (Gg NH₃-N+N₂O-N/Gg N). Perhitungan emisi gas N₂O tidak langsung dilakukan dengan mengalikan antara masing-masing unsur N dengan nilai kandungan untuk masing-masing pupuk sintesis yaitu 0,46 untuk urea, 0,21 untuk ZA, 0,15 untuk NPK phonska, 0,16 untuk pupuk kandang dan jerami 0,005. Setelahnya pupuk sintesis dan organik dikali dengan masing-masing fraksinya dan dijumlahkan, setelah dijumlahkan dikali dengan faktor emisi N penguapan & redeposisi 0,01 (Gg N₂O-N/Gg NH₃-NN₂O-N). Berikut adalah sub model N₂O yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.

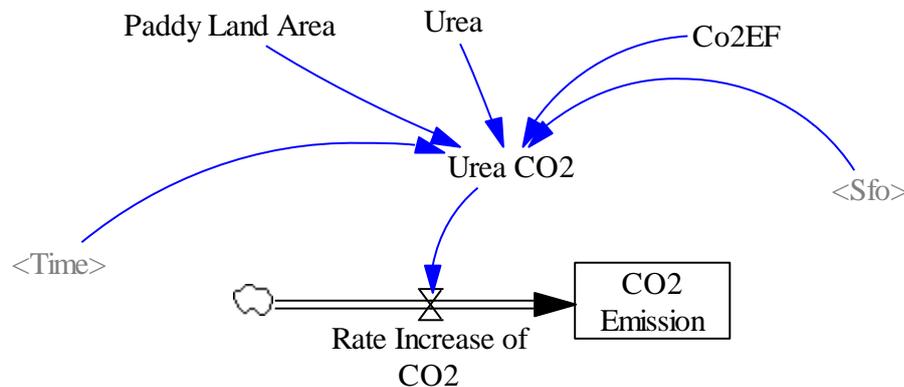


Gambar 4.4 Sub Model N₂O Emisi

4.4.3 Sub Model Emisi CO2

Penggunaan pupuk urea pada budidaya pertanian menyebabkan lepasnya CO₂ yang diikat selama proses pembuatan pupuk. Urea (CO(NH₂)₂) diubah menjadi amonium (NH₄⁺), ion hidroksil (OH⁻), dan bikarbonat (HCO₃⁻) dengan adanya air dan enzim urease. Mirip dengan reaksi tanah pada penambahan kapur, bikarbonat yang terbentuk selanjutnya berkembang menjadi CO₂ dan air.

Kategori sumber ini perlu dimasukkan karena pengambilan (fiksasi) CO₂ dari atmosfer selama pembuatan urea diperhitungkan dalam sektor industri. Emisi CO₂ dari penggunaan pupuk urea dihitung dengan persamaan berikut: $CO_2\text{-Emission} = (MUrea \times EFUrea)$. Sub model emisi CO₂ pada tahun 2007 sampai 2018 dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Sub Model CO₂ Emisi

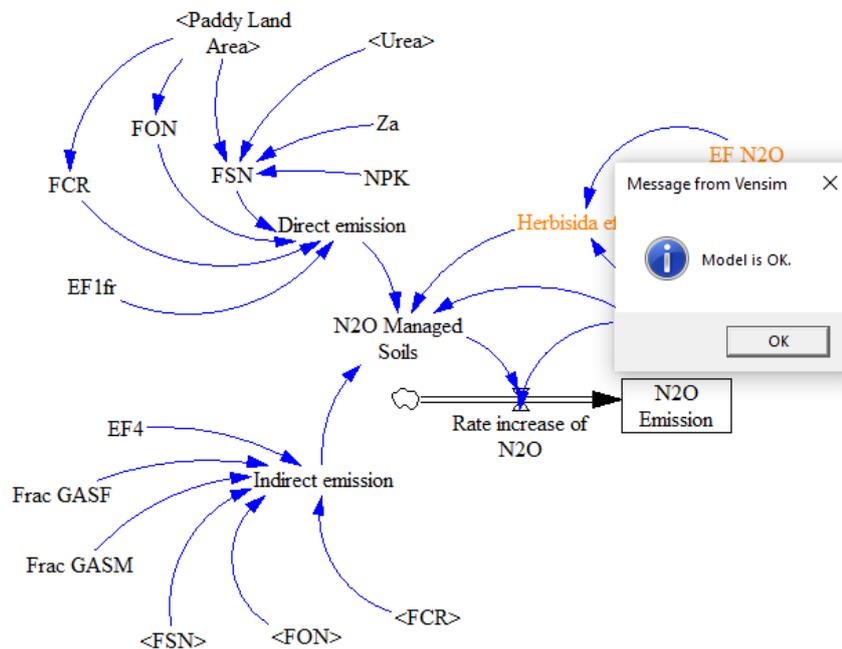
4.4.4 Sub Model Produktivitas Lahan Sawah

Produktivitas padi adalah produksi padi per satuan luas lahan. Menurut Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Jawa Timur (2019), tingkat produktivitas padi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya penggunaan varietas bibit unggul sebesar 18 persen, ketersediaan air sebagai irigasi sebanyak 20 persen, takaran penggunaan pupuk sebesar 30 persen, dan sisanya merupakan faktor eksternal seperti temperature dan curah hujan yang mempengaruhi 20 persen produktivitas padi. Penentuan jenis bibit unggul yang digunakan akan membantu dalam meningkatkan produktivitas, penentuan bibit unggul biasanya akan tahan terhadap penyakit dan perubahan iklim (Stuart, et al., 2018). Berikut adalah sub model produktivitas dan produksi padi yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.

4.5 Validasi Model

Terdapat dua tahapan dalam memastikan apakah model yang telah dibangun dapat mewakili sistem nyata. Langkah validasi dan verifikasi digunakan dalam pengujian terhadap kredibilitas model yang dibangun. Langkah verifikasi model digunakan untuk menentukan apakah pelaksanaan model akurat mewakili deskripsi konseptual pengembang dari model dan solusi untuk model. Langkah validasi model digunakan untuk proses penentuan apakah teori dan asumsi yang mendasari model konseptual sudah benar dan masuk akal untuk tujuan yang diusulkan terhadap model.

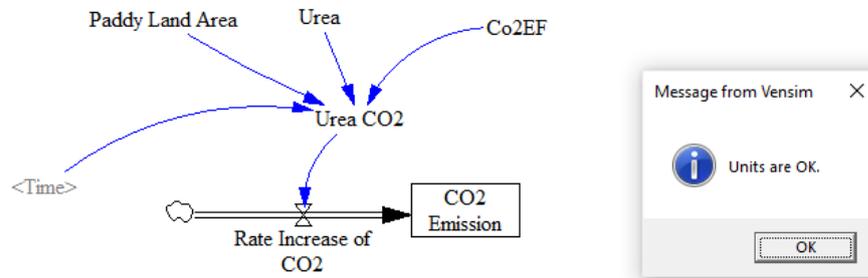
Pengujian secara struktural dilakukan dengan cara memeriksa *error* pada model yang telah dibuat. Hal ini dilakukan untuk memastikan formulasi yang sudah dibuat sudah sesuai hubungan variabel dengan variabel lain dan memeriksa satuan satuan variabel dalam mode. Jika tidak terdapat kesalahan pada model, maka model telah terverifikasi. Berikut merupakan tampilan model yang telah terverifikasi ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil Check Model

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, model berjalan benar dan muncul pemberitahuan “Model is OK” sehingga dapat dinyatakan bahwa model yang digunakan dalam penelitian ini sudah benar. Selain itu perlu

pengecekan unit untuk mengetahui semua variabel dalam model memiliki unit yang sesuai.



Gambar 4.7 Hasil Check Units

Hasil dari model flow diagram yang sudah dibuat selanjutnya akan dilakukan proses validasi untuk menguji apakah model yang dibangun sudah sesuai dengan sistem nyata yang disimulasikan (Barlas, 1989). Validasi model dilakukan dengan dua cara menurut Yaman Barlas (Barlas, 1989) yaitu validasi model dengan uji perbandingan rata-rata (mean comparison) atau dengan validasi model dengan uji perbandingan variasi amplitudo (% error variance). Model dikatakan valid jika pada uji perbandingan rata-rata (mean comparison) $E1 \leq 5\%$ dan uji perbandingan variasi amplitudo (% error variance) apabila $E2 \leq 30\%$.

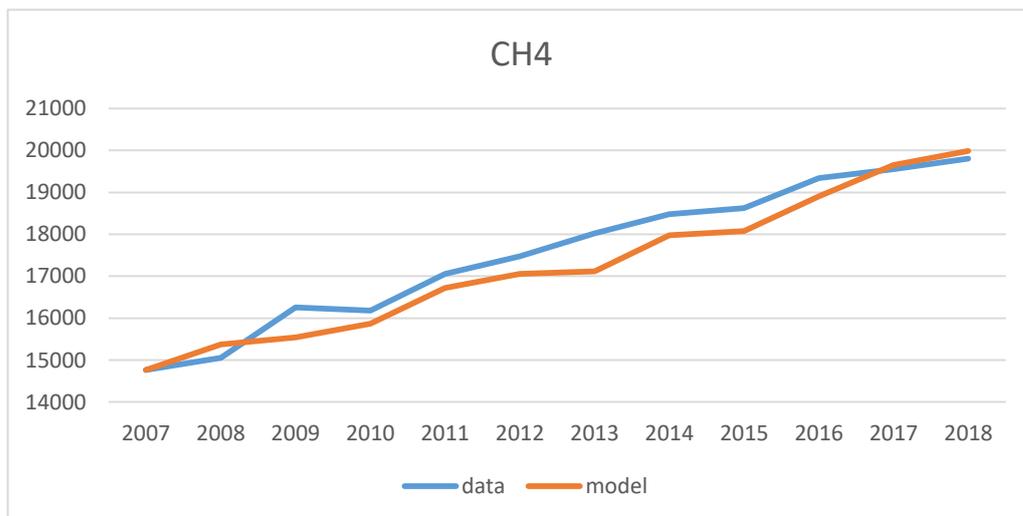
4.5.1 Validasi Sub Model Emisi CH4

Emisi metana (CH4) dihitung dengan mengalikan faktor emisi harian dengan lama budidaya padi sawah dan luas panen. Jumlah emisi gas metana (CH4) bergantung kepada umur tanaman, rejim air sebelum dan selama budidaya padi, dan penggunaan bahan organik dan anorganik. Jumlah emisi gas metana (CH4) juga dipengaruhi oleh jenis tanah, suhu, dan varietas padi.

Validasi sub model emisi CH4 meliputi perbandingan data asli dan hasil simulasi. E1 merupakan hasil uji perbandingan rata-rata (mean comparison) dan E2 merupakan hasil uji perbandingan variasi amplitudo (% error variance). Berikut ini adalah hasil validasi sub model luas lahan padi ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Validasi Emis CH4

Tahun	Data (Gg CO2 eq)	Model (Gg CO2 eq)
2007	14.761	14.761
2008	15.053	15.780
2009	16.253	16.985
2010	18.181	18.946
2011	17.857	17.214
2012	18.476	18.624
2013	18.922	18.027
2014	20.476	20.842
2015	18.476	18.356
2016	19.218	19.217
2017	19.525	18.587
2018	22.312	20.761
mean	18.292,5	18.175,08073
stdev	2.155,137182	1.799,924827
e1	1%	
e2	16%	



Gambar 4.8 Grafik Validasi CH4

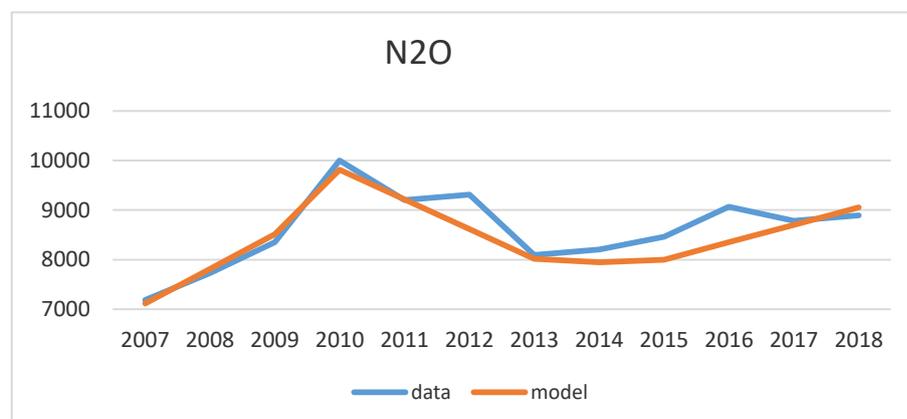
4.5.2 Validasi Sub Model Emisi N2O

Emisi N2O dihasilkan saat proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Gas N2O terbentuk oleh aktivitas mikroorganisme dari lahan sawah yang menyebabkan munculnya unsur nitrogen dan oksigen dalam tanah. N2O yang tersedia pada tanah didapat dari penggunaan pupuk urea, ZA, pupuk organik. Penambahan bahan organik meningkatkan aktivitas mikroba denitrifikasi dan emisi N2O baik langsung maupun tidak langsung.

Berikut ini adalah hasil validasi emisi N2O dengan E1 perbandingan rata-rata (mean comparison) dan E2 hasil uji perbandingan variasi amplitudo (% error variance) ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Validasi Emis N2O

Tahun	Data (Gg CO2 eq)	Model (Gg CO2 eq)
2007	7.187	7.111
2008	7.728	7.813
2009	8.349	8.514
2010	9.998	9.815
2011	9.200	9.217
2012	9.310	8.618
2013	8.095	8.019
2014	8.857	7.950
2015	8.461	8.001
2016	9.065	8.353
2017	8.786	8.705
2018	7.920	9.056
mean	8.639,636364	8.373,983045
stdev	788,187322	730,0894377
e1	3%	
e2	7%	



Gambar 4.9 Grafik Validasi N2O

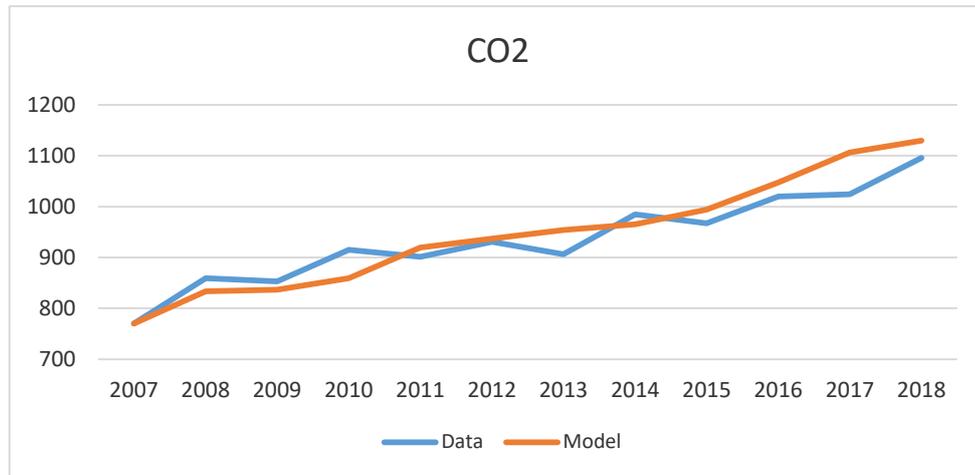
4.5.3 Validasi Sub Model Emisi CO₂

Metode untuk menghitung emisi CO₂ dengan cara mengalikan antara data aktivitas pemakaian pupuk urea dengan faktor emisi Default IPCC (Tier 1). Jumlah pupuk urea yang diaplikasikan (ton/tahun) dikalikan dengan faktor emisi urea, untuk faktor emisi urea adalah 0.20 atau sebanding dengan kandungan karbon pada pupuk berdasarkan berat atom (20% dari CO(NH₂)₂). Untuk data penggunaan pupuk didapat dari acuan rekomendasi penggunaan pupuk Permentan (2007).

Berikut ini adalah hasil validasi emisi N₂O dengan E1 perbandingan rata-rata (mean comparison) dan E2 hasil uji perbandingan variasi amplitudo (% error variance) ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Validasi Emisi CO₂

Tahun	Data (Gg CO₂ eq)	Simulasi (Gg CO₂ eq)
2007	770	770
2008	859	833
2009	853	837
2010	915	859
2011	901	919
2012	931	937
2013	906	954
2014	985	966
2015	967	994
2016	1020	1048
2017	1124	1107
2018	1096	1130
mean	943.9166667	946.1628217
stdev	89.76535068	101.3653608
e1	0%	
e2	13%	

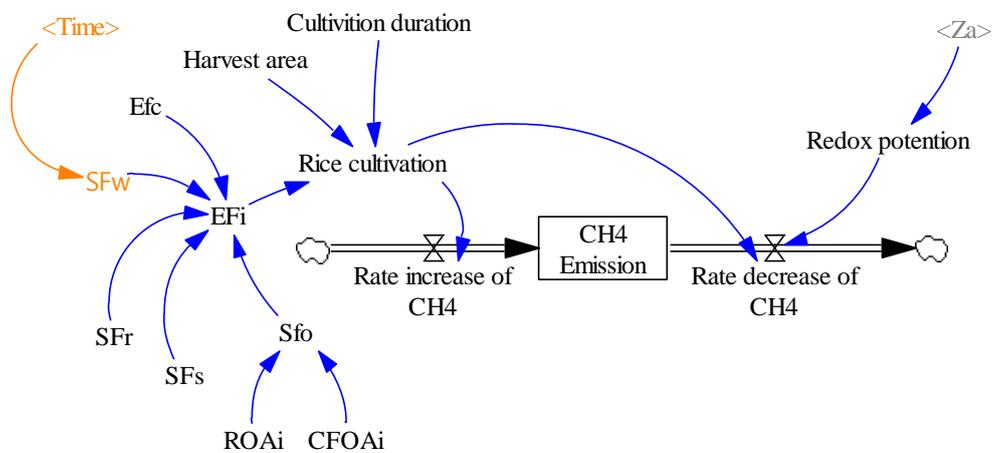


Gambar 4.10 Grafik Validasi CO2

4.6 Pengembangan Skenario

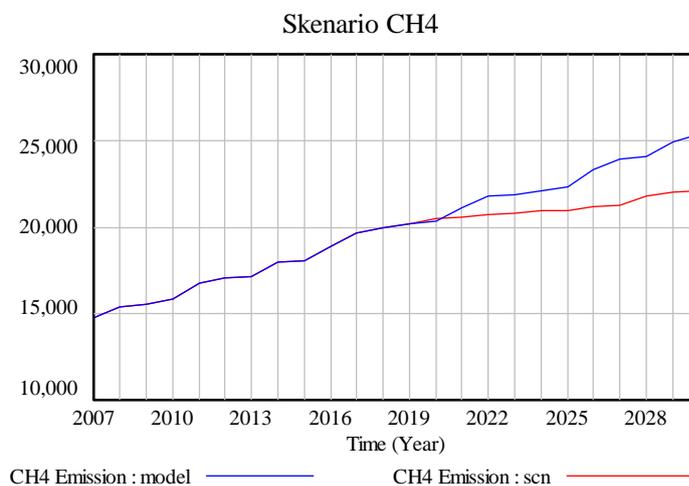
4.6.1 Skenario CH4

Langkah-langkah mitigasi yang dapat dilakukan untuk mengurangi laju emisi gas metana (CH₄) adalah dengan melakukan pengairan berselang (*Intermittent*). Sistem pengairan berselang dapat menekan produksi emisi gas metana bila dibandingkan dengan metode pengairan tergenang. Penerapan sistem pengairan berselang seperti yang dikemukakan oleh Naharia (2004) dapat menekan emisi gas metana bila dibandingkan dengan perlakuan pengairan tergenang. Adanya pengeringan pada sistem pengairan berselang mampu menghambat turunnya potensial redoks tanah, sehingga tidak terjadi kondisi optimal bagi perkembangan bakteri pembentuk metan dan suplai oksigen optimal (Wang et al., 1992). Hal ini sejalan dengan penelitian Orbanus Naharia (2005) menyatakan bahwa pengairan berselang dan pengairan macak-macak pada budidaya padi sawah dapat menekan emisi gas CH₄. Pengairan berselang mampu memitigasi emisi gas CH₄ sebesar 56,3%, sedangkan pengairan macak-macak dapat memitigasi gas CH₄ sebesar 54,6%. Untuk model dan grafik dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Sub Model Skenario CH4

Dengan menggunakan mengganti metode irigasi tergenang yang memiliki skala faktor emisi bernilai 1 menjadi irigasi berselang dengan faktor emisi bernilai 0,19-0,53 maka dapat terjadi penurunan pada emisi CH4 sebesar 4% setiap tahunnya. Untuk data simulasi dari penurunan CH4 dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.12 Grafik Model Skenario CH4

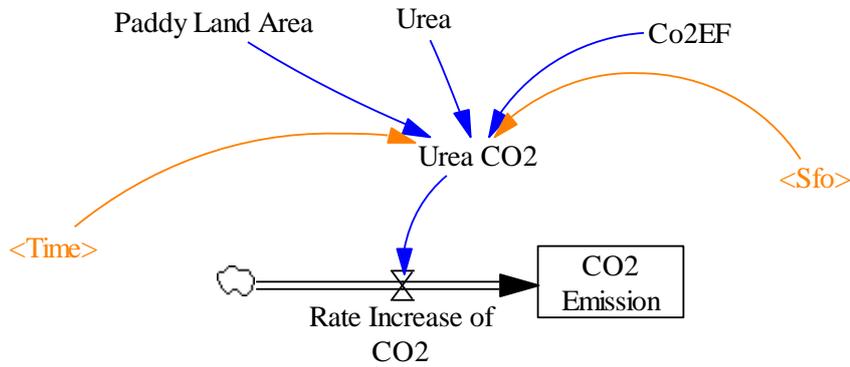
Skenario dilakukan dengan cara pengurangan emisi CH4 pada tahun 2018 sampai dengan 2030. Tabel 4.9 menunjukkan bahwa telah terjadi pengurangan yang cukup signifikan dimana pengurangan emisi karbon CH4 mencapai 4 % pertahun.

Tabel 4.9 Tabel Hasil Skenario CH4

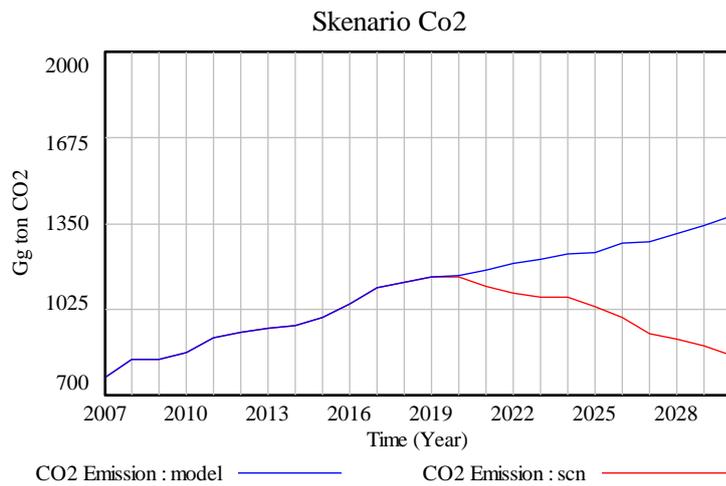
Tahun	Model (Gg CO2 eq)	SCN (Gg CO2 eq)
2007	14761	14761
2008	15375.46	15375.46
2009	15537.72	15537.72
2010	15870.91	15870.91
2011	16721.77	16721.77
2012	17053.85	17053.85
2013	17118.34	17118.34
2014	17979.17	17979.17
2015	18075.53	18075.53
2016	18903.52	18903.52
2017	19649.96	19649.96
2018	19986.29	19986.29
2019	20214.45	20214.45
2020	20332.92	20461.61
2021	21139.17	20568.27
2022	21824.52	20693.92
2023	21891.2	20827.73
2024	22098.16	20940.38
2025	22333.03	20983.02
2026	23343.06	21160.42
2027	23908.85	21271.18
2028	24068.72	21755.7
2029	24951.73	22042.18
2030	25371.02	22110.12
Total	478510.3	460062.5
Pengurang Emisi		4%

4.6.2 Skenario CO2

Upaya mengurangi laju pertumbuhan emisi gas CO₂ dapat dilakukan dengan penggunaan pupuk anorganik dalam jumlah yang tepat dan pemberiannya dalam waktu yang tepat sehingga lebih efisien. Pemberian pupuk yang tepat yaitu pada pukul 10 pagi atau jam 3 sore (litbang pertanian). Wassman et al. (1993) menyebutkan bahwa pembenaman jerami ke dalam tanah akan meningkatkan laju emisi gas CO₂ dibandingkan pemberian pupuk kandang atau kompos. Untuk itu upaya mitigasi lain yang dapat dilakukan ialah dengan menambahkan penggunaan pupuk kompos untuk mengimbangi penggunaan pupuk urea. Untuk gambar grafik dan sub model Skenario CO₂ dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 Sub Model Skenario CO2



Gambar 4.14 Sub Model Skenario CO2

Dengan menggunakan skenario penambahan pupuk berbahan dasar organik sebagai penyeimbang pada metode pemupukan urea mampu mengurangi laju emisi CO2 hingga sebesar 10% setiap tahunnya, untuk data simulasi dari penurunan CO2 dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10 Tabel Skenario CO2

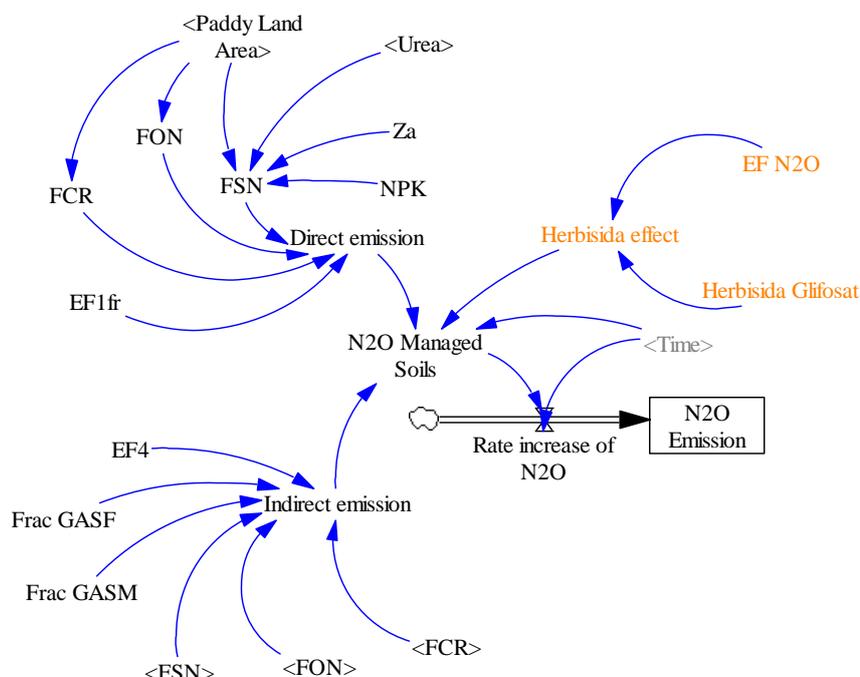
Tahun	Model (Gg CO2 eq)	SCN (Gg CO2 eq)
2007	770	770
2008	833.3367	833.3367
2009	836.7841	836.7841
2010	859.3055	859.3055
2011	919.3427	919.3427

2012	937.3356	937.3356
2013	954.036	954.036
2014	965.6225	965.6225
2015	994.0335	994.0335
2016	1047.598	1047.598
2017	1106.749	1106.749
2018	1129.811	1129.811
2019	1150.032	1150.032
2020	1154.078	1145.986
2021	1174.697	1112.205
2022	1196.583	1084.211
2023	1213.275	1072.897
2024	1236.526	1068.939
2025	1241.425	1035.664
2026	1274.701	995.6426
2027	1278.525	933.7423
2028	1312.705	914.526
2029	1340.947	888.3059
2030	1376.23	849.4774
Total	26303.68	23605.58
Pengurang Emisi		10%

4.6.3 Skenario N2O

Emisi N2O merupakan emisi yang memiliki nilai GWP paling besar diantara emisi lainnya. Salah satu upaya mitigasi emisi dinitrogen oksida langsung dan tidak langsung dari pengelolaan tanah adalah dengan mengaplikasikan Herbisida Glifosat. Berdasarkan Laporan Tahunan 2015 Balai Penelitian Lingkungan Pertanian menyatakan bahwa pengaruh cara olah tanah dengan pemberian herbisida di lahan sawah dapat menekan laju pertumbuhan emisi N2O. Perlakuan olah tanah sempurna yang dikombinasikan pemberian herbisida glifosat menggunakan dosis sebesar 1000 mg CH4/m2/hari. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ariani (2017), emisi N2O terendah mencapai 0,34 kg N2O/ha/musim dihasilkan pada perlakuan olah tanah sempurna dengan penambahan herbisida glifosat, dan yang tertinggi sebesar 0,65 kg N2O/ha/musim terjadi pada perlakuan tanpa olah tanah dengan penambahan herbisida paraquat. Faktor emisi N2O langsung dari lahan padi sawah irigasi dengan perlakuan olah tanah dan herbisida berkisar antara 0,0008 – 0,0015 kg

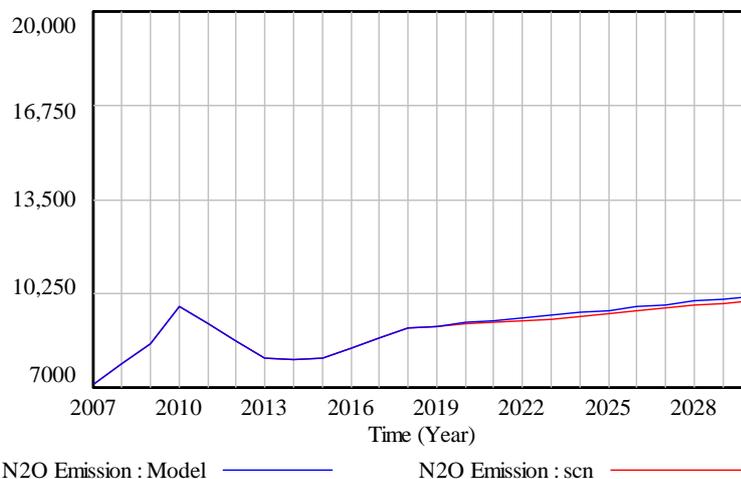
N₂O-N/kg N. Sedangkan tanpa olah tanah menghasilkan rerata fluks harian N₂O lebih tinggi dibandingkan perlakuan olah tanah sempurna. Faktor-faktor yang berpengaruh pada besaran emisi N₂O dari lahan padi sawah pada kegiatan ini antara lain adalah bulk density, water filled pore-space dan suhu tanah.



Gambar 4.15 Sub Model Skenario NO₂

Dengan menggunakan skenario pengaplikasian zat Herbisida Glisofat sebesar 1000mg/hari dan mengalikannya dengan faktor emisi N₂O mampu mengurangi laju emisi N₂O sebesar 1% setiap tahunnya, untuk sub model skenario N₂O dapat dilihat pada Gambar 4.16 berikut.

Skenario N₂O



Gambar 4.16 Sub Model Skenario NO₂

Dengan menggunakan skenario penambahan pupuk berbahan dasar organik sebagai penyeimbang pada metode pemupukan urea mampu mengurangi laju emisi NO₂ hingga sebesar 1% setiap tahunnya, untuk data simulasi dari penurunan NO₂ dapat di lihat pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Tabel Skenario NO₂

Tahun	Model (Gg CO₂ eq)	SCN (Gg CO₂ eq)
2007	7111	7111
2008	7813.001	7813.001
2009	8514.765	8514.765
2010	9815.843	9815.843
2011	9216.681	9216.681
2012	8618.562	8618.562
2013	8019.241	8019.241
2014	7950.628	7950.628
2015	8001.549	8001.549
2016	8352.896	8352.896
2017	8704.04	8704.04
2018	9055.931	9055.931
2019	9123.702	9123.702
2020	9243.244	9203.276
2021	9303.593	9265.235
2022	9418.283	9322.224
2023	9521.939	9375.158
2024	9588.948	9443.385
2025	9678.473	9555.314
2026	9785.268	9669.388
2027	9876.457	9761.891
2028	9978.921	9858.881
2029	10038.06	9912.189
2030	10155.74	9999.264
Total	216886.8	215664
Pengurang Emisi		1%

4.7 Simpulan Hasil Pengembangan Model

Dari beberapa skenario yang telah dibuat, penulis menyimpulkan beberapa skenario tersebut untuk memberikan gambaran lebih jelas, konsep mitigasi emisi GRK CH₄, CO₂ dan N₂O pada produktivitas lahan sawah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 4.12 Kesimpulan Skenario

No	Simulasi	Sebelum Skenario	Setelah Skenario
1	Penerapan sistem irigasi berselang terhadap laju emisi CH ₄	Laju pertumbuhan emisi terus meningkat sejak tahun 2007 sebesar 14761 Gg ton eCO ₂ hingga mencapai 19800 Gg ton eCO ₂ pada tahun 2018. Emisi CH ₄ terus meningkat mencapai angka 24.951 Gg ton eCO ₂ pada tahun 2030	Setelah dilakukan Skenario penerapan irigasi berselang laju emisi berkurang sebesar 4% per tahun, dan jumlahnya menurun mencapai angka 22.042 Gg ton eCO ₂ pada tahun 2030
2.	Penambahan pupuk berbahan organik untuk mengurangi penggunaan pupuk urea	Pemupukan yang sepenuhnya menggunakan urea tanpa dicampuri bahan organik dapat menyebabkan pertumbuhan emisi CO ₂ yang sangat besar. Laju emisi pada tahun 2018 mencapai 1.129 Gg ton CO ₂ dan meningkat hingga 1.376 Gg ton eCO ₂ pada tahun 2030	Setelah dilakukan skenario penambahan pupuk berbahan organik untuk mengurangi penggunaan pupuk urea, emisi dapat ditekan hingga 10% setiap tahun. Pada tahun 2030 angka emisi CO ₂ sebesar 849 Gg ton eCO ₂
3	Pengaplikasian Herbisida Glisofat pada pengolahan tanah	Emisi N ₂ O merupakan yang paling pekat dan memiliki nilai GWP paling tinggi. Laju emisi N ₂ O di Jawa timur mencapai 7.125 Gg ton eCO ₂ pada tahun 2018 dan meningkat menjadi 7.138 pada tahun 2030	Setelah di lakukan skenario penggunaan cairan Herbisida pada olah tanah dengan dosis sebesar 1000mg/m ² /hari, dapat menekan laju emisi sebesar 1% setiap tahunnya hingga tahun 2030

4.8 Analisis Intepretasi Hasil

Tanaman padi sebenarnya tidak merlukankan keadaan yang tergenang selama proses pertumbuhannya. Aktivitas penggenangan yang dilakukan secara terus menerus merupakan pemborosan dalam pemakaian sumber daya air. Mengingat air merupakan sumber daya alam yang terbatas, pemerintah mencanangkan gerakan hemat air untuk mengurangi pemakaian air yang berlebihan di sektor pertanian. Penelitian di Jakenan menunjukkan bahwa pengurangan volume air yang dialirkan ke lahan sawah tidak berpengaruh terhadap produksi

padi. Selain itu, pengelolaan air irigasi dapat mempengaruhi pH, Eh tanah, reaksi-reaksi kimia, serta aktivitas mikroorganisme tanah yang berhubungan dengan emisi GRK. Setyanto et al. (2002) dan Wiharjaka et al. (1999) berpendapat bahwa kondisi tanah dengan penggenangan berlanjut (*continuously flooded* relatif mengemisi CH₄ lebih tinggi dibanding macak-macak (*saturated irrigation* dan pengairan berselang (*intermittent irrigation*). Pengairan berselang dan penggenangan berlanjut memberi kontribusi emisi CH₄ berturut-turut sebesar 77 dan 164 kg ha⁻¹ pada cara tanam pindah (Tapin), 57 dan 91 kg ha⁻¹ pada cara tabur benih langsung (Tabela). Laju penekanan emisi CH₄ pada cara pengairan berselang rata-rata sebesar 46,5% dibanding cara pengairan berlanjut. Penggenangan menyebabkan Eh tanah turun, nilai pH mendekati netral dan dekomposisi bahan organik secara anaerobik berlangsung yang menyebabkan terbentuknya gas CH₄. Saat saat petak sawah dikeringkan pada pengairan berselang, oksigen akan terdifusi dengan cepat ke dalam tanah dan Eh tanah meningkat sehingga dekomposisi aerobik lebih dominan.

Hasil panen gabah seperti yang tercantum pada Tabel 4.13 ternyata tidak menunjukkan perbedaan berarti antar sistem pengairan. Hal ini menunjukkan bahwa pengairan berselang dan macak-macak secara signifikan berpengaruh terhadap mitigasi emisi gas CH₄ dari lahan sawah tanpa mempengaruhi hasil padi.

Tabel 4. 13 Cara Pengelolaan Pengairan

Pengairan	Cara pengelolaan					
	OTS, tapin		OTS, tabela		TOT, tabela	
	Emisi CH ₄	Hasil gabah	Emisi CH ₄	Hasil gabah	Emisi CH ₄	Hasil gabah
	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹
Tergenang	164	5,1	91	5,21	66	5,1
Pengairan berselang	77	4,8	57	4,7	37	4,9
Macak-macak	70	4,5				

Sumber: Suharsih *et al.*, 1998 dan Suharsih *et al.*, 1999

OTS= olah tanah sempurna; tapin= tanah pindah; tabela= tanam bening lahan

Berdasarkan penelitian yang dilaksanakan di Jakenan oleh Ariani (2017) menunjukkan adanya penurunan tingkat emisi N₂O setelah pemberian herbisida paraquat dan glifosat. Bahan aktif dari herbisida diduga dapat menghambat

perkembangan bakteri metanogenik pada proses dekomposisi bahan organik secara anaerobik. Informasi tentang dampak penggunaan bahan-bahan agrokimia ini terhadap emisi gas N₂O dan bagaimana bahan aktif tersebut dapat menekan pertumbuhan bakteri metanogenik masih belum diketahui. Sathpaty *et al.* (1998) pada penelitian dengan pestisida menduga bahwa organoklorin dan hexakloro-sikloheksan (HCH) pada tanah sawah dapat menekan perkembangan bakteri metanogenik pada takaran 2 kg bahan aktif ha-1. Penggunaan herbisida kelihatannya berdampak positif terhadap mitigasi emisi N₂O, tetapi penggunaannya harus sesuai anjuran agar tidak berdampak terhadap kerusakan lingkungan lainnya seperti pencemaran terhadap sumber daya air, tanah dan produk pertanian. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan mengingat banyaknya produk herbisida, pestisida dan fungisida yang beredar tetapi dampaknya terhadap emisi GRK belum diketahui.

Untuk menekan emisi gas CO₂ dapat dilakukan dengan penggunaan pupuk anorganik dalam jumlah yang tepat dan pemberiannya dalam waktu yang tepat sehingga lebih efisien . Pemberian pupuk yang tepat yaitu pada pukul 10 pagi atau jam 3 sore (litbang pertanian) . (Wassman et al. 1993) menyebutkan bahwa pembenaman jerami ke dalam tanah akan meningkatkan laju emisi gas CO₂ dibandingkan pemberian pupuk kandang atau kompos. Untuk itu upaya mitigasi yang dapat dilakukan ialah dengan mengurangi penggunaan pupuk urea dan menyeimbangkan dosis pupuk dengan menambahkan pupuk organik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan diberikan kesimpulan berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan pada bab sebelumnya. Kemudian dijabarkan pula saran-saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Dari hasil yang telah didapat dari penelitian ini, peneliti menarik beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Pada Pembuatan sebuah sistem ini di perlukan pengetahuan dan pemahaan yang mendalam terhadap variable-variabel yang akan di buat berdasarkan reverensi, observasi, data maupun wawancara yang dilakukan terhadap pihak-pihak terkait sehingga nantinya sistem ini dapat di terapkan dan di implementasikan kedalam sistem yang nyata.
2. Laju pertumbuhan emisi GRK yang disebabkan oleh aktivitas pada produktivitas lahan sawah terus meningkat dari tahun 2007 hingga tahun 2018 yang menyebabkan pemanasan global dan berpotensi merusak lingkungan apabila tidak ada upaya untuk mengurangi laju emisi tersebut. Peningkatan terbesar terjadi pada emisi CH₄ dari 14761 Gg ton eCO₂ hingga mencapai 19800Gg ton eCO₂.
3. Pengembangan model untuk melakukan mitigasi emisi GRK dimulai dengan melakukan pengembangan base model hingga menerapkan beberapa skenario dari referensi para ahli, yaitu dengan menggunakan sistem irigasi berselang untuk CH₄, penggunaan kembali pupuk organik untuk mengimbangi penggunaan pupuk urea dan pengaplikasian Herbisida untuk menekan laju emisi N₂O.
4. Hasil simulasi dianggap valid karena menghasilkan nilai *E1* pada validasi Emisi CH₄ sebesar 1%, nilai *E1* pada validasi CO₂ sebesar 0%, nilai *E1* pada validasi N₂O sebesar 3%. Sedangkan pada nilai menghasilkan nilai *E2* pada validasi CH₄ sebesar 16%, nilai *E2* pada validasi CO₂ sebesar 13%, nilai *E2* pada validasi N₂O sebesar 7%.

5. Pada skenario untuk mitigasi emisi CH₄ yaitu menggunakan metode pengairan berselang dengan melakukan skenario parameter merubah nilai indeks faktor emisi yang telah ditetapkan oleh IPCC 2006. Penurunan emisi berkurang hingga 4% setiap tahunnya hingga tahun 2030
6. Pada skenario mitigasi emisi CO₂ dengan mengurangi penggunaan pupuk urea dan mengimbangi dengan penggunaan pupuk berbahan organik. Penambahan pupuk organik untuk menggantikan sebagian dari pupuk urea dapat mengurangi laju pertumbuhan emisi CO₂ hingga 10% sampai pada tahun 2030.
7. Pada skenario mitigasi emisi N₂O, di mana gas ini merupakan emisi dengan nilai GWP tertinggi dan tingkat kepekatan yang sangat kuat, dapat dikurangi dengan mengaplikasikan herbisida glisofat pada dosis 1000mg/m²/hari. Dengan metode ini laju emisi N₂O dapat ditekan sebesar 1% setiap tahunnya hingga tahun 2030.

5.2 Saran

Saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya yaitu:

1. Penilaian dan pengukuran emisi GRK membutuhkan ketersediaan data, sehingga penggunaan data yang lebih kompleks terkait parameter-parameter lokal untuk provinsi Jawa Timur yang digunakan tidak sepenuhnya menggunakan nilai default IPCC dalam menghitung inventarisasi emisi GRK agar menghasilkan perhitungan yang lebih mendekati kondisi sebenarnya.
2. Untuk pengembangan penelitian lebih lanjut, maka perlu adanya penelitian yang langsung membandingkan efek skenario mitigasi emisi dengan pengaruhnya pada model sistem produksi padi.
3. Pengawasan dan penyesuaian regulasi dari pemerintah untuk rekomendasi pupuk yang sesuai dengan kondisi lapangan perlu ditingkatkan berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, F., Santosa, I., & Dewi, S. (2014). *Pedoman Teknis Penghitungan Baseline Emisi Dan Serapan Gas*. Jakarta: BAPPENAS.
- Alley, R. B., Marotzke, J., Nordhaus, W. D., & Overpeck, J. T. (2003). Abrupt Climate Change. *Science* 299.
- B Penelitian Pedoman Umum Adaptasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian [Online]. - 2011. - www.pertanian.go.id/dpi/downlot.php?file=pedum-adaptasi.pdf.
- Badan Litbang Pertanian 400 Teknologi Inovatif Badan Litbang Pertanian [Online] // 2009. pustaka.litbang.pertanian.go.id/agritek/diy1002.pdf.
- Barlett, K.B., P.M. Crill, D.I. Sebacher, R.C. Harris, J.O. Wilson, and J.M. Wilson, and J.M. Melack. (1988). Metana Flux from the Central Amazonian Flood Plain. *J. Geophys. Res.* 93:157-1578
- Buée M, DeBoer W, Martin F, vanOverbeek L, Jurkevitch E. 2009. The rhizosphere zoo: An overview of plant-associated communities of microorganisms, including phages, bacteria, archaea, and fungi, and of some of their structuring factors. *Plant Soil* 321: 189–212
- BPS-Statistics Indonesia. (2018). *Statistical Yearbook of Indonesia 2018*. (S. of S. C. and Publication, Ed.). Badan Pusat Statistik.
- Hidayatno, A., & Rahmawan, A. (2019). Conceptualizing Carbon Emissions from Energy Utilization in Indonesia ' s Industrial Sector. *Energy Procedia*, 156(September 2018), 139–143.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. (1996). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Workbook (Volume 2).
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by The National Greenhouse Gas Inventories Programme, In Eggleston H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. (Eds.). IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme, Published by IGES
- [IPCC] Climate Change. (2014). *Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lin, B., & Xu, B. (2018). Factors affecting CO₂ emissions in China ' s agriculture sector : A quantile regression, *94*(April), 15–27.
- López Astudillo, A., Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., Arenas, F., Sierra, B. E., & Sierra, B. E. (2014). Evaluating Carbon Footprint Behavior in the Agriculture and Energy Sectors: A Review. *Sistemas y Telemática*, 12(31), 35.

- Mallari, A. E. C. (2016). Climate Change Vulnerability Assessment in the Agriculture Sector : Typhoon Santi Experience, *216*(October 2015), 440–451.
- Marino, R., Atzori, A. S., Andrea, M. D., Iovane, G., Trabalza-marinucci, M., & Rinaldi, L. (2016). Climate change: Production performance, health issues, greenhouse gas emissions and mitigation strategies in sheep and goat farming. *Small Ruminant Research*, *135*, 50–59.
- Masykur, F. (2013). *Analisis Potensi Emisi Karbon Pada Aktivitas Produksi Tanaman Padi*. Bumi Indonesia, 2(3).
- Mudiyarso, D. (2003). CDM: Mekanisme Pembangunan Bersih. Wetland International. Institut Pertanian Bogor, hal 1-5.
- Murniyanto, E., Wicaksono, K. P., & Muhsoni, F. (2011). *51 Analisis Emisi Ch4 Dan Serapan Co2 Aktivitas Pertanian Di Jawa Timur*. Agrovigor, 4(1), 51–61.
- Nieto, Á. M., Meñaca-Guerrero, C., Osa, A. B.-R. de la, & Bellido-Odriozola, M. (2014). *Application of the system dynamics methodology for modeling and simulation of the greenhouse gas emissions (gge) in Cartagena de Indias*. ResearchGate.
- Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional, KemenLH 2012. Metodologi Perhitungan Tingkat Emisi dan Penyerapan Gas Rumah Kaca.
- Pramudia, A. (2013). *Fenomena dan Perubahan Iklim Indonesia serta Pemanfaatan Informasi Iklim untuk Kalender Tanam*. Dinamika Iklim Indonesia. <http://www.litbang.pertanian.go.id/buku/katam/bagian-2.pdf>.
- Quadrat-ullah, H. (2008). Structural Validation of Simulation Models : An Illustration, 537–542.
- Rahmawati, A., Neve, S. De, & Heru, B. (2015). *N2O-N emissions from organic and conventional paddy fields from Central Java , Indonesia*. *Procedia Environmental Sciences*, 28 (Sustain 2014), 606–612.
- Setyanto, P. (2008). *Teknologi Mengurangi Emisi Gas Rumah Kaca dari Lahan Sawah*. B. Litbang. Pertanian, 3(2). Retrieved from
- Setyanto P, Suharsih, A Wihardjaka dan AK Makarim. 1999. Pengaruh Pemberian Pupuk Anorganik terhadap Emisi Gas Metana pada Lahan Sawah. Dalam : S Partohardjono, J soejitno dan Hermanto (Ed.). Menuju Sistem Produksi Padi Berwawasan Lingkungan, Puslitbang Tanaman Pangan, Bogor, 36- 43.
- Soekartawi, S. (1999). *Agribisnis Teori dan Aplikasinya*. Jakarta: Raja Grafindo Persada.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Hill Boston.

- Suharsih, A Wihardjaka dan AK Makarim. 1999. Pengaruh Pemberian Pupuk Anorganik terhadap Emisi Gas Metana pada Lahan Sawah.
- Sukamandi. (2013). *Sistem Tanam Legowo*. Balitbang Kementan.
- Suryani, E. (2006). *Pemodelan dan Simulasi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Tian, Z., Niu, Y., Fan, D., Sun, L., Ficsher, G., Zhong, H., Tubiello, F. N. (2017). *Maintaining rice production while mitigating methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in China : Evaluating tradeo ff s by using coupled agricultural systems models*. *Agricultural Systems*, (September 2016), 0–1.
- Tubiello, F. N., Salvatore, M., Rossi, S., Ferrara, A., Fitton, N., & Smith, P. (2013). *The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture*. 1748-9326
- Wihardjaka A, P Setyanto dan AK makarim. 1999a. Pengaruh Penggunaan lahan Organik terhadap Hasil Padi dan Emisi Gas Metana pada Lahan Sawah. Dalam : S Partohardjono, J soejitno dan Hermanto (Ed.). Menuju Sistem Produksi Padi Berwawasan Lingkungan, Puslitbang Tanaman Pangan, Bogor, 44-53.
- Wihardjaka A, P Setyanto dan AK Makarim, 1999b. Pengaruh eberapa Varietas Padi terhadap Emisi Gas Metana pada Lahan Sawah. Dalam : S Partohardjono, J soejitno dan Hermanto (Ed.). Menuju Sistem Produksi Padi Berwawasan Lingkungan, Puslitbang Tanaman Pangan, Bogor, 62-71.
- Wu, X., Wang, W., Xie, K., Yin, C., Hou, H., & Xie, X. (2019). Combined effects of straw and water management on CH₄ emissions from rice fields, *231*(July 2018), 1257–1262.
- Zhang, L., Pang, J., Chen, X., & Lu, Z. (2019). Science of the Total Environment Carbon emissions, energy consumption and economic growth: Evidence from the agricultural sector of China’s main grain-producing areas. *Science of the Total Environment*, 665(222), 1017–1025.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Nama lengkap Andriyan Rizki Jatmiko, lahir di Kota Malang, Jawa Timur, tanggal 29 April 1993. Anak kedua dari dua bersaudara pasangan Bapak Andi Poerwanto dan Ibu Sri Herdiyanti. Pendidikan dimulai dari SDN Kauman I kecamatan Klojen Kota Malang dan lulus pada tahun 2005. Kemudian melanjutkan ke sekolah menengah pertama di SMP Negeri 9 Malang lalu lulus pada tahun 2008. Setelah itu, melanjutkan pendidikan ke sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Malang hingga lulus pada tahun 2011. Penulis menempuh pendidikan sarjana di Universitas Negeri Malang program studi Matematika. Pada tahun 2017, penulis melanjutkan program magister pada Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan program studi Sistem Informasi. Penulis memilih konsentrasi sistem dinamik saat menempuh program magister. Penulis dapat di hubungi melalui email andriyanrizki10@gmail.com.