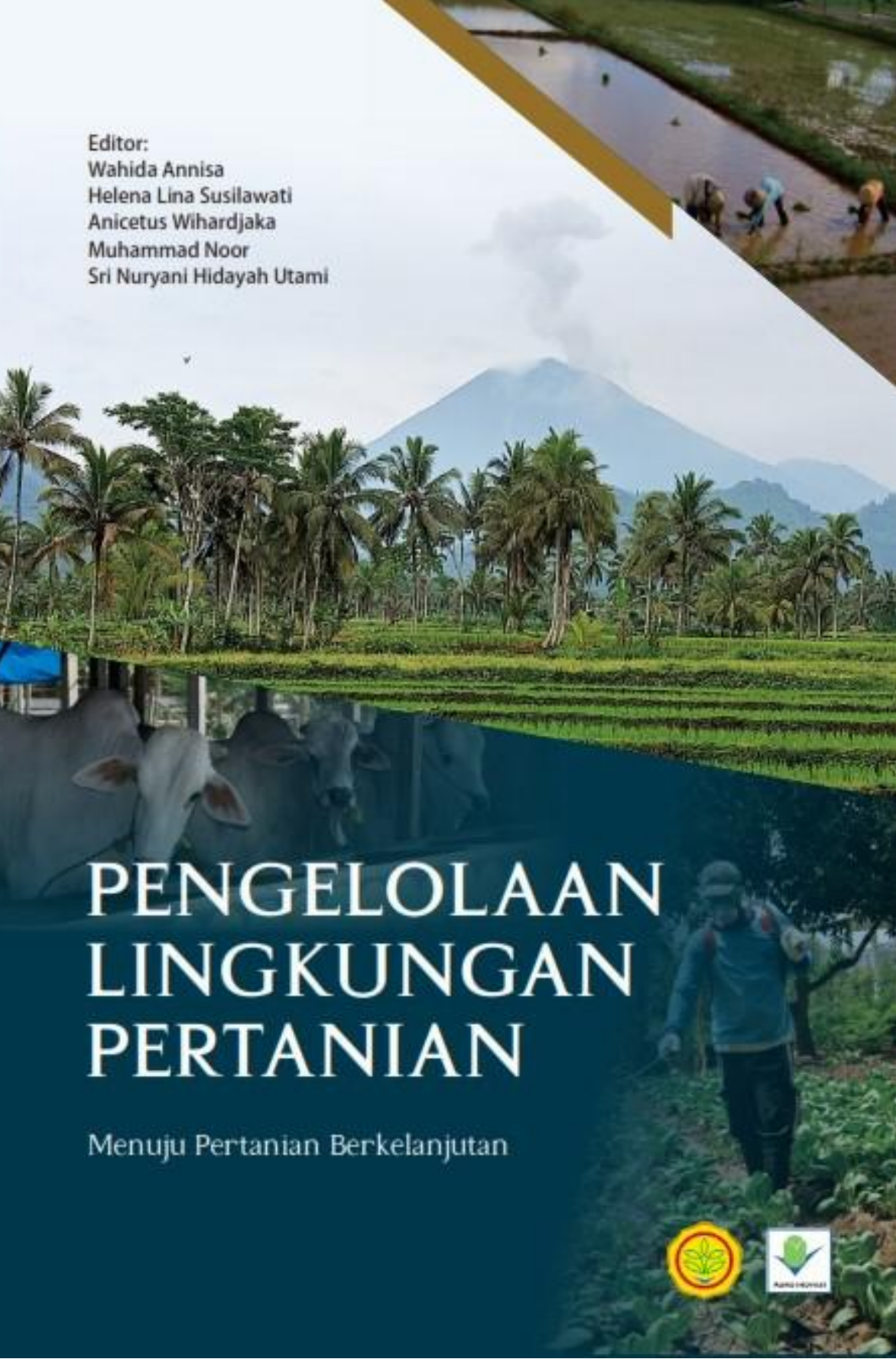


Editor:
Wahida Annisa
Helena Lina Susilawati
Anicetus Wihardjaka
Muhammad Noor
Sri Nuryani Hidayah Utami



PENGELOLAAN LINGKUNGAN PERTANIAN

Menuju Pertanian Berkelanjutan



PENGELOLAAN
LINGKUNGAN PERTANIAN
Menuju Pertanian Berkelanjutan

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

**PENGELOLAAN
LINGKUNGAN PERTANIAN
Menuju Pertanian
Berkelanjutan**

**Editor:
Wahida Annisa
Helena Lina Susilawati
Anicetus Wihardjaka
Muhammad Noor
Sri Nuryani Hidayah Utami**

**Balai Penelitian
Lingkungan Pertanian**

PENGELOLAAN LINGKUNGAN PERTANIAN:

Menuju Pertanian Berkelanjutan

Penulis:

Wahida Annisa, Ali Pramono, Elizabeth Srihayu Harsanti, Helena Lina Susilawati, Aprian Aji Santoso, Eni Yulianingsih, Ika Ferry Yunianti, Nourma Al Viandari, Sarah, Miranti Ariani, Ria Fauriah, Hidayatuz Zu'amah, Asep Kurnia, Cicik Oktasai Handayani, Elga Riesta Putri, Sukarjo, Terry Ayu Adrian, Hesti Yulianingrum, Rina Kartikawati, Ina Zulaehah, Siska Apriyani, Poniman, Wahyu Purbalisa, Doly Mellyga Wangga Paputri, Triyani Dewi, Anicetus Wihardjaka

ISBN: 978-602-1327-18-0

Redaksi Pelaksana:

Aji Ispatrika, Titi Sopiawati

Penata Letak:

Aji Ispatrika

Penerbit:

**Balai Penelitian Lingkungan Pertanian
Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Kementerian Pertanian**

Redaksi:

Jl. Raya Jakenan-Jaken KM. 05
POS 5 Jakenan, Pati – 59182
Jawa Tengah

Telp/Fax : (0295) 4749044 / 474

Whatsapp : 081228386600

Email : balingtang.litbang@gmail.com

Cetakan Pertama, Desember 2021
i-xvi+256 hlm, 15.5 cm x 23 cm

Hak cipta @ 2021, Balai Penelitian Lingkungan Pertanian
Hak Cipta dilindungi Undang-undang
All Rights Reserved

**Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa seizin tertulis dari penerbit**

KATA SAMBUTAN

Upaya peningkatan produksi dihadapkan pada dampak dari pembangunan pertanian yang terkait dengan pelestarian sumberdaya alam dan lingkungan. Kekurang bijaksanaan dalam pengelolaan sumberdaya alam untuk peningkatan produksi menyebabkan kerusakan sebagian lahan pertanian, yang dapat berdampak terhadap penurunan produktivitas dan mutu produk pertanian. Hal tersebut dapat diakibatkan dari dampak penggunaan input pertanian terhadap lahan, produk dan lingkungan; dampak sistem usaha tani terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), dan dampak dari aktivitas diluar pertanian seperti limbah industri, pertambangan, pemukiman, dan perkotaan terhadap sumberdaya pertanian dan lingkungan.

Identifikasi, pemantauan, penanggulangan dan penciptaan inovasi teknologi dalam menghadapi masalah lingkungan pertanian sangat diperlukan untuk meminimalkan dampak yang diakibatkan oleh pembangunan pertanian dan untuk mendukung pembangunan pertanian berkelanjutan. *Good Agricultural Practices* (GAP), teknologi berbasis sumberdaya dan kearifan lokal, kelestarian kesehatan lingkungan perlu diprioritaskan dalam penerapan kaidah-kaidah pembangunan pertanian keberlanjutan. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian melalui Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian dan institusi dibawahnya khususnya Balai Penelitian Lingkungan Pertanian mempunyai peran yang sangat strategis dalam penciptaan dan diseminasi teknologi pengelolaan lingkungan pertanian yang berkelanjutan. Berdasarkan hal tersebut maka buku *Pengelolaan Lingkungan Pertanian Menuju Pertanian Berkelanjutan* disusun agar stakeholder dapat lebih mudah memperoleh informasi dan memahami teknologi budidaya pertanian produksi tinggi dan ramah lingkungan.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan buku ini. Buku ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk membantu memahami lebih mendalam mengenai pengelolaan lingkungan pertanian dan dapat bermanfaat bagi berbagai pihak dalam mengupayakan lingkungan pertanian yang lebih baik menuju pembangunan pertanian berkelanjutan.

Bogor, April 2022

Kepala Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian

Dr. Husnain, MP, M.Sc

PRAKATA PENULIS

Balai Penelitian Lingkungan Pertanian (Balingtan) merupakan salah satu unit pelaksana teknis lingkup Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Tugas pokok dan fungsi Balingtan adalah melakukan penelitian berkaitan dengan pencemaran lingkungan atmosfer, litosfer dan hidrosfer yang dapat menurunkan kualitas lahan pertanian, dan cara penanggulangan pencemaran serta sintesis atau rekomendasi untuk mewujudkan ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan melalui pengelolaan sistem pertanian yang bijaksana dan ramah lingkungan. Dalam melaksanakan tugasnya Balingtan berada dalam koordinasi Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDLPP). Dalam menjalankan tugas pokok dan fungsinya, diperoleh informasi, teknologi, dan inovasi yang kemudian dirangkum dalam buku ini dengan judul: "PENGELOLAAN LINGKUNGAN PERTANIAN: Menuju Pertanian Berkelanjutan". Buku ini diharapkan berguna bagi penentu kebijakan, pelaku dan pelaksana pembangunan pertanian, sehingga lingkungan pertanian tetap terjaga dengan baik, sehat, dan produktif.

Buku ini berisi tentang konsep dasar pertanian berkelanjutan, dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian, status emisi GRK dari sektor pertanian, serta teknologi adaptasi dan mitigasi gas rumah kaca pada sektor pertanian. Bagian lain juga memuat cemaran bahan agrokimia pada lingkungan pertanian, status cemaran residu pestisida dan logam berat, risiko dampak pencemaran residu pestisida dan logam berat, teknologi penanggulangan cemaran residu pestisida pada lingkungan pertanian, teknologi penanggulangan cemaran logam berat pada lingkungan pertanian serta sintesis atau rekomendasi untuk mewujudkan ketahanan pangan dan

kelestarian lingkungan melalui pengelolaan sistem pertanian yang bijaksana dan ramah lingkungan.

Penghargaan dan terima kasih saya sampaikan kepada pegawai Balingtan dan semua pihak yang telah memberikan kontribusi berharga dalam penyusunan buku ini, saya berharap semoga buku ini bermanfaat khususnya dalam pengembangan sumberdaya lingkungan pertanian.

Dr. Wahida Annisa Yusuf, SP., M. Sc

Kepala Balai Penelitian Lingkungan Pertanian
Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian
Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

DAFTAR ISI

KATA SAMBUTAN	v
PRAKATA PENULIS	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Pertanian, Ekosistem, dan Lingkungan	2
1.2. Definisi Lingkungan Pertanian dan Permasalahannya.....	5
1.3. Sistem Pengelolaan Lingkungan Pertanian.....	7
1.4. Lingkup Pengelolaan Lingkungan Pertanian.....	8
BAB II KONSEP DASAR PERTANIAN	
BERKELANJUTAN.....	10
2.1. Sejarah Pembangunan Pertanian Berkelanjutan.....	10
2.2. Definisi Pertanian berkelanjutan.....	11
2.3. Pilar Pembangunan Pertanian Berkelanjutan.....	13
2.4. Pentingnya Pertanian Berkelanjutan	15
2.5. Implementasi Pembangunan Pertanian Berkelanjutan di Indonesia	16
2.6. Kendala Penerapan Pertanian Berkelanjutan.....	19
BAB III DAMPAK PERUBAHAN IKLIM	
TERHADAP SEKTOR PERTANIAN	22
3.1. Mekanisme Terjadinya Pemanasan Global.....	24
3.2. Perubahan Iklim (PI).....	26
3.3. Dampak PI terhadap sektor pertanian	28

3.4. Emisi GRK dari Sektor Pertanian	34
BAB IV PERSPEKTIF PERUBAHAN IKLIM DAN	
KOMITMEN INDONESIA.....	44
4.1. Perkembangan Perjanjian Internasional	
Perubahan Iklim	44
4.2. Komitmen Indonesia terkait Perubahan	
Iklim.....	52
4.3. Pendekatan Perhitungan Emisi GRK	
Sektor Pertanian di Indonesia	58
4.4. Status Emisi GRK Nasional.....	72
BAB V PENCEMARAN BAHAN AGROKIMIA	
PADA LINGKUNGAN PERTANIAN.....	74
5.1. Definisi Pencemaran Bahan Agrokimia	
secara umum.....	74
5.2. Sumber Pencemaran Bahan Agrokimia	
di Lingkungan Pertanian.....	77
5.3. Jenis Pencemaran Bahan Agrokimia	78
5.4. Dampak Cemar Lingkungan Terhadap	
Sektor Pertanian.....	83
5.5. Dukungan kebijakan tentang pertanian	
ramah lingkungan dan bebas cemaran	
baik aturan nasional maupun	
internasional	86
5.6. Batas cemaran bahan agrokimia (BMR).....	87
BAB VI TINGKAT PENCEMARAN RESIDU	
PESTISIDA DAN LOGAM BERAT.....	91
6.1. Kondisi eksisting lingkungan pertanian	91
6.2. Tingkat Pencemaran Residu Pestisida.....	95
6.3. Tingkat Pencemaran Logam Berat	102
BAB VII TEKNOLOGI ADAPTASI DAN MITIGASI	
PERUBAHAN IKLIM PADA SEKTOR	
PERTANIAN	106
7.1. Teknologi Adaptasi Perubahan Iklim.....	106
7.2. Teknologi Mitigasi di Sektor Pertanian	115

BAB VIII TEKNOLOGI PENANGGULANGAN	
CEMARAN RESIDU PESTISIDA PADA	
LINGKUNGAN PERTANIAN	127
8.1. Teknologi Remediasi Residu Pestisida	127
8.2. Teknologi Remediasi Residu Pestisida	
Balingtan	136
8.3. Manfaat Teknologi Pengendalian	
Cemaran yang Dianjurkan	152
BAB IX TEKNOLOGI REMEDIASI TERDAMPAK	
LOGAM BERAT PADA LINGKUNGAN	
PERTANIAN	159
9.1. Teknologi remediasi lahan terdampak	
logam berat	159
9.2. Upaya remediasi dalam mitigasi	
cemaran logam berat ke depan	169
BAB X STRATEGI PENGELOLAAN LINGKUNGAN	
PERTANIAN	170
9.1. Sistem pertanian ramah lingkungan	171
9.2. Pendekatan agro-ekologi	174
10.3. Strategi pengelolaan pertanian ramah	
lingkungan	176
10.4. Tantangan pengembangan sistem	
pertanian ramah lingkungan	182
DAFTAR PUSTAKA	184
GLOSSARIUM	225
INDEKS	231
BIOGRAFI PENULIS	238

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Segitiga Pilar Pertanian Berkelanjutan	14
Gambar 2. Ilustrasi efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global	25
Gambar 3. Konsentrasi gas CO ₂ dari tahun 2005-September 2021	26
Gambar 4. Perubahan suhu permukaan global dari tahun 1880-2020	27
Gambar 5. Hubungan faktor iklim dengan produktivitas pertanian	29
Gambar 6. Pengambilan contoh gas rumah kaca dari lahan sawah.....	35
Gambar 7. Pemupukkan di lahan sawah	37
Gambar 8. Pemberian kapur pertanian.....	38
Gambar 9. Pembakaran jerami sisa panen padi.....	39
Gambar 10. Emisi GRK dari sektor pertanian berdasarkan kategori tahun 2006-2020	73
Gambar 11. Pencemaran plastik berupa kemasan bekas pestisida.....	78
Gambar 12. Top 10 negara pengguna pestisida pada tahun 2019.....	92
Gambar 13. Penggunaan pestisida berdasarkan kategorinya pada tahun 1990-1999 dan 2010-2019	93
Gambar 14. Jumlah pestisida terdaftar dan diijinkan dari tahun 2016-2021	94

Gambar 15. Embung sebagai penyedia kebutuhan air di musim kemarau.....	109
Gambar 16. Sistem Informasi Katam Terpadu	112
Gambar 17. Model SITT di lahan tadah hujan	115
Gambar 18. Fluks CH ₄ dan N ₂ O pada tanah Inceptisol Jakenan, Musim Kering 2019	124
Gambar 19. Diagram Pembuatan Arang Aktif	137
Gambar 20. Arang Aktif dari Berbagai Limbah Pertanian	138
Gambar 21. Struktur pori dari arang (a) dan arang aktif (b).....	138
Gambar 22. Mekanisme terperangkapnya residu pestisida di dalam arang aktif	139
Gambar 23. A) urea, B) Urea berlapis arang aktif.....	140
Gambar 24. Pengaruh amandemen biochar terhadap perilaku lingkungan dari pestisida di tanah.....	142
Gambar 25. Filter Inlet Outlet	144
Gambar 26. Komponen Alat Filter Inlet Outlet.....	144
Gambar 27. Biopestisida Balingtan	151
Gambar 28. Metode remediasi lahan terkontaminasi logam berat	160
Gambar 29. Biochar tongkol jagung	162
Gambar 30. Pengaruh perlakuan terhadap kadar Pb dalam tanah.....	162
Gambar 31. Persentase penurunan Pb dan Cd setelah aplikasi sludge plus.....	165
Gambar 32. Mekanisme serapan dalam teknologi fitoremediasi	167

Gambar 33. Konsentrasi Cd pada tiap bagian tanaman padi.....	168
Gambar 34. Hubungan Kualitas Tanah, Produktivitas dan Kualitas Lingkungan.....	174
Gambar 35. Komponen pendekatan agro-ekologi mendukung sistem pertanian berkelanjutan	176
Gambar 36. Maggot aktif merombak kotoran unggas itik	179

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik pembangunan pertanian berkelanjutan secara umum.....	16
Tabel 2. Karakteristik kunci beberapa model pertanian berkelanjutan.....	18
Tabel 3. Konferensi perubahan iklim dan kesepakatan penting yang dihasilkan.....	51
Tabel 4. Faktor skala pengaturan air yang menjadi bahan perhitungan emisi metana di Indonesia.....	60
Tabel 5. Faktor skala untuk varietas (SFr)	61
Tabel 6. Faktor emisi default berdasarkan kandungan bahan karbonat.....	66
Tabel 7. Faktor emisi CH ₄ fermentasi enterik Tier 2 berbagai jenis ternak.....	68
Tabel 8. Faktor emisi CH ₄ dari pengelolaan ternak Tier 2	70
Tabel 9. Faktor emisi N ₂ O dari pengelolaan kotoran ternak Tier 2	71
Tabel 10. Batas Kritis dan Batas Normal Logam Berat dalam Tanah dan Tanaman.....	87
Tabel 11. Batas maksimum kandungan logam berat dalam air untuk kepentingan irigasi tanaman	88
Tabel 12. Batas Maksimum Residu (BMR) Pestisida pada tanah dan air.....	89
Tabel 13. Data penggunaan pupuk secara global pada 2015-2020 (ribu ton)	92
Tabel 14. Emisi CH ₄ dari perlakuan AWD selama enam musim	117

Tabel 15. Hasil, GWP dan indeks emisi dari metode tanam benih langsung dan tanam pindah pada musim hujan	125
Tabel 16. Nanomaterial untuk degradasi pestisida.....	133
Tabel 17. Nanomaterial untuk menghilangkan cemaran pestisida	135
Tabel 18. Karakteristik Kimia Kompos Balingtan	147
Tabel 19. Pengaruh perlakuan terhadap persentase pengurangan Pb dalam tanah dan hasil bawang merah di Kab. Brebes	164
Tabel 20. Beberapa definisi fitoremediasi.....	166
Tabel 21. Dampak teknologi produksi pada revolusi hijau..	173

BAB I

PENDAHULUAN

Wahida Annisa, Ali Pramono, dan Elizabeth Srihayu Harsanti

Sektor pertanian merupakan penggerak pembangunan nasional sesuai dengan perannya sebagai penyedia pangan (*food*), pakan (*feed*), energi (*biofuel*), dan serat (*fiber*). Sistem pertanian yang ada di Indonesia terdiri atas sistem pertanian tradisional, sistem pertanian konvensional dan sistem pertanian berkelanjutan (Istiantoro et al., 2013). Ladang berpindah merupakan contoh sistem pertanian tradisional yang bersifat ekstensif dan tidak memaksimalkan input yang ada, dimana bertumpu pada pasokan internal tanpa ada pasokan eksternal, sehingga produktivitas yang dihasilkan masih rendah. Sedangkan sistem pertanian konvensional dalam praktiknya sangat bertumpu pada penggunaan pasokan eksternal berupa bahan-bahan kimia buatan (pupuk dan pestisida) untuk meningkatkan produksinya dan menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan pertanian, sehingga menuntut perlu adanya suatu sistem pertanian yang dapat bertahan hingga generasi berikutnya dan tidak merusak lingkungan. Pada dua dekade terakhir metode alternatif telah mulai diupayakan melalui praktik pertanian yang dinilai berwawasan lingkungan dan berkelanjutan (*environmentally sound and sustainable agriculture*). Salah satu caranya adalah menggunakan konsep pertanian berkelanjutan (Departemen Pertanian, 2010). Konsep pertanian berwawasan lingkungan dan berkelanjutan adalah suatu pendekatan yang berorientasi untuk mempertahankan dan meningkatkan kesuburan tanah, menjaga keanekaragaman hayati, serta menghindari terjadinya degradasi lahan dan lingkungan. Pertanian berkelanjutan merupakan suatu sistem yang telah terintegrasi antara produksi tanaman dengan hewan. Selain itu pertanian berkelanjutan akan membuat kualitas lingkungan

menjadi baik dan sumberdaya alam di dalamnya berkembang dengan efektif.

1.1. Pertanian, Ekosistem, dan Lingkungan

Pertanian merupakan kegiatan yang kompleks dimana pertumbuhan tanaman dan ternak harus seimbang secara sempurna. Proses pencemaran pertanian dapat terjadi pada tahapan-tahapan pertumbuhan tanaman dan ternak. Ketika kegiatan pertanian dikelola secara berkelanjutan, berarti mereka dapat melestarikan dan memulihkan habitat kritis, membantu melindungi daerah aliran sungai, dan meningkatkan kesehatan tanah dan kualitas air. Tetapi praktik yang tidak berkelanjutan memiliki dampak serius pada manusia dan lingkungan. Kebutuhan akan pengelolaan sumberdaya yang berkelanjutan semakin mendesak. Permintaan komoditas pertanian meningkat pesat seiring dengan pertumbuhan populasi dunia. Hubungan yang erat pertanian dengan ekonomi dunia, masyarakat, dan keanekaragaman hayati menjadikannya salah satu faktor terpenting untuk konservasi sebagai upaya peningkatan kualitas lingkungan.

Pertanian mempunyai dampak yang signifikan terhadap lingkungan. Tantangan lingkungan pertanian adalah melakukan perbaikan dalam penggunaan dan pengelolaan nutrisi, pestisida, energi dan air, dengan menggunakan lebih sedikit input ini per unit lahan. Petani dapat mengadopsi budidaya tanaman berdasarkan konsep Good Agricultural Practices (GAP) yaitu praktek yang lebih bermanfaat bagi lingkungan, seperti penggunaan benih yang unggul dan sehat, media tanam yang baik, saat tanam yang tepat, pola tanam yang baik; monokultur, tumpangsari, atau tumpang gilir. Cara tanam yang baik termasuk jarak tanam yang tepat, pengairan yang cukup, pemupukan berimbang serta monitoring intensif OPT dan kondisi lahan.

Ekosistem adalah suatu unit fungsional yang tersusun dari komponen-komponen biotik dan nonbiotik yang saling mempengaruhi dan melibatkan berbagai sistem dalam aliran energi yang berlangsung dalam bentuk rantai makanan serta siklus materi yang terjadi melalui proses penguraian oleh makro

dan mikroorganisme (Begon et al., 1990). Ekosistem ada dua macam yaitu ekosistem alami (natural ecosystem) seperti di hutan tropis dan ekosistem buatan manusia (man made ecosystem). Ekosistem yang belum ada campur tangan manusia disebut ekosistem alami, sedangkan yang sudah dikelola atau dibuat oleh manusia disebut ekosistem pertanian atau agroekosistem, seperti ladang, sawah, kebun, empang, dan sungai buatan. Di ekosistem alami keanekaragaman jenis sangat tinggi yang berarti dalam kesatuan ruang terdapat flora dan fauna yang beragam. Keanekaragaman jenis merupakan sifat komunitas yang memperlihatkan tingkat keanekaragaman jenis organisme yang ada di dalamnya. Dalam ekosistem alami semua makhluk hidup berada dalam keadaan seimbang dan saling mengendalikan sehingga tidak terjadi ledakan serangan hama. Sedangkan ekosistem pertanian kurang stabil dibanding dengan ekosistem alami karena keanekaragaman hayatinya lebih rendah. Eksplosi hama seperti wereng dan tikus pada padi mengindikasikan ekosistem yang tidak stabil. Untuk mencapai produktifitas tanaman yang tinggi - khususnya tanaman pangan - dan berkelanjutan serta ramah lingkungan, dalam mengelola ekosistem pertanian diperlukan sikap yang arif dan bijaksana. Sebagai suatu ekosistem, maka sawah tersusun atas komponen biotik dan abiotik yang saling berinteraksi satu sama lain. Komponen biotik terdiri atas unsur tanaman maupun binatang, dengan kata lain, sawah merupakan habitat (tempat hidup) bagi berbagai jenis binatang dan tumbuhan yang membentuk keanekaragaman hayati pada ekosistem sawah.

Dampak negatif ekosistem buatan (pertanian) adalah degradasi dan penurunan kesuburan tanah, penggunaan air yang berlebihan dan kerusakan sistem hidrologi, pencemaran lingkungan berupa kandungan bahan berbahaya di lingkungan dan makanan, ketergantungan petani pada input eksternal, penurunan keanekaragaman hayati termasuk sumber genetik flora dan fauna yang menjadi modal utama pertanian berkelanjutan, peningkatan kesenjangan global antara negara industri dan negara berkembang, dan kehilangan pengendalian komunitas lokal terhadap produksi pertanian (Gliessmann, 2007).

Dalam praktek pertanian, baik tanaman tahunan maupun tanaman semusim tidak terlepas dari pengaruh keanekaragaman serangga. Keanekaragaman serangga di suatu habitat dipengaruhi oleh lingkungan sekitar dan vegetasi yang tumbuh di dalamnya. Serangga yang menimbulkan kerusakan dan mengurangi nilai ekonomis tanaman dikenal sebagai hama. Untuk pengendalian serangga hama tersebut, petani masih menggunakan insektisida sintetis yang diketahui menimbulkan banyak dampak negatif. Untuk itu perlu pengendalian alternatif yang ramah lingkungan, diantaranya adalah pengendalian hayati yang merupakan salah satu komponen Pengendalian Hama Terpadu (PHT). Pengendalian hayati adalah pengendalian dengan memanfaatkan musuh alami dalam pengendalian hama (Untung, 1993).

Penggunaan pupuk dan pestisida organik merupakan praktek pertanian yang ramah lingkungan karena tidak menyebabkan terganggunya ekosistem pertanian. Berbagai jenis Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) mengalami adaptasi terhadap perubahan iklim yang diindikasikan diantaranya: munculnya hama baru dari proses adaptasi yang pada mulanya statusnya hama sekunder menjadi hama penting, yang pada mulanya sebagai hama laten menjadi eksplosif menimbulkan kerusakan dengan eskalasi yang luas, hama-hama baru yang merupakan hasil introduksi baik itu disengaja maupun tidak harus diwaspadai, eksplosif suatu OPT juga dapat diakibatkan oleh pengaruh fenomena tersebut. OPT merupakan salah satu komponen ekosistem pertanian, oleh karena berpotensi tinggi sebagai hama, penyakit, atau gulma tanaman maka penting dikelola dan dikendalikan. Serangan OPT pada suatu saat dan pada suatu tempat dapat diprediksi berdasarkan pengalaman dalam waktu silam. Demikian juga kegagalan maupun keberhasilan pengendalian OPT di masa lampau menjadi pengalaman sangat berharga untuk mengelola dan mengendalikan OPT yang arif.

Kecukupan pangan dengan harga yang terjangkau telah menjadi tujuan utama kebijakan pembangunan pertanian. Kekurangan pangan bisa menyebabkan kerawanan ekonomi, sosial, dan politik yang dapat menggoyahkan stabilitas nasional

(Wagiman, 2013). Dalam kondisi populasi OPT di atas ambang ekonomi dan peluang tanaman masih dapat diselamatkan, peran agens hayati sebagai supresor untuk menekan populasi OPT sampai pada posisi di bawah ambang ekonomi. Peran agens hayati dapat ditingkatkan secara kuantitatif dengan augmentasi, introduksi, dan konservasi. Jadi, Keseimbangan ekosistem sangat penting dalam pertanian.

1.2. Definisi Lingkungan Pertanian dan Permasalahannya

Pengertian lingkungan menurut tinjauan pertanian bahwa pertanian merupakan suatu sistem, maka segala hal yang berada di luar sistem itu dan yang berpengaruh atas keadaan sistem tersebut, disebut lingkungan pertanian (Notohadiprawiro, 2006). Komponen-komponen lingkungan pertanian meliputi: udara (atmosfer), tanah (lithosfer), air (hidrosfer), kehidupan hayati (biosfer), keadaan ekonomi dan nilai sosial-budaya. Peningkatan kualitas lahan sangat penting untuk menjaga produktivitas pertanian. Ancaman terjadinya degradasi lahan melalui tiga proses, yaitu i) fisik (misalnya erosi dan pemadatan tanah); ii) kimia (asidifikasi, salinisasi); dan iii) degradasi biologis (penurunan kandungan bahan organik). Proses degradasi ini terkait dengan perubahan dalam praktik manajemen pertanian, iklim dan teknologi. Beberapa aspek degradasi tanah hanya dapat dibalik secara perlahan (misalnya penurunan kandungan bahan organik) atau ireversibel (misalnya erosi). Pada dasarnya petani perlu menyeimbangkan tiga aspek utama dari kualitas tanah: mempertahankan kesuburan tanah, menjaga kualitas lingkungan, dan melindungi kesehatan tanaman, hewan, dan manusia.

Pertanian dan kualitas air terkait dengan polusi nitrat di permukaan dan air tanah; kadar fosfor dalam air permukaan; kontaminasi dengan pestisida; dan efek berbahaya dari sedimen tanah dan garam mineral. Tingkat polutan pertanian yang berlebihan dalam air merupakan masalah kesehatan manusia karena menurunkan kualitas air minum, sementara konsentrasi polutan yang berlebihan menimbulkan masalah ekologis termasuk eutrofikasi. Ketersediaan sumberdaya lahan dan air

merupakan dasar bagi semua kegiatan pertanian, dimana sektor pertanian sebagai pengguna utama kedua sumberdaya ini. Pengelolaan pertanian yang tidak bijaksana dapat mempengaruhi aliran air permukaan dan hilangnya tanah sedimen dari lahan pertanian. Penggunaan lahan yang tepat dan ramah lingkungan dan praktik pengelolaan air dapat membantu mengurangi aliran puncak air permukaan dan hilangnya tanah endapan.

Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer berkontribusi terhadap proses perubahan iklim dan pemanasan global. Sebagian besar negara, dibawah Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tahun 1994 tentang Perubahan Iklim, berkomitmen untuk menstabilkan emisi GRK pada tahun 2000, dan selanjutnya setuju untuk menerapkan Protokol Kyoto 1997, yang menetapkan tingkat emisi untuk periode target 2008 hingga 2012. Perjanjian Paris yang diadopsi pada 2015 menyepakati negara di dunia untuk membatasi peningkatan suhu bumi global tidak melebihi 2°C (idealnya 1,5 °C), dan meningkatkan pendanaan aksi iklim. *Conference of Parties* ke 26 (COP 26) tahun 2021, bertujuan menyelesaikan “Paris Rulebook” atau aturan yang diperlukan untuk mengimplementasikan Perjanjian Paris. Hal yang disepakati adalah kerangka waktu umum untuk frekuensi revisi dan pemantauan komitmen iklim.

COP26 merupakan kesempatan penting untuk mewujudkan aturan-aturan guna mencapai Perjanjian Paris. Para peneliti memprediksi kenaikan suhu global akan naik 2,7 °C pada abad ini. Kenaikan suhu sebesar itu pada akhir abad ini akan menyebabkan kerusakan yang sangat masif di muka bumi dan mengakibatkan banyak bencana alam. Untuk membatasi kenaikan suhu, dunia perlu mengurangi separuh emisi GRK dalam delapan tahun ke depan. Ini adalah tugas besar yang hanya dapat dilakukan jika para pemimpin yang menghadiri COP 26 datang dengan rencana yang ambisius, terikat waktu, dan menghapus batu bara secara bertahap untuk mencapai nol emisi.

Emisi GRK dari pertanian terutama berbentuk gas karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄) dan dinitrogen oksida (N₂O), yang dinyatakan setara CO₂. Budidaya padi, peternakan dan penggunaan pupuk anorganik adalah sumber utama CH₄ dan N₂O. Tren emisi GRK pertanian di beberapa negara menunjukkan

peningkatan, karena ekspansi keseluruhan dalam produksi tanaman dan ternak.

Tidak hanya kontribusi pertanian dalam proses perubahan iklim saja, tetapi dampak dari perubahan iklim pada pertanian juga menjadi perhatian petani dan pengambil kebijakan. Peran pertanian sebagai sumber dan penyerap GRK menjadi penting bagi pengambil kebijakan, mengingat perlunya negara untuk menilai strategi domestik, dan untuk memenuhi kewajiban internasional untuk mengurangi emisi GRK. Data tentang kontribusi spesifik pertanian sebagai sumber dan penyerap GRK dalam kaitannya dengan iklim perubahan, relatif terhadap sektor-sektor lain dalam perekonomian, dapat membantu mengembangkan kebijakan yang tepat.

Pertanian sebagai aktivitas manusia menempati bagian terbesar dari total luas lahan yang memainkan peran kunci berkaitan dengan keanekaragaman hayati yang sangat bergantung pada penggunaan lahan. Perluasan produksi pertanian dan intensifikasi penggunaan input dianggap sebagai penyebab utama kerugian keanekaragaman hayati, sementara pada saat yang sama agroekosistem tertentu dapat berfungsi untuk menjaga keanekaragaman hayati.

1.3. Sistem Pengelolaan Lingkungan Pertanian

Indonesia dengan jumlah penduduk yang banyak dan terus bertambah memerlukan produk pangan dalam jumlah yang terus meningkat. Perlu adanya upaya peningkatan produksi pangan dari segi kuantitas, kualitas, mutu, gizi, keamanan maupun keberagaman, dengan harga yang terjangkau oleh seluruh lapisan masyarakat harus dipenuhi yang diatur dalam UU No.7/1996 dan PP No.68/2002. Dimana udara dijaga terhadap pengotoran dan pencemaran, tanah dijaga terhadap degradasi dan pencemaran, dan air dijaga terhadap pengotoran, menjaga kesehatan lingkungan, baik untuk manusia maupun untuk tanaman dan ternak.

Sistem pengelolaan lingkungan pertanian adalah sistem pertanian yang memanfaatkan segala komponen, baik fisik, kimia maupun biologi yang ada dalam suatu ekosistem, baik di dalam tanah, udara maupun air untuk mencapai produktivitas yang

optimum, sehat, dan berkelanjutan (Dilts *dalam* Kasryno, 2006). Tanah yang sehat dicirikan oleh kekayaannya akan organisme tanah yang berfungsi untuk mengubah sisa tanaman atau hewan menjadi unsur hara bagi tanaman.

Tiga isu penting terkait dengan upaya pelestarian sumberdaya alam dan lingkungan, adalah: 1) dampak penggunaan berbagai input pertanian terhadap produk, lahan, dan lingkungan, 2) dampak sistem usaha tani, terutama padi sawah dan padi lahan rawa pasang surut, terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), dan 3) dampak industri, permukiman, dan perkotaan terhadap produktivitas lahan dan kelestarian lingkungan pertanian (Laas et al., 2006). Penanaman padi yang sangat intensif dengan pemupukan yang terus menerus tidak saja menyebabkan tingginya residu pupuk, tetapi juga meningkatkan kandungan logam berat terutama Pb (plumbum) dan Cd (cadmium). Meningkatnya perhatian dan kesadaran masyarakat terhadap kesehatan, lingkungan, dan gizi telah mendorong peningkatan permintaan terhadap produk pertanian organik, terutama pangan.

1.4. Lingkup Pengelolaan Lingkungan Pertanian

Kesatuan utuh ekosistem pertanian secara menyeluruh saling mempengaruhi membentuk keseimbangan, stabilitas dan produktivitas lingkungan pertanian yang tidak saja bersifat fisik, melainkan dapat berupa sebagai lingkungan sosial meliputi: faktor dan kondisi di dalam masyarakat. Faktor dan kondisi di dalam masyarakat dapat mempengaruhi perubahan sosiologis seperti ekonomi, politik dan sosial budaya. Perubahan yang terjadi dalam ekosistem berupa proses pengantian satu komunitas oleh komunitas lain dalam ekosistem.

Pembangunan berwawasan lingkungan (*eco-development*) di Indonesia merupakan sistem pembangunan yang pelaku utamanya adalah petani dengan berlandaskan pada sejarah budaya dan keterampilan masyarakat (*indigenous knowledge*). Sistem ini tidak menganjurkan petani untuk kembali ke metode produksi yang digunakan oleh nenek moyang, dimana setiap petani merupakan pengelola mandiri yang mengembangkan sistem produksinya sendiri, baik dilihat

dari segi fisik maupun sosial. Ciri menonjol pertanian ialah kekhasannya dalam hal lingkungan.

Aspek lingkungan melatih kita semua untuk berfikir secara bersistem (*comprehensive*), yang menggunakan matra ruang dan matra waktu lengkap, yaitu kemarin - kini - esok. Matra waktu penting karena lingkungan bersifat dinamis, dimana kejadian yang berlangsung pada masa lampau menghasilkan akibat pada masa sekarang, dan akibat ini berpengaruh atas kejadian yang berlangsung pada masa sekarang, yang akan menghasilkan akibat pada masa mendatang.

Waktu dan ruang merupakan dasar dari segala kehidupan. Proses dan evolusi berdasar dengan waktu, sedangkan adaptasi berdasar dengan ruang (tempat). Kemajuan dari proses, evolusi dan kemantapan adaptasi terhadap setiap perubahan yang terjadi dalam sistem, menjadi jaminan keberlangsungan sistem tersebut, namun kemunduran dari proses, terhambatnya evolusi dan lemahnya adaptasi menjadi penyebab utama terjadinya degradasi. Masalah sosial dan budaya dengan sendirinya tercakup dalam kajian lingkungan, dan dipadukan dengan masalah fisik, hayati dan teknologi.

Penerapan sistem pertanian berkelanjutan dengan masukan rendah (*low input sustainable agriculture*) merupakan sistem pertanian yang menerapkan teknologi produksi hemat lahan, air dan sarana produksi. Dengan sistem ini, dampak kegiatan pertanian atas lingkungan yang bersifat negatif dan ketergantungan usahatani pada input berupa bahan agrokimia dapat dikurangi. Dalam system pertanian berkelanjutan ini, penggunaan pupuk organik lebih diprioritaskan karena selain untuk memperbaiki lingkungan fisik dan kimia juga aman terhadap lingkungan.

BAB II

KONSEP DASAR PERTANIAN BERKELANJUTAN

Helena Lina Susilawati, Elizabeth Srihayu Harsanti, Ali Pramono

2.1. Sejarah Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Jumlah penduduk yang terus meningkat menimbulkan bertambahnya permasalahan baru untuk pemenuhan kebutuhan pokok yang memberikan dampak pada eksploitasi sumberdaya alam (SDA) tanpa menghiraukan kelestarian lingkungan sehingga mengancam keberlanjutan fungsi ekosistem. Untuk meningkatkan dan mempercepat pemenuhan kebutuhan pangan, revolusi hijau memberikan pengaruh positif pada peningkatan produksi pertanian di Asia dan Amerika Latin pada tahun 1960-an dan 1970-an. Pertanian dilandasi oleh pendekatan industrial dimana orientasi pertanian agribisnis skala besar, padat modal dan padat inovasi teknologi, serta ketergantungan pada masukan produksi, seperti agrokimia (pupuk dan pestisida), dan alat mesin pertanian. Akan tetapi setelah itu, terdapat ketidakberlanjutan peningkatan produksi pertanian yaitu adanya penurunan pertumbuhan rata-rata produksi padi di Asia dari 2,6% di tahun 1970-an menjadi 1,5% pada periode yang dimulai tahun 1981, yang sebagian disebabkan oleh peningkatan harga pupuk kimia dan pestisida/herbisida (Rukmana, 2012). Intensifikasi pertanian dengan penggunaan bahan agrokimia berlebihan (pestisida dan pupuk kimia) menimbulkan dampak negatif berupa pencemaran tanah dan air, penurunan kesuburan tanah, hilangnya keanekaragaman hayati dan mengganggu kesehatan manusia.

Dengan permasalahan-permasalahan yang muncul dalam upaya untuk memenuhi kebutuhan pangan, terdapat perhatian masyarakat dunia terhadap isu kemerosotan kualitas lingkungan hidup sehingga terciptalah komitmen global mengenai konsep pembangunan berkelanjutan. Pada tahun 1969, berawal dari

pertemuan Dewan Ekonomi dan Sosial PBB dimana diusulkan untuk menyelenggarakan konferensi internasional mengenai lingkungan hidup manusia. Konferensi tersebut diselenggarakan pada tahun 1972 di Stockhlom menghasilkan *Stockholm Declaration*. Pada tahun 1980, *International Union for The Conservation of Nature and Natural Source* (IUCN), bersama-sama dengan *United Nations Environment Programme* (UNEP) dan *World Wildlife Fund* (WWF) menerbitkan *World Conversation Strategy* (WCS) yang berisi terkait kerangka definitif untuk pembangunan berkelanjutan, pengelolaan sistem produksi yang ekologis tepat dan pemeliharaan kelangsungan lingkungan hidup dan keanekaragamannya (Hardjasoemantri, 2002). Pada tahun 1992 diadakan Konferensi Tingkat Tinggi Bumi atau *United Nations Conference on Environment and Development* (UNCED) di Rio de Jeneiro yang membahas konsep pembangunan berkelanjutan untuk semua aspek kehidupan sosial, ekonomi, budaya dan lingkungan yang terkenal dengan nama Agenda 21. Salah satu agenda 21 yang berkaitan langsung dengan sektor pertanian adalah *program Sustainable Agriculture and Rural Development* (SARD) untuk mewujudkan kondisi lingkungan yang lebih baik untuk semua generasi ini diterima secara global, sehingga pertanian berkelanjutan (*sustainable agriculture*) menjadi prinsip dasar pembangunan pertanian seluruh dunia, termasuk di Indonesia (Hardjasoemantri, 2002).

Sektor pertanian merupakan penyangga dan penyedia pangan dan barang lainnya serta jasa-jasa yang menguntungkan secara ekonomi, bertanggung jawab secara sosial, dan lingkungan. Oleh karena itu pertanian berkelanjutan muncul menjadi alternatif sistem pertanian untuk menjawab banyak kendala yang dihadapi oleh petani yang miskin akan sumberdaya dan waktu, serta menjamin keberlanjutan lingkungan.

2.2. Definisi Pertanian berkelanjutan

Masyarakat internasional mengenal pembangunan berkelanjutan seperti yang tertuang dalam *Bruntland Report*, yakni pembangunan berkelanjutan adalah pembangunan untuk memenuhi kebutuhan saat ini, tanpa menurunkan atau merusak kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan hidupnya (udara, air dan pangan yang harus tersedia dalam

jumlah dan kualitas memadai untuk dapat hidup sehat) dan kebutuhan untuk kehidupan yang manusiawi (menaikkan martabat dan status sosial manusia) (Supardi, 2003). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 tahun 1997 Pasal 1 ayat (3) mendefinisikan pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan hidup adalah upaya sadar dan terencana, yang memadukan lingkungan hidup, termasuk sumberdaya, ke dalam proses pembangunan untuk menjamin kemampuan kesejahteraan, dan mutu hidup generasi hidup masa kini dan generasi masa depan.

Pertanian merupakan penyokong pondasi dasar bangsa, dengan pembangunan pertanian yang baik akan berimbas pada kondisi sosial, budaya, politik dan ekonomi yang stabil. Pembangunan pertanian yang baik harus berbanding lurus dengan terhadap perekonomian suatu bangsa. Suatu bangsa dapat dikatakan menjadi bangsa yang maju apabila seluruh kebutuhan primer rakyatnya terpenuhi yaitu kebutuhan pangan.

Menurut *Technical Advisory Committee of the CGIAR* (TAC/CGIAR 1988): Pertanian berkelanjutan adalah pengelolaan sumberdaya yang berhasil untuk usaha pertanian guna membantu kebutuhan manusia yang berubah sekaligus mempertahankan atau meningkatkan kualitas lingkungan dan melestarikan sumberdaya alam. Pembangunan pertanian di Indonesia diarahkan menuju pembangunan pertanian yang berkelanjutan (*sustainable agriculture*), sebagai bagian dari implementasi pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*). Pembangunan pertanian berkelanjutan selain sudah menjadi tujuan, tetapi juga sudah menjadi paradigma pola pembangunan pertanian.

Pertanian berkelanjutan adalah suatu sistem pertanian yang dalam jangka panjang mampu meningkatkan kualitas lingkungan berbasis sumberdaya dimana pertanian bergantung; menyediakan kebutuhan pangan dan serat dasar manusia; layak secara ekonomi; dan meningkatkan kualitas hidup petani dan masyarakat secara keseluruhan (Francis dan Youngberg, 1990). Dari definisi tersebut, tersirat terkandung beberapa komponen kunci dari pertanian berkelanjutan, antara lain: pengelolaan bumi secara hati-hati, pemeliharaan sistem biologis bumi, pemeliharaan siklus nutrisi/hara, kemampuan untuk memenuhi kebutuhan pangan tanpa batas waktu, sistem yang menghasilkan makanan dengan biaya lingkungan yang dapat diterima secara sosial, keseimbangan yang dapat diterima dari masalah lingkungan dan

ekonomi, penggabungan proses biologis seperti: fiksasi nitrogen dan serangga bermanfaat ke dalam produksi makanan, penggunaan input di luar pertanian minimal, penggunaan rotasi tanaman untuk mengendalikan gulma, penyakit dan hama serangga, penggunaan pengendalian hama terpadu, dan penggunaan sistem tanam tanpa olah tanah atau tanpa olah tanah (Francis dan Youngberg, 1990).

Pertanian berkelanjutan merupakan model pertanian yang memperhatikan kualitas lingkungan dalam upaya memberikan produksi dan produktivitas tanaman dan ternak yang relatif tinggi. Sebagai model pertanian ramah lingkungan, Soemarno (2001) mendefinisikan pertanian berkelanjutan sebagai pertanian yang menerapkan teknologi serasi dengan lingkungan untuk optimasi pemanfaatan sumberdaya alam dalam memperoleh produksi tinggi dan aman, serta menjaga kelestarian lingkungan dan sumberdaya alam pertanian. Berdasarkan definisi tersebut, pembangunan pertanian diarahkan pada pencapaian ketahanan pangan sekaligus juga memperhatikan keamanan pangan (Wihardjaka, 2018). Konsep pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan tersebut bermuara pada kualitas tanah yang mempengaruhi: (i) produktivitas tanah untuk meningkatkan produktivitas tanaman, ternak, dan aspek hayati lainnya; (ii) memperbaiki kualitas lingkungan dalam menetralisasi kontaminan-kontaminan dalam tanah dan produk pertanian; dan (iii) kesehatan manusia yang mengkonsumsi produk pertanian (Doran dan Parkin, 1999).

2.3. Pilar Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Dengan mengadopsi prinsip dasar pembangunan berkelanjutan maka secara umum sistem pertanian berkelanjutan harus memenuhi tiga pilar dasar yaitu 3P (*Profit, Planet and People*) berkelanjutan secara ekonomi, ekologis dan sosial, seperti yang dijelaskan berikut ini (Srageldin, 1996 dalam Dahuri, 1998; pada Gambar 1):

1. Keberlanjutan ekonomi (profit).

Pertanian berkelanjutan apabila usahataniannya dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi atau menguntungkan dan efisien dalam penggunaan sumberdaya serta investasi. Sebagai contoh budidaya tanaman dengan pemberian bahan organik dapat meningkatkan kualitas tanah, ketersediaan air, bermanfaat untuk lingkungan, mengurangi biaya pupuk kimia, dan meningkatkan hasil.

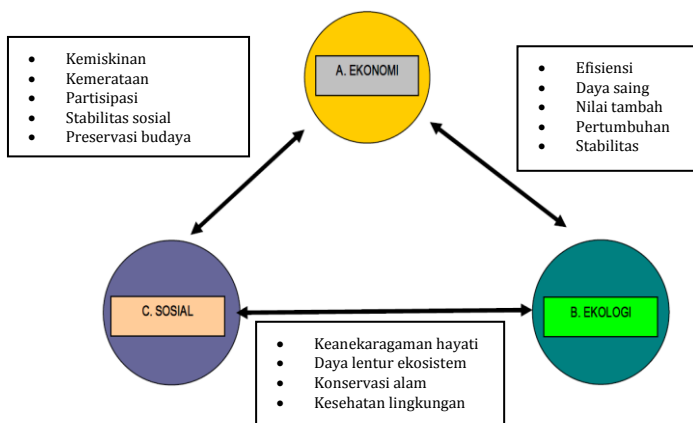
2. Keberlanjutan ekologi/lingkungan (planet)

Berkelanjutan secara ekologis mengandung arti bahwa kegiatan tersebut harus dapat mempertahankan integritas ekosistem, memelihara daya dukung lingkungan dan konservasi sumberdaya alam termasuk keanekaragaman hayati (*biodiversity*). Kegiatan pertanian yang layak secara ekologi berarti tidak atau minim dampak negatif terhadap ekosistem alam, atau bahkan memperbaiki kualitas lingkungan dan sumberdaya alam.

Pada umumnya dilakukan dengan melakukan hal yang dapat mempertahankan sumberdaya alam seperti tanah, air, keanekaragaman hayati dan kehidupan liar yang memberikan sumbangan terhadap perlindungan modal alami. Pupuk organik dapat digunakan dalam pertanian berkelanjutan karena penggunaannya tidak berbahaya bagi organisme tanah dan memperbaiki struktur tanah dan mempertahankan keanekaragaman hayati.

3. Keberlanjutan sosial (*People*).

Keberlanjutan sosial berkaitan dengan kualitas hidup dari pelaku kegiatan dan masyarakat sekitar. Pembangunan pertanian berkelanjutan hendaknya dapat menciptakan pemerataan hasil-hasil pembangunan, mobilitas sosial, kohesi sosial dan pengembangan kelembagaan. Pertanian berkelanjutan diharapkan dapat meningkatkan nilai tambah pertanian bagi lebih banyak anggota masyarakat melalui lebih banyak penggunaan tenaga kerja yang tersedia, dan akan meningkatkan kohesi dan keadilan sosial.



Gambar 1. Segitiga Pilar Pertanian Berkelanjutan

Sumber: Srageldin, 1996 dalam Dahuri, 1998

2.4. Pentingnya Pertanian Berkelanjutan

Dalam tiga dekade terakhir, pembangunan pertanian menghadapi beberapa tantangan yang berpengaruh terhadap ketahanan dan keberlanjutan sistem pertanian, antara lain pertambahan laju populasi manusia, alih fungsi lahan pertanian untuk kepentingan non pertanian, degradasi sumberdaya lahan pertanian, fenomena perubahan iklim, dan penurunan kualitas lingkungan hidup. Sejak bergulir revolusi hijau, introduksi teknologi seperti penggunaan varietas unggul, penggunaan bahan agrokimia terutama pupuk anorganik dan pestisida kimiawi telah nyata memberikan hasil pertanian tinggi, namun dalam jangka panjang memberikan dampak negatif terhadap kelestarian lingkungan akibat penggunaan bahan agrokimia dan eksploitasi lahan pertanian.

Untuk menyelaraskan introduksi teknologi hasil revolusi hijau agar memberi hasil yang optimum dan mengurangi dampak negatifnya maka pembangunan pertanian yang berkelanjutan merupakan kata kunci yang diperlukan di era modern saat ini. Hal ini karena pertanian berkelanjutan adalah konsep pola pertumbuhan ekonomi di sektor pertanian yang memenuhi kebutuhan masa kini tanpa menimbulkan dampak negatif atas sumberdaya fisik yang tersedia dan terbatas agar kapasitas dan potensinya memuaskan aspirasi kebutuhan fisik dan lingkungan pada generasi masa depan yang tidak membahayakan (Notohadiningrat, 2021; Tabel 1). Berkelanjutan mempunyai arti penting terhadap produksi dan fungsi konservasi yang memberikan kemaslahatan ekonomi dan selaras dengan lingkungan hidup sepanjang masa, penghematan untuk memperpanjang masa guna atau umur ekonomi (Notohadiningrat, 2021). Pembangunan pertanian merupakan suatu bagian integral dari pembangunan ekonomi karena proses pembangunan pertanian dapat menambah produksi pertanian, mempertinggi pendapatan, produktivitas secara berkesinambungan dan berkelanjutan.

Untuk menghadapi tantangan pasar global yang semakin ketat dan kompleks, pertanian menuntut efisiensi yang tinggi, berorientasi pasar dan mampu bersaing di bidang mutu (*quality*), jumlah (*quantity*), kontinuitas (*continuity*), ketepatan waktu (*delivery on time*) dan harga (*price*) baik di pasar dalam negeri (*domestic*) maupun di pasar internasional (*export*) (Sudalmi, 2010). Memaksimalkan produktivitas usahatani dilaksanakan dengan optimalisasi penggunaan sarana pertanian serta

pemanfaatan sumberdaya alam dengan prinsip berkelanjutan, merupakan tujuan pembangunan pertanian modern. Fokus utama untuk meningkatkan produksi dan produktivitas bukan lagi pada penggunaan sumberdaya pertanian seperti tanah, air, dan tenaga kerja manusia tetapi pada pembentukan modal, inovasi baru, penelitian dan pengembangan.

Tabel 1. Karakteristik pembangunan pertanian berkelanjutan secara umum

Karakter umum	Teknis	Ekonomi
Keberlanjutan jangka panjang	Input internal rendah	Prioritas pada ketahanan pangan
Partisipatif	Budidaya secara spesifik lokasi, teknologi tepat guna yang ramah lingkungan & indigenous	Mengutamakan pada pemanfaatan sumberdaya lokal yang tersedia
Solusi manajemen untuk pemecahan masalah	Peningkatan produktivitas tanaman dan lahan dengan pemanfaatan bahan organik <i>off farm</i> , pengendalian HPT secara biologis	Menempatkan nilai tinggi pada pemenuhan kebutuhan manusia dan lingkungan

Sumber: modifikasi dari Lagiman, 2020

2.5. Implementasi Pembangunan Pertanian Berkelanjutan di Indonesia

Budidaya pertanian yang dilakukan secara tidak bijaksana untuk meningkatkan produktivitas dan produksi pertanian terutama pangan membawa pengaruh terhadap penurunan efisiensi produksi karena adanya dampak samping yang merugikan akibat meningkatnya penggunaan bahan kimia yang tidak ramah lingkungan dan secara langsung berdampak kepada degradasi lahan dan lingkungan serta menurunkan kualitas hasil produksi pertanian. Beberapa dampak yang ditimbulkan dari pupuk kimia yang berkonsentrasi tinggi dan dengan dosis yang tinggi dalam kurun waktu yang panjang antara lain menyebabkan terjadinya kemerosotan kesuburan tanah karena terjadi ketimpangan hara atau kekurangan hara lain, semakin

merosotnya kandungan bahan organik tanah, eutrikifikasi badan air, peningkatan pencemaran air dan tanah, dan kontribusi dalam proses pemanasan global (Untung, 2006; Sihotang, 2010). Penggunaan pestisida yang berlebihan dalam kurun yang panjang mengakibatkan peningkatan pencemaran air dan tanah, menurunnya keanekaragaman hayati, ketergantungan petani pada pemerintah dan perusahaan/industri agrokimia, dan mengancam kesehatan masyarakat dan penolakan pasar (Untung, 2006; Sihotang, 2010).

Permasalahan lingkungan dalam kaitan pembangunan pertanian ke depan merupakan masalah yang kompleks. Kepedulian Indonesia terhadap berbagai kerusakan lingkungan sumberdaya alam yang terjadi dituangkan dalam komitmen Indonesia melaksanakan beberapa pertemuan dan agenda Internasional berkaitan dengan penyelamatan lingkungan seperti halnya Agenda 21, Rio de Janeiro dan KTT Bumi 10, Johannesburg serta Konferensi Nasional Pembangunan Berkelanjutan-KNPB. Dengan memperhatikan tututan pangan yang semakin tinggi dan berbagai masalah sumberdaya dan lingkungan pertanian maka menimbulkan kesadaran bahwa pembangunan pertanian berkelanjutan sangat dibutuhkan.

Oleh karena itu implementasi pembangunan pertanian berkelanjutan merupakan tugas dari berbagai pihak dan diperlukan kerjasama antar sektor serta komitmen politik yang kuat agar pembangunan pertanian berkelanjutan dapat terintegrasi dengan aspek lingkungan secara utuh. Pembangunan Pertanian Berkelanjutan mengharuskan penerapan secara terpadu, lintas sektoral dan lintas disiplin ilmu, baik pada tingkat pusat dan/atau daerah baik mulai dari sinergisitas konsep, program, strategi pencapaian dan implementasi pembangunan pertanian berkelanjutan.

Akhir-akhir ini berkembang salah satu model pertanian berkelanjutan yaitu *Integrated Bio-Cycle Farming System* (IBFS) yang memadukan sektor pertanian dengan non pertanian yang dikelola secara harmonis dalam satu kesatuan wilayah terpadu (agropolitan) (Agus, 2014). Model IBFS banyak dikembangkan menjadi destinasi kepentingan wisata yang dikemas dalam bentuk desa wisata/agrowisata. Perbandingan IBFS dengan model pertanian berkelanjutan lainnya terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik kunci beberapa model pertanian berkelanjutan

Pertanian input rendah/terpadu	Pertanian organik	Pertanian biodinamika	Agroforestri	Pertanian siklus-bio terpadu (IBFS)
Integrasi prose salami yang menguntungkan	Integrasi tanah, lingkungan, dan kesehatan manusia	Optimalisasi kualitas tanah, tanaman, hewan, dan kesehatan manusia melalui pengelolaan organisme	Integrasi tanaman kayu dan herbal	Integrasi pertanian dan non pertanian
Menambah nilai lingkungan	Pupuk alami, nilai lingkungan	Nilai ekonomi	Nilai lingkungan	Nilai lingkungan, estetika, ekonomi
Rotasi tanaman	Rotasi tanaman, diversifikasi spasial ideal	Rotasi tanaman, diversifikasi spasial ideal	Spasial diversitas tipe tanaman	Rotasi dan diversitas tanaman
Dampak pengelolaan tanah minimum	Kecukupan N melalui fiksasi N	Kecukupan N melalui fiksasi N, peningkatan kualitas lingkungan, dan kehidupan tanaman	Varietas tanaman dan sistem pastoral	Bioteknologi, nanoteknologi, probiotik
Penggunaan pupuk kimia	Menghindari penggunaan pupuk kimia	Menghindari penggunaan pupuk kimia	Pemupukan pada tanaman pertanian, pemanfaatan siklus pada tanaman kehutanan	Pengelolaan siklus organik tertutup dan terpadu
Penggunaan pestisida	Tanpa pestisida kimia	Tanpa pestisida kimia	Tanpa pestisida	Pengelolaan bio-alam terpadu
Prinsip umum	Prinsip unit pengelompokan	Prinsip unit pengelompokan	Prinsip umum	Konsep agropolitan
Pengelolaan tanaman spesifik lokasi	Pengelolaan tanaman spesifik lokasi	Pengelolaan tanaman spesifik lokasi	Pengelolaan tanaman spesifik lokasi	Pengelolaan tanaman spesifik lokasi
Semi tradisional	Alami	Terpadu	Tradisional	Menyeluruh dan terpadu

Sumber: Agus, 2014

Pertanian berkelanjutan harus mensyaratkan pelestarian sumberdaya lahan pertanian, penerapan *Good Agriculture Practices* (GAP) dan menjadikan pertanian berkelanjutan sebagai bagian integral dari usahatani. Akan tetapi dalam pelaksanaannya memerlukan pemahaman dan kesadaran pentingnya pertanian berkelanjutan pada *stakeholder* seperti pengambil kebijakan dan praktisi dan petani guna memperoleh manfaat produk aman konsumsi, sumberdaya pertanian dan lingkungan terpelihara, produktivitas optimal dan pendapatan petani meningkat.

2.6. Kendala Penerapan Pertanian Berkelanjutan

Penerapan pembangunan pertanian berkelanjutan di Indonesia menghadapi berbagai banyak tantangan. Mulai dari pengetahuan dan kesejahteraan petani yang rendah, kurang menariknya sektor pertanian bagi generasi muda, masih kurangnya teknologi ramah lingkungan yang mudah dan murah, terhambatnya optimalisasi usaha pertanian, ancaman perubahan iklim dan dukungan kebijakan.

Rendahnya pengetahuan dan kesejahteraan petani berpengaruh terhadap mindset dan perilaku petani dalam penggunaan bahan agrokimia. Semakin tingginya permintaan pemenuhan kebutuhan pangan, meningkatkan tekanan terhadap pertanian untuk meningkatkan produksinya. Dengan adanya revolusi hijau, peningkatan produksi dapat dicapai karena adanya kepentingan ekonomi dalam agenda pembangunan dimana sektor pertanian mendukung kesejahteraan manusia dalam hal pangan. Namun, seringkali perspektif pembangunan memandang pertanian sebagai industri. Hal inilah yang menyebabkan setiap tahunnya penggunaan bahan agrokimia seperti pupuk dan pestisida semakin meningkat namun tidak diimbangi dengan pengetahuan petani akan pertanian maupun penggunaan bahan agrokimia hal ini menimbulkan penggunaan pestisida yang kurang bijaksana. Bahan agrokimia yang digunakan secara berlebihan akan mengakibatkan kerugian yang begitu besar bagi sektor pertanian, lingkungan maupun ke petaninya itu sendiri. Pestisida dapat menimbulkan pencemaran tanah akibat adanya residu, keracunan, dan juga menurunkan nilai tambah dari produk

pertanian akibat dari residu yang berlebih yang terkandung di dalamnya.

Saat ini sektor pertanian masih dianggap oleh sebagian besar masyarakat sebagai sektor yang belum menjanjikan pendapatan dan profit tinggi, sehingga masih belum diminati oleh para generasi muda. Meskipun saat ini sudah diprogramkan pencetakan petani milenial, namun belum bisa menyeluruh ke semua area. Petani yang masih bertahan sebagian besar adalah usia tua dan sebagian adalah sebagai pekerjaan sampingan, dengan kondisi ini maka potensi sumberdaya manusia (SDM) dalam penerapan teknologi menjadi salah satu hambatan dalam penerapannya, karena pada umumnya petani akan mencari yang cepat hasilnya, dan tidak perlu waktu lama dalam proses pembuatannya.

Saat ini kebanyakan petani masih banyak menggunakan pupuk anorganik, pertisida, dan bahan-bahan kimia yang dapat mencemari dan mematikan kehidupan mikroorganisme karena bahan agrokimia tersebut bisa diperoleh dengan mudah dan hasilnya cepat. Sedangkan sebagian besar teknologi pertanian ramah lingkungan memerlukan proses cukup lama, hasilnya tidak langsung kelihatan nyata, aplikasi harus berulang kali karena umumnya bahan alami tidak bersifat persisten di lapang, dan diperlukan bahan alami yang ada di sekitarnya sehingga diperlukan upaya untuk mengumpulkannya, serta diperlukan kebersamaan yang terintegrasi dalam implementasinya agar dapat berlangsung secara berkelanjutan. Untuk itu, teknologi ramah lingkungan seyogyanya murah, mudah diaplikasikan, dan mudah tersedia. Sebagai contoh, saat ini di pasaran online juga banyak tersedia bahan alami azadirachtin sehingga masyarakat petani milenial lebih tertarik untuk mengakses insektisida alami tersebut yang tersedia di pasar online daripada harus menyiapkan dengan bahan alami tanaman mimba yang ada di sekitarnya.

Optimalisasi usaha pertanian memerlukan dukungan pelaku usaha, kebijakan, ketersediaan lahan dan skala usaha. Efektivitas pelaksanaan kebijakan dan penerapan teknologi sangat tergantung dari pelaku usaha. Hilirisasi usaha untuk penciptaan nilai tambah memerlukan skala usaha petani, hanya

saja upaya peningkatan nilai tambah masih terbatas. Sesungguhnya lahan yang sempit tidak akan menjadi masalah jika produktivitasnya dapat ditingkatkan. Inovasi dan teknologi dalam hal ini dapat menjadi solusi, namun, diperlukan dukungan lain utamanya sumberdaya manusia dengan keahlian yang relevan.

Perubahan iklim telah menjadi isu penting dalam berbagai kajian pembangunan pertanian berkelanjutan. Anomali iklim, curah hujan, dan pergeseran musim yang tidak menentu menyebabkan petani kesulitan dalam menetapkan waktu yang tepat untuk mengawali masa tanam, melakukan pembenihan dan pemupukan. Alhasil, produksi akan menurun karena jadwal penyediaan benih dan pupuk yang tidak menentu akan mengakibatkan pasokan yang tidak menentu pula, sementara permintaan terus berjalan.

Dari hal tersebut diatas, pada titik inilah, dibutuhkan kolaborasi antara ilmuwan dan pemerintah untuk menghasilkan inovasi maupun terobosan yang mampu mendukung kebutuhan petani untuk mencapai pertanian berkelanjutan yang mendukung kelestarian lingkungan hidup dan mendukung kesejahteraan ekonomi petani. Akan tetapi Kebijakan pemerintah dirasakan masih minim dalam pengawalan tentang penerapan Pertanian Berkelanjutan di petani. Pemangku kebijakan dalam hal ini adalah pemerintah yang memiliki peran besar dalam mendukung arah sektor pertanian ke depan untuk mencapai pertanian berkelanjutan, ekosistem sawah terpelihara, petani sejahtera, dan pangan sehat untuk Indonesia.

BAB III

DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP SEKTOR PERTANIAN

*Aprian Aji Santoso, Eni Yulianingsih, Ika Ferry Yunianti,
Helena Lina Susilawati*

Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer yang sangat cepat sejak era pra industri memicu peningkatan suhu global yang mendorong terjadinya perubahan sistem iklim global dan mempengaruhi berbagai unsur iklim lainnya. GRK dihasilkan dari berbagai sumber baik diproduksi secara alami maupun dari berbagai aktivitas manusia. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) yang merupakan lembaga ilmiah dan antar-pemerintah yang berada di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) menyampaikan bahwa aktivitas manusia berperan nyata dalam mempercepat terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim, dimana telah terjadi peningkatan suhu udara global rata-rata dari daratan dan lautan sebesar 0,85 [0,65 sampai 1,06]°C selama periode 1880 sampai 2012 (IPCC, 2013). Peningkatan suhu global mengakibatkan mencairnya es dan glasier di kutub dan berbagai tempat bersalju lainnya, khususnya di Antartika dan Greenland dan berkontribusi terhadap peningkatan tinggi muka air laut (TML) rata-rata secara global (IPCC, 2019).

Perubahan iklim mempunyai kaitan erat dengan kehidupan manusia, baik manusia sebagai pemicu/pelaku aktivitas, sebagai yang terdampak dan sebagai pelaku yang mampu berkontribusi dalam menekan dampak. Hal ini menjadikan isu perubahan iklim merupakan salah satu isu lingkungan yang menjadi perhatian utama dari negara-negara di dunia. Respon dunia terhadap pemanasan global dan perubahan iklim mendorong terbentuknya Konvensi Rangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim (*The United*

Nation Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) saat dilangsungkannya Rio Earth Summit pada tahun 1992. UNFCCC telah lebih dari 20 kali menyelenggarakan *Conference of Parties* (COP) atau Konferensi Antar Pihak. Isu dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian dibahas secara khusus sejak COP 18 tahun 2012 di Doha, Qatar dan pada COP 23 di Bonn dimana menghasilkan kesepakatan *Koronivia Joint Work on Agriculture* (KJWA). Inti dari kesepakatan KJWA adalah sektor pertanian merupakan sektor yang rentan terhadap perubahan iklim, karena itu sangat penting bagi sektor ini untuk beradaptasi agar perannya untuk menjaga ketahanan pangan tidak terganggu (IPCC, 2019).

Sektor pertanian mempunyai peran yang bersifat multidimensional dimana perubahan iklim berdampak terhadap sistem produksi pertanian. Besarnya dampak perubahan iklim terhadap pertanian tergantung pada tingkat dan laju perubahan iklim dan sifat dan kelenturan sumberdaya dan sistem produksi pertanian. Sektor pertanian merupakan sektor yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim yang terjadi akibat pemanasan global. Perubahan iklim dapat memicu perubahan musim, pola tanam, waktu tanam, produksi dan kualitas hasil pertanian (Hidayati dan Suryanto, 2015). Surmaini *et al.*, (2011) menyampaikan bahwa terdapat tiga faktor penting dalam perubahan iklim global yang berdampak pada sektor pertanian yaitu perubahan pola hujan, meningkatnya kejadian cuaca ekstrim (banjir dan kekeringan), peningkatan suhu udara dan permukaan air laut.

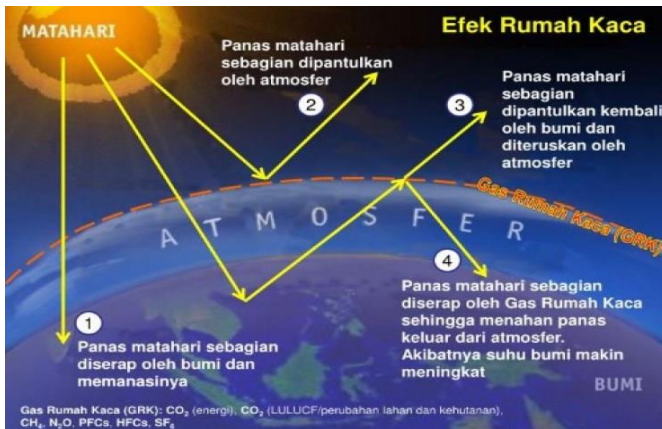
Di sisi lain, sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang berperan sebagai penyumbang emisi GRK (Surmaini *et al.*, 2011). Beberapa kategori sumber emisi dari sektor pertanian antara lain: budidaya padi sawah, peternakan, pembakaran biomassa residu pertanian, aplikasi kapur pertanian dan pupuk urea pada lahan pertanian, emisi dinitrogen oksida (N_2O) langsung dan tidak langsung dari tanah terkelola. Selain sebagai penyumbang, sektor pertanian berperan dalam upaya penurunan emisi gas rumah kaca. Upaya untuk menekan meningkatnya pemanasan global dan perubahan iklim sangat mendesak dan

penting dilakukan, jika upaya mitigasi tidak dilakukan maksimal yang mengakibatkan peningkatan suhu udara tidak dapat ditekan maka dapat berdampak lebih luas ke segala aspek kehidupan manusia.

3.1. Mekanisme Terjadinya Pemanasan Global

Pemanasan global (*global warming*) merupakan ketidakseimbangan ekosistem di bumi akibat adanya peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan di bumi yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer seperti; karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), hidrofluorokarbon (HFCs), perfluorokarbon (CFCs), dan sulfur heksa fluorida (SF_6) (Triana, 2008). GRK memiliki sifat khas seperti kaca yaitu meneruskan radiasi gelombang pendek atau cahaya matahari, namun menyerap dan memantulkan radiasi gelombang panjang yang bersifat panas sehingga suhu di atmosfer mengalami peningkatan. Pemanasan global terjadi karena sinar matahari memancarkan radiasi gelombang pendek dan gelombang panjang dimana sebagian besar radiasi gelombang pendek diserap dan memanaskan permukaan bumi serta radiasi balik gelombang panjang (infra merah) yang dipancarkan permukaan bumi sebagian dipancarkan keluar atmosfer dan sebagian memanaskan atmosfer (Triana, 2008). Oleh karena adanya peningkatan konsentrasi GRK di atmosfer menyebabkan panas dari matahari sebagian tidak dapat diteruskan (terperangkap) sehingga menyebabkan peningkatan suhu bumi yang mengakibatkan pemanasan global (Gambar 2).

Efek rumah kaca merupakan istilah untuk panas yang terperangkap di dalam atmosfer bumi dan tidak bisa menyebar. Menurut Triana (2008), mekanisme terjadinya pemanasan global dipengaruhi oleh energi yang masuk ke bumi yang mengalami serangkaian proses dimana 25% energi dipantulkan oleh awan atau partikel lain ke atmosfer, 25% diadsorpsi oleh awan, 45% diadsorpsi oleh permukaan bumi dan 5% lagi dipantulkan kembali oleh permukaan bumi.

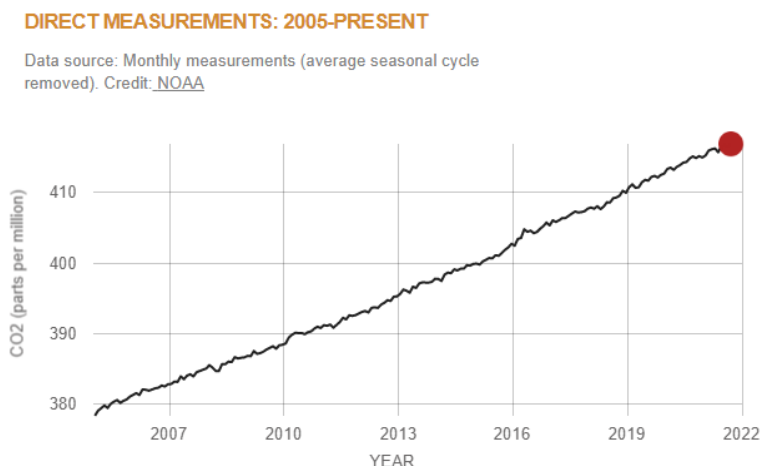


Gambar 2. Ilustrasi efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global

Sumber: amongguru.com

Energi yang diadsorpsi oleh awan dan permukaan bumi ($25\% + 45\% = 70\%$) dipantulkan kembali dalam bentuk radiasi infra merah atau gelombang panas matahari. Namun demikian, sebagian besar infra merah yang dipancarkan bumi tertahan oleh awan, gas CO₂ dan gas gas lain (efek rumah kaca), untuk dikembalikan ke permukaan bumi. Dalam keadaan normal, efek rumah kaca secara alami diperlukan untuk mengurangi perbedaan suhu antara siang dan malam. Namun, dengan meningkatnya gas rumah kaca terutama (CO₂), akan semakin banyak gelombang panas matahari atau infra merah yang dipantulkan dari permukaan bumi diserap atmosfer sehingga suhu permukaan bumi semakin meningkat. Semakin tinggi konsentrasi gas-gas rumah kaca di atmosfer, semakin menjadi insulator yang menahan lebih banyak panas dari matahari yang dipancarkan ke bumi. Bumi memanaskan akibat dari sinar matahari yang sudah masuk ke bumi tidak bisa keluar karena gas-gas rumah kaca ini membentuk lapisan di atmosfer yang memantulkan sinar matahari. Proses tersebut pada akhirnya akan menyebabkan terjadinya pemanasan global yang akan berpengaruh terhadap perubahan iklim. Emisi GRK mengalami peningkatan dengan cepat seiring dengan industrialisasi (Triana, 2008). Hal ini terjadi akibat peningkatan jumlah gas ini melebihi

kemampuan tumbuhan dan laut untuk mengadsorpsinya. Konsentrasi CO₂ yang menyumbang sebagian besar GRK meningkat pada tingkat yang mengkhawatirkan. Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer dari mulai tahun 2005 sampai dengan September 2021 disajikan pada Gambar 3. Konsentrasi CO₂ di atmosfer telah mengalami peningkatan yaitu dari 315 ppm pada tahun 1959 menjadi 417 ppm pada September 2021. Menurut Malhi *et al.* (2021), CO₂ merupakan bagian utama dari GRK di atmosfer, dimana 65% berasal dari bahan bakar fosil dan proses industri, 11% dari kehutanan dan penggunaan lahan lainnya.

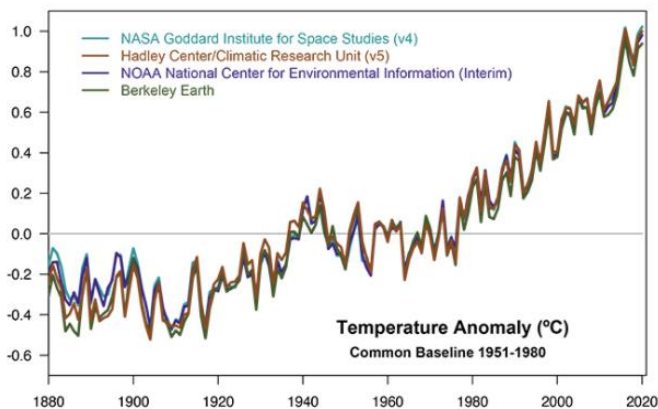


Gambar 3. Konsentrasi gas CO₂ dari tahun 2005-September 2021
Sumber: climate.nasa.gov

3.2. Perubahan Iklim (PI)

Perubahan iklim (PI) adalah perubahan kondisi rata-rata parameter iklim yang terjadinya tidak dalam waktu singkat (mendadak), secara perlahan dalam kurun waktu yang cukup panjang antara 50-100 tahun sehingga menentukan iklim lokal, regional, dan global (Wihardjaka, 2014). Definisi perubahan iklim menurut Undang-Undang Nomor 31 Tahun 2009 yaitu berubahnya iklim yang diakibatkan secara langsung atau tidak langsung oleh aktivitas manusia yang menyebabkan perubahan komposisi atmosfer secara global serta perubahan variabilitas

iklim alami yang teramati pada kurun waktu yang dapat dibandingkan. Contohnya curah hujan yang lebih banyak intensitas di musim penghujan atau musim kemarau yang lebih panjang dari tahun-tahun sebelumnya. Dalam istilah modern saat ini, perubahan iklim juga dikenal dengan istilah yang berkaitan dengan berubahnya parameter iklim yang disebabkan oleh hawa panas bumi yang semakin meningkat. Perubahan iklim terjadi sebagai akibat dari variabilitas internal dalam sistem iklim dan faktor eksternal (baik alami maupun antropogenik). Faktor alami seperti aktivitas gunung berapi turut menyumbang peningkatan GRK di atmosfer, sedangkan faktor antropogenik yang turut memicu peningkatan GRK di atmosfer berasal dari pembakaran bahan bakar fosil.



Gambar 4. Perubahan suhu permukaan global dari tahun 1880-2020

Sumber: climate.nasa.gov

Suhu merupakan salah satu parameter iklim yang sangat berpengaruh dalam menyebabkan terjadinya perubahan iklim secara global. Peningkatan suhu global dan perubahan iklim tersebut juga telah mendorong terjadinya perubahan berbagai frekuensi dan intensitas berbagai unsur iklim terutama berkaitan dengan kejadian cuaca/iklim ekstrim (Atmojo, 2008). IPCC melaporkan bahwa secara historis telah terjadi peningkatan kejadian iklim ekstrim, dimana sejak tahun 1950 tercatat

meningkatnya kejadian ekstrim hari panas dan hujan lebat. Perubahan suhu permukaan global telah mengalami peningkatan dari mulai tahun 1880-2018 (Gambar 4).

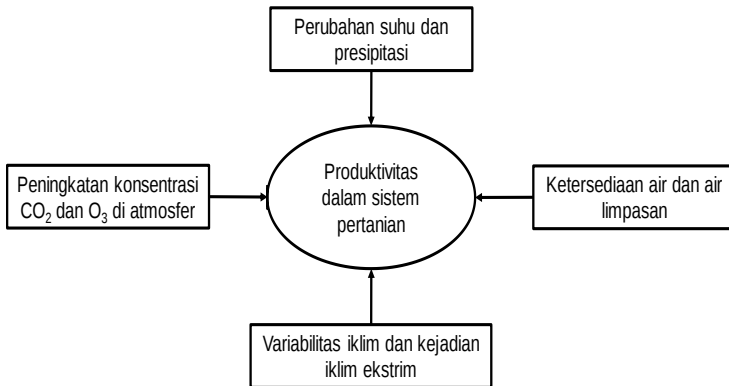
Suhu rata-rata global telah meningkat pada kisaran 1-1,2°C sejak 1850 (Malhi *et al.*, 2021). Peningkatan suhu yang tinggi telah terjadi di lintang utara, terutama di kutub utara, dimana suhu rata-rata meningkat hampir dua kali lipat dari rata-rata suhu permukaan global selama tahun 1906-2005 (Jiang *et al.*, 2015). Indonesia juga telah mengalami peningkatan suhu udara permukaan rata-rata sekitar 0,3°C pada tahun 1990 menjadi sekitar 0,5°C pada abad ke-20. Rata-rata suhu permukaan di Indonesia diproyeksikan meningkat antara 0,8-1,0°C pada tahun 2020-2050 dan antara 2,1-3,4°C pada tahun 2100 (DAI, 2012).

3.3. Dampak PI terhadap sektor pertanian

Perubahan iklim dan sektor pertanian mempunyai hubungan yang sangat penting, khususnya bagi negara berkembang karena pada umumnya negara berkembang menggantungkan sektor pertanian sebagai mata pencaharian utama. Perubahan iklim, variabilitas pola cuaca, dan peningkatan kejadian iklim ekstrim mempengaruhi produksi dan produktivitas tanaman. Indonesia merupakan negara yang terdampak akibat perubahan iklim terutama kekeringan dan banjir, karena fenomena ini menurunkan produksi pangan dan kapasitas produksi. Dampak lain dari iklim ekstrim antara lain menyebabkan kegagalan panen dan tanaman, penurunan indeks pertanaman yang berujung pada penurunan produktivitas dan produksi; kerusakan sumberdaya lahan pertanian; peningkatan frekuensi, luas, dan intensitas kekeringan; peningkatan kelembaban; dan peningkatan intensitas gangguan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) (Surmaini *et al.*, 2011).

Perubahan iklim memiliki efek yang berbeda antar wilayah agroekologi, sistem usahatani, dan kondisi sosial ekonomi petani (Jayaraman, 2011). Hubungan antara faktor-faktor iklim dengan produktivitas pertanian disajikan pada Gambar 5. Perubahan iklim dapat menimbulkan dampak secara langsung maupun tidak langsung terhadap produksi pertanian. Dampak

langsung yang ditimbulkan dari perubahan iklim yaitu menurunnya produksi pertanian akibat dari kenaikan suhu, salinitas tanah, serta musim kemarau atau penghujan yang panjang. Sedangkan dampak tidak langsung yaitu berkurangnya pasokan air irigasi, berkurangnya luas lahan potensial di kawasan pesisir akibat rob, munculnya hama dan penyakit yang baru, dan lain sebagainya (Faqih dan Boer, 2013). Oleh karena itu sektor pertanian harus mampu beradaptasi dengan perubahan iklim untuk tetap dapat mempertahankan atau bahkan meningkatkan produktivitas pertanian untuk beberapa dekade mendatang guna memenuhi kebutuhan pangan yang semakin meningkat seiring dengan meningkatnya populasi penduduk global



Gambar 5. Hubungan faktor iklim dengan produktivitas pertanian
Sumber: Anwar *et al.*, 2013

3.3.1. Dampak PI terhadap tanaman dan produksi

Berdasarkan laporan DNPI (2013) sektor pertanian mengalami gangguan langsung akibat perubahan iklim. Perubahan jumlah dan pola curah hujan (ketersediaan air), pergeseran musim (maju mundur dan lamanya musim hujan/kemarau) berpengaruh terhadap pola dan waktu tanam serta indeks/intensitas pertanaman (IP). Pergeseran awal musim hujan menyebabkan bergesernya musim tanam dan panen komoditi pangan (padi dan palawija). Hal ini berdampak bagi petani yang tidak lagi memprediksi musim tanam secara akurat.

Perubahan iklim terjadi akibat perubahan dari unsur-unsur iklim seperti angin, kelembapan udara, suhu, dan curah hujan (Tjasyono, 2004). Variabilitas dan perubahan iklim dengan segala dampaknya berpotensi menyebabkan kehilangan produksi tanaman pangan, seperti padi sebesar 20,6%, jagung sebesar 13,6%, dan kedelai sebesar 12,4% (Handoko *et al.*, 2008). Kecepatan angin merupakan perantara dalam penyebaran tepung sari yang diperlukan dalam suatu tanaman, tetapi angin yang kencang dapat mengganggu aktivitas penyerbukan oleh serangga. Peningkatan suhu udara menyebabkan perubahan morfologi, fenologi dan mempengaruhi proses fisiologi tanaman (Pulatov *et al.*, 2015; Handayani *et al.*, 2013). Tanaman padi dapat tumbuh secara optimal pada suhu 27° hingga 32°C tanpa mengalami penurunan hasil, namun jika suhu mencapai lebih dari 32°C maka berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan dan hasil padi (Aghamolki *et al.*, 2014). Peningkatan suhu udara juga mempengaruhi kandungan gula, asam organik, dan kadar anti oksidan sayuran. (Moretti *et al.*, 2010). Proses panen dan pascapanen buah-buahan seperti pengangkutan dan penyimpanan juga sangat dipengaruhi oleh suhu udara (Chandradewi, 2014). Proses pemanen dan penyimpanan pada kondisi yang tidak tepat dapat mempercepat proses pembusukan buah dan merusak kandungan gizi buah. Proses pembusukan buah dapat terjadi karena perubahan suhu udara lebih parah terjadi di daerah tropika basah seperti Indonesia (Essonon *et al.*, 2007).

Perubahan iklim mengakibatkan peningkatan curah hujan di wilayah tertentu dan sekaligus kekeringan di tempat yang lain (Kusnanto, 2011). Kejadian banjir dan kekeringan dapat mengganggu tanaman dari persemaian hingga panen. Gangguan tanam bisa berupa gagal tanam setelah semai, tanaman rusak karena banjir, bahkan puso. Selain itu, peningkatan intensitas banjir secara tidak langsung akan mempengaruhi produksi karena meningkatnya serangan hama dan penyakit tanaman. Perubahan iklim mendatangkan masalah baru bagi keberlanjutan produksi sebesar 10,7% pada kondisi El Nino dan sebesar 11,4 % pada kondisi La Nina. Padi sawah yang umumnya diusahakan pada

lahan basah, mengalami pengaruh penurunan produksi 2,9% pada saat El Nino dan sebaliknya terjadi peningkatan produksi 2,4% pada saat La Nina. Jagung mendapatkan pengaruh penurunan produksi 7,4% pada saat El Nino dan peningkatan produksi 3,9% pada saat La Nina. Ubi jalar adalah tanaman yang paling toleran terhadap perubahan iklim karena memperoleh dampak peningkatan produksi 2,5% pada kondisi El Nino (Santoso, 2016). Kekeringan merupakan penyebab terbesar penurunan produksi tanaman dibandingkan dengan faktor lingkungan lain (Boyer, 1985). Kekeringan menurunkan laju fotosintesis, penurunan laju pertumbuhan akibat rendahnya potensial air dan turgor tumbuhan. Pada keadaan cahaya yang tinggi, kekeringan mengakibatkan terjadinya *stress* oksidatif karena dalam keadaan cahaya tinggi terjadi kelebihan energi dari proses reaksi terang, sedangkan laju reduksi CO₂ fotosintesis menurun drastis akibat penutupan stomata selama cekaman (Hamim, 2004).

Tanaman hortikultura umumnya sensitif terhadap cekaman (kelebihan dan kekurangan) air. Kerentanan tanaman hortikultura terhadap pola curah hujan akan berimbas pada luas areal tanam, produktivitas dan kualitas hasil. Jumlah curah hujan yang tinggi menyebabkan produksi cabai rawit mengalami penurunan produksi dari tahun 2009 mencapai 1.237 kg ke tahun turun menjadi 615 kg, atau terjadi penurunan produksi sebesar 49,72% sehingga menyebabkan naiknya harga cabai rawit, yang semula hanya Rp 8.427,-/kg pada tahun 2009 menjadi Rp 54.146,-/kg atau naik sebesar 642,53% (Miyanto, 2009).

Kenaikan muka air laut menyebabkan penurunan luasan dataran yang dimanfaatkan sebagai lahan pertanian. Intrusi air laut membuat tanah daerah pesisir menjadi salin. Salinitas mempengaruhi sifat fisik dan kimia tanah, dimana tekanan osmotik dan potensi ionisasi meningkat, infiltrasi tanah buruk, kerusakan dan terganggunya struktur tanah, buruknya permeabilitas tanah, dan penurunan konduktivitas. Salinitas yang cukup tinggi menimbulkan stres dan memberikan tekanan terhadap pertumbuhan tanaman. Salinitas menghambat pertumbuhan tanaman dengan merusak sel-sel yang sedang tumbuh sehingga pertumbuhan tanaman terganggu dan

membatasi jumlah suplai hasil- hasil metabolisme esensial bagi pertumbuhan sel. Hal ini yang menyebabkan tanaman di daerah salin produksinya rendah.

Perubahan iklim berdampak negatif terhadap keragaman dan kelimpahan OPT sehingga mengakibatkan kerusakan tanaman yang dapat mempengaruhi produksi pertanian (Oerke 2006; Juroszek *et al.* 2011). Abrol (2013) menyampaikan bahwa peningkatan suhu akan menyebabkan serangga/hama menjadi lebih berlimpah dan hampir semua serangga akan terpengaruh oleh perubahan suhu. Efek lainnya adalah peningkatan nafsu makan dan pertumbuhan, sehingga kemungkinan tambahan generasi pada tahun berikutnya. Peningkatan suhu global akan juga mempengaruhi fenologi serangga termasuk kedatangan awal hama/serangga dan waktu munculnya berbagai hama/serangga. Serangan hama penyakit tanaman pangan dan hortikultura sangat dinamis dari waktu ke waktu, outbreak atau ledakan hama penyakit tanaman umumnya terjadi jika ada kondisi yang lebih hangat dan lembab. Ledakan serangan wereng batang coklat (WBC) umumnya terjadi pada musim kemarau yang diikuti kejadian iklim ekstrem La Nina.

3.3.2. Dampak PI terhadap siklus air

Perubahan iklim dapat menimbulkan empat bahaya utama dalam bidang air, yaitu penurunan ketersediaan air (PKA), banjir, longsor, dan kekeringan yang umumnya disebabkan oleh parameter curah hujan dan kejadian iklim serta cuaca ekstrim. Analisis sensitivitas, kerugian sumberdaya air yang disebabkan oleh terganggunya keseimbangan neraca air di wilayah Indonesia berkisar antara Rp. 24,5 T hingga Rp. 31,78 T atau setara 0,33 – 0,43% PDB Nasional (KLHK, 2020).

Kenaikan suhu akan berpengaruh terhadap siklus air yakni mengubah evaporasi, transpirasi, kelembaban tanah, dan presipitasi. Suhu yang lebih tinggi berpotensi menyebabkan curah hujan lebat, tetapi dalam periode waktu lebih pendek dan menimbulkan kemarau panjang. Musim kemarau yang lebih panjang akan menimbulkan kekeringan. Dampak anomali iklim khususnya kekeringan sangat beragam tergantung pada intensitas

El-Nino (kuat, sedang, lemah), serta wilayah yang dilandanya. Kekeringan adalah bencana yang kompleks dan ditandai dengan kekurangan air berkepanjangan (Ghulam *et al.*, 2007). Kekeringan yang terjadi berpengaruh terhadap ketersediaan air dalam tanah, yang secara fisiologis kekurangan air dapat menghambat proses produksi pertanian dan pada gilirannya menghambat pasokan bahan baku yang berasal dari pertanian. Kekurangan air atau kekeringan berdampak pada kerawanan pangan dan menyebabkan penurunan hasil tanaman karena pertumbuhan tanaman akan menjadi tidak normal. Konsekuensi dari bencana ini ialah kekurangan air, kerusakan sumberdaya ekologi, berkurangnya produksi pertanian, serta terjadinya kelaparan, dan korban jiwa (Kogan, 1997). Di sisi lain, banjir dengan intensitas tinggi dapat memperparah kerusakan jaringan irigasi di beberapa wilayah. Luas area irigasi permukaan di Indonesia mencapai 7.145.168 ha dimana sekitar 54 % dalam kondisi baik dan 46% kondisinya rusak (Ditjen SDA, 2020).

3.3.3. Dampak PI terhadap kehidupan ternak

Perubahan iklim global juga akan memberi dampak langsung dan tidak langsung pada kesehatan hewan, penyakit hewan dan zoonosis yang muncul karena terganggunya ekosistem alami dan memungkinkan patogen pindah ke daerah baru di mana mereka dapat membahayakan kehidupan liar dan spesies domestik, serta manusia. Peningkatan suhu menyebabkan ternak mudah terserang penyakit bahkan menyebabkan kematian karena lingkungan yang panas dan lembab merupakan kondisi yang memudahkan perkembangan mikroorganisme patogen dan parasit, sehingga ternak lebih rentan terhadap serangan penyakit dan akhirnya mempengaruhi produktivitas ternak.

Pada ternak ruminansia, pengaruh langsung dari cekaman panas menyebabkan terjadinya penurunan produksi susu pada sapi perah dan penurunan pertambahan berat badan pada sapi potong. Adanya cekaman panas secara langsung akan menyebabkan penurunan konsumsi, gangguan metabolisme dan utilisasi nutrien. Cekaman panas juga akan berdampak pada penurunan efisiensi reproduksi ternak. Pengaruh tidak langsung

dari faktor lingkungan terhadap ternak diperoleh antara lain melalui tanaman pakan, dimana lingkungan sangat mempengaruhi produksi tanaman pakan sebagai penyedia bahan pakan. Apabila produksi tanaman pakan terganggu karena perubahan lingkungan, mengakibatkan ketersediaan bahan pakan ternak terhambat pula. Ditambahkan pula, keterbatasan suplai air akan berdampak langsung terhadap produksi ternak, karena air sangat penting bagi ternak dan juga bagi pertumbuhan tanaman pakan. Kekurangan air minum pada sapi perah menyebabkan terjadinya penurunan produksi susu (Yani dan Purwanto, 2006).

3.4. Emisi GRK dari Sektor Pertanian

Sumber emisi GRK secara global dibagi menjadi 4 sektor, yakni sektor energi, sektor pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan lain (AFOLU), sektor proses industri dan penggunaan produk (IPPU), dan sektor limbah (IPCC, 2006). Namun demikian, sumber emisi GRK di Indonesia dibagi menjadi 5 sektor, yakni sektor energi, sektor pertanian, sektor kehutanan dan kebakaran gambut, sektor proses industri dan penggunaan produk (IPPU) serta sektor limbah (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). Menurut Agus *et al.* (2019), sumber emisi GRK dari sektor pertanian antara lain pengelolaan lahan padi di lahan sawah, aplikasi pemupukan, pengapuran, pembakaran biomas, emisi dari perubahan stok C pada tanah mineral, peternakan, dan pengelolaan lahan gambut.

3.4.1. Emisi CH₄ dari Lahan Sawah

Budidaya padi sangat rentan dari dampak perubahan iklim, di sisi lain budidaya padi berkontribusi nyata sebagai penghasil GRK. Emisi metana (CH₄) yang merupakan salah satu GRK terbesar yang dihasilkan dari lahan sawah terbentuk dari dekomposisi bahan organik di lahan padi sawah dengan pengairan tergenang (kondisi optimum bakteri metanogen memproduksi CH₄). Menurut Linqvist *et al.* (2012), pengelolaan lahan sawah dengan metode pengairan tergenang merupakan kontributor utama emisi metana (CH₄) yaitu sebesar 89% dari emisi CH₄ total dari sektor pertanian. Pada lahan sawah dengan

kondisi pengairan tergenang akan meningkatkan produksi CH_4 karena terciptanya kondisi anaerob. Dalam kondisi tergenang, air masuk ke pori-pori tanah menggantikan udara di dalamnya. Kemudian terjadi proses reduksi dimana konsentrasi O_2 dan nilai potensial redoks akan turun, hal ini memicu aktivitas bakteri methanogen.



Gambar 6. Pengambilan contoh gas rumah kaca dari lahan sawah
Sumber: Dokumentasi Balingtan

Padi berperan sebagai fasilitator dalam produksi, oksidasi dan transport CH_4 ke atmosfer (Wassmann dan Aulakh, 2000). Tanaman padi merupakan penyedia substrat karbon dalam bentuk eksudat yang berasal dari sisa tanaman yang mati dan terdekomposisi sehingga digunakan oleh bakteri metanogen dalam memproduksi CH_4 (Lu *et al.*, 2000, 2002; Aulakh *et al.*, 2001). Gas CH_4 yang terbentuk di tanah sawah umumnya berkisar hingga 90% yang diemisikan melalui lubang aerenkima pada tanaman padi, sisanya adalah melalui proses difusi molekuler melalui permukaan air irigasi dan ebolusi (Bhattacharyya *et al.*, 2016). Selain itu, aerenkima padi berperan sebagai cerobong transport oksigen dari atmosfer ke zona perakaran sehingga menyebabkan kondisi aerobik untuk respirasi akar dalam kondisi tanah yang tergenang dan menghasilkan oksidasi CH_4 dalam rhizosfer (Sigren *et al.*, 1997; Eller dan Frenzel, 2001; Colmer, 2003; Suralta dan Yamauchi, 2008). Mekanisme ini yang salah satunya yang menyebabkan besarnya emisi CH_4 dari berbagai varietas padi akan berbeda (Huang *et al.* 1997; Bilek *et al.*, 1999). Besarnya emisi CH_4 bervariasi antar varietas, hal ini dikarenakan setiap varietas mempunyai kemampuan yang berbeda-beda

dalam mengangkut oksigen ke rhizosfer. Varietas dengan umur panjang dan eksudat akar yang tinggi juga dapat menghasilkan emisi CH_4 lebih tinggi yang mana pada akhirnya menjadi sumber emisi (Hervani *et al.*, 2019). Kondisi oksidasi yang lebih tinggi di permukaan tanah-akar dapat mengurangi produksi CH_4 dalam tanah (Bhattacharyya *et al.*, 2019).

3.4.2. Emisi N_2O dan CO_2 dari Pemupukan

Faktor yang berpengaruh dalam pelepasan N_2O adalah ketersediaan nitrogen (N) dalam tanah. Penggunaan pupuk anorganik menyebabkan kandungan unsur-unsur hara dalam tanah meningkat dan hal tersebut dapat membantu pertumbuhan tanaman padi dengan cepat serta meningkatkan hasil produksi pertanian, salah satunya adalah melalui penambahan pasokan nitrogen ke dalam tanah. Akan tetapi, penggunaan pupuk anorganik terus-menerus akan menyebabkan perubahan struktur tanah, pemadatan, penurunan ketersediaan unsur hara dalam tanah, dan pencemaran lingkungan. Hal ini terjadi karena efisiensi pemupukan N masih rendah dimana N dari sistem tanah-tanaman hilang melalui volatilisasi ammonia, denitrifikasi, aliran permukaan, dan pencucian (De Datta and Buresh, 1989; Ladha *et al.*, 1997). N_2O merupakan hasil samping dari proses nitrifikasi dan denitrifikasi dalam tanah. Nitrifikasi adalah oksidasi amonium menjadi nitrat oleh mikroorganisme secara aerobik, sedangkan denitrifikasi adalah reduksi nitrat menjadi gas N_2 oleh mikroorganisme secara anaerobik. Emisi N_2O dipengaruhi oleh banyak faktor seperti suhu, jenis tanah, tipe vegetasi, kondisi iklim dan faktor biotik (Hutabarat, 2001).

Emisi N_2O terbentuk melalui 2 (dua) jalur, yaitu langsung/*direct* (N_2O dilepaskan setelah pemberian pupuk N) dan tidak langsung/*indirect* (volatilisasi NH_3 dan NO_x , pencucian) (Pramono *et al.*, 2019). Sumber emisi N_2O dari tanah yang dikelola adalah pupuk N yang berasal dari 1) pupuk Urea, ZA, NPK, dan pupuk buatan lainnya; 2) bahan atau pupuk organik misalnya, pupuk kandang, kompos, limbah cair, dan padat; 3) urin dan kotoran ternak yang tersimpan di padang rumput atau padang penggembalaan; 4) sisa tanaman di atas dan di bawah permukaan

tanah; 5) mineralisasi bahan organik tanah, akibat perubahan penggunaan lahan atau pengelolaan tanah mineral; dan 6) drainase atau pengelolaan tanah organik (Histosol) (Pramono *et al.*, 2019).



Gambar 7. Pemupukkan di lahan sawah

Sumber: DPTPH Lampung, 2022

Penggunaan pupuk urea pada budidaya pertanian menyebabkan lepasnya CO_2 yang diikat selama proses pembuatan pupuk. Pemupukan N secara umum meningkatkan total emisi CO_2 pada tanaman, karena terjadi peningkatan aktivitas respirasi pada akar akibat meningkatnya pertumbuhan tanaman, aktivitas mikroba tanah serta proses hidrolisis urea (Chu *et al.*, 2007; Serrano-Silva *et al.*, 2011; Fitra *et al.*, 2019). Emisi CO_2 dari penggunaan pupuk urea terjadi karena urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) berubah menjadi ammonium (NH_4^+), ion hidroksil (OH^-), dan bikarbonat (HCO_3^-) apabila bertemu dengan air dan enzim urease. Proses ini hampir sama dengan penambahan kapur di tanah, dimana bikarbonat yang terbentuk berubah menjadi CO_2 dan air. Kategori sumber ini perlu dimasukkan, karena fiksasi CO_2 dari atmosfer selama pembuatan urea diperhitungkan dalam sektor industri (IPCC, 2006). Menurut Wood dan Cowie (2004), produksi urea biasanya berkaitan erat dengan pabrik ammonia, dimana CO_2 yang berasal dari sintesis ammonia digunakan sebagai input utama dalam produksi urea. Emisi CO_2 yang berasal dari aplikasi

pupuk urea bervariasi tergantung pada praktek manajemen budidayanya (Iqbal *et al.*, 2009).

3.4.3. Emisi CO₂ dari Pengapuran

Pemberian kapur pertanian bertujuan untuk memperbaiki sifat tanah masam sehingga gangguan keseimbangan hara didalam tanah dapat diperbaiki dan meningkatkan ketersediaan unsur hara tanaman. Kegiatan pengapuran diperlukan dalam intensifikasi pertanian khususnya di lahan-lahan marjinal seperti di lahan masam. Kapur yang sering digunakan di lahan pertanian adalah dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) atau limestone (batu gamping) (CaCO_3). Penambahan karbonat limestone (CaCO_3) atau dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) yang diberikan ke dalam tanah akan larut dan melepaskan bikarbonat yang selanjutnya menjadi CO₂ dan H₂O (IPCC, 2006). Pemberian kapur pertanian secara berlebihan dapat menjadi sumber emisi CO₂ ke atmosfer (Robertson *et al.*, 2000). Pemberian kapur di tanah gambut dapat mempengaruhi produksi CO₂ karena dapat meningkatkan laju aktivitas mikroorganisme tanah sehingga meningkatkan laju dekomposisi. Pemberian kapur pertanian secara berlebihan dapat menjadi sumber emisi CO₂ ke atmosfer (Robertson *et al.*, 2000).



Gambar 8. Pemberian kapur pertanian
Sumber: cybex.pertanian.go.id

3.4.4. Emisi dari Pembakaran Biomassa

Membersihkan lahan dari sisa panen musim sebelumnya atau alih fungsi lahan dari semak belukar ke tanaman yang produktif dengan cara membakar merupakan budaya yang telah lama dilakukan karena merupakan praktek yang mudah dilakukan. Abu hasil pembakaran dipercaya mampu mengurangi tingkat keasaman tanah sehingga tanah menjadi lebih alkalis dan subur. Akan tetapi, pembakaran biomassa dari sisa-sisa tanaman merupakan salah satu sumber emisi GRK yang berasal dari pembakaran tidak sempurna seperti CH_4 , *Non-Methane Volatile Organic Compound* (NMVOC), nitrogen (seperti N_2O , NO_x), CO_2 , karbon-monoksida (CO) dan partikel-partikel hasil pembakaran yang bersifat karsinogenik yang dapat terdistribusi secara luas (Li *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2016). Gas dengan konsentrasi tinggi dari pembakaran biomassa secara langsung dan tidak langsung memberikan dampak terhadap terbentuknya lapisan kabut di sebagian besar daerah tropis dan di daerah subtropis, iklim lokal dan global, memburuknya kualitas udara dan kesehatan manusia (Eck *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2016). Pembakaran menghasilkan polusi udara yang membatasi ruang gerak dan menimbulkan gangguan kesehatan manusia seperti penyakit pernapasan, peningkatan pemanasan global, dan hilangnya komponen biotik pada areal yang dibakar.



Gambar 9. Pembakaran jerami sisa panen padi

Sumber: Investor.id

3.4.5. Emisi dari Perubahan Stok Karbon (C) pada Tanah Mineral - Emisi dari Dekomposisi Bahan Organik

Perubahan stok karbon pada tanah mineral menjadi sumber emisi GRK karena tanah merupakan komponen utama sumber emisi GRK dan sebagai penyerap karbon dari sektor pertanian. Potensi sumber emisi C dapat berasal dari penyimpanan C dalam jumlah besar di tanah yang tidak dikelola dengan baik. Kandungan C dalam tanah mineral yang sudah dikelola secara intensif umumnya terus mengalami penurunan, baik disebabkan oleh percepatan dekomposisi maupun terangkut melalui aliran permukaan serta erosi. Tanah terlibat dalam siklus biogeokimia C dan N. Menurut Lal (1995) sebagian C yang terangkut oleh aliran permukaan dan erosi juga bisa hilang teremisi.

Fluks GRK dan stok C di tanah sangat kompleks untuk diukur, bervariasi, dan heterogen karena dipengaruhi oleh iklim (misalnya, suhu, rejim kelembaban, deposit N), karakteristik tanah (misalnya, pH, kandungan liat, kapasitas tukar kation), dan untuk tanah yang dikelola oleh praktik pertanian atau kehutanan (misalnya, pengelolaan sisa tanaman dan kayu, pengolahan tanah, perbaikan tanah dan pupuk, irigasi). Faktor-faktor ini umumnya berinteraksi dan pengaruhnya terhadap stok SOC dan emisi GRK masih belum terkuantifikasi dengan baik (Eglin *et al.*, 2010; Fujisaki *et al.*, 2015). Selain itu, siklus C dan N terkait erat seperti misalnya peluruhan bahan organik dapat menghasilkan CO₂ tetapi juga N₂O melalui nitrifikasi dan/atau denitrifikasi heterotrofik (Zhang *et al.*, 2015).

3.4.6. Emisi dari Sub sektor Peternakan

Sub sektor peternakan merupakan salah satu sub sektor yang berkontribusi dalam peningkatan konsentrasi gas CH₄ yang berasal dari proses pencernaan (fermentasi enterik) dan dari proses oksidasi anaerobik kotoran ternak; dan peningkatan konsentrasi gas N₂O yang dihasilkan dari proses pengolahan kotoran ternak. Penyumbang terbesar emisi GRK dari sub-sektor peternakan adalah CH₄, N₂O, dan CO₂ dengan persentase berturut-turut sebesar 44%, 29%, dan 27% (Dlamini and Dube, 2014).

Pengelolaan ternak di Indonesia membedakan berbagai sistem produksi ternak, jenis ternak, dan berbagai sumber dan jenis pakan. Ketiga hal tersebut mempunyai pengaruh terhadap penentuan emisi GRK. Sapi potong di Indonesia sebagai kontributor utama emisi GRK dari fermentasi enterik mempunyai beragam bangsa dengan ukuran tubuh yang berbeda. Sapi potong lokal Indonesia yang dominan adalah sapi Bali, sapi PO dan Sapi Madura. Ketiganya memiliki ukuran tubuh kecil sampai sedang dibandingkan dengan bangsa sapi yang diimpor seperti Brahman cross dan Limousin. Perbedaan ukuran tubuh ini berkorelasi dengan jumlah emisi GRK yang dihasilkan. Semakin besar ukuran tubuh ternak, maka semakin besar emisi GRK nya.

Fermentasi enterik adalah bagian alami dari proses pencernaan pada ternak ruminansia seperti sapi, kambing, domba, dan kerbau yang berkorelasi positif dengan umur, berat hewan, kuantitas dan kualitas pakan yang dikonsumsi ternak dalam menghasilkan CH₄. Mikroba rumen memegang peranan penting dalam proses tersebut. Produksi gas CH₄ selama proses fermentasi pakan oleh mikroba dalam saluran pencernaan ternak ruminansia dipengaruhi oleh jenis dan kualitas pakan yang dikonsumsi ternak. Jenis pakan yang diberikan sangat beragam sumbernya, di antaranya yang berasal dari rumput yang dibudidayakan, limbah dari tanaman pangan, limbah dari tanaman perkebunan, dan lain sebagainya. Pakan dengan kandungan serat kasar yang tinggi dan tingkat pencernaan rendah berpotensi besar menghasilkan CH₄ yang tinggi (Purnomoadi *et al.*, 2002). Kondisi ini menunjukkan bahwa manipulasi jenis dan kualitas pakan yang diberikan kepada ternak dapat mempengaruhi produksi gas CH₄ dari fermentasi enterik (Gerber *et al.*, 2013).

Kotoran ternak padat dan cair berpotensi menghasilkan emisi CH₄ dan N₂O selama proses penyimpanan, pengolahan, dan penumpukan. Gas CH₄ yang dihasilkan dari kotoran ternak dihasilkan dari proses fermentasi kotoran ternak oleh mikroba yang disimpan dalam kondisi basah dan ditumpuk. Kotoran ternak yang disimpan di ladang dan padang rumput terus melepaskan sejumlah besar CH₄ karena dekomposisi anaerobik

bahan organik dalam pupuk kandang (Naqvi dan Sejian, 2010; Tauseef *et al.*, 2013). Emisi N_2O dari kotoran ternak utamanya berasal dari kotoran ternak yang dikandangkan dan kotoran yang melalui sistem penyimpanan kotoran; dari ternak yang digembalakan di penggembalaan padang rumput; dan emisi dari tanah pertanian dimana pupuk kandang diaplikasikan (Hou *et al.*, 2015). Emisi N_2O langsung (*direct*) dari kotoran ternak tergantung pada kandungan nitrogen dan karbon yang terkandung dalam kotoran itu sendiri, berapa lama waktu penyimpanan, dan tipe pengelolaan kotoran yang dilakukan. Sedangkan, emisi N_2O tidak langsung dihasilkan dari nitrogen *volatile* yang hilang dalam bentuk ammonia dan NO_x . Pada umumnya, emisi N_2O langsung dari manajemen ternak lebih besar dibandingkan emisi N_2O tidak langsung, dengan ternak sapi pedaging sebagai penghasil emisi tertinggi.

3.4.7. Emisi dari Tanah Gambut

Luas lahan gambut Indonesia sekitar 14,9 juta hektar (Ritung *et al.*, 2011). Dari luasan tersebut yang masih tersisa sebagai hutan sekitar 47,50%, perkebunan 12,37%, Hutan Tanaman Industri (HTI) 4,03%, lahan pertanian 4,85%, sawah 1,48%, semak belukar 20,26%, dan sisanya pertambangan, pemukiman, rawa, lahan terbuka (Wahyunto *et al.*, 2017). Dalam keadaan alami, hutan gambut merupakan penyimpan (*net sink*) dari karbon. Akan tetapi apabila hutan gambut dibuka, sebagian besar karbon yang ada pada biomassa tanaman akan teroksidasi menjadi CO_2 , terutama apabila pembukaan hutan disertai dengan pembakaran. Alih fungsi lahan pertanian di lahan gambut dikuatirkan akan meningkatkan emisi GRK akibat manipulasi lingkungan yang akan dilakukan pada ekosistem tersebut, dimana di dalamnya terkandung bahan organik dalam jumlah besar yang saat ini secara alami berada pada kondisi stabil selama ratusan bahkan ribuan tahun. Beberapa faktor pembatas yang dominan dari lahan gambut untuk pertanian adalah kondisi lahan yang jenuh air, bereaksi masam dan mengandung asam organik yang beracun serta status unsur hara rendah. Konsekuensi logis dari pemanfaatan lahan gambut untuk budidaya pertanian adalah

adanya pembuatan drainase, hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan kehilangan karbon terutama dalam bentuk: emisi CO₂ ke atmosfer, dan hanyutnya karbon terlarut (*disolved organic carbon*) bersama aliran air drainase yang keluar dari lahan gambut. Menurut Agus dan Subikse (2008), lahan gambut yang terganggu dan terpengaruh drainase, emisinya akan meningkat tajam, hal ini disebabkan karena meningkatnya aktivitas mikroba dan banyaknya bahan organik yang mudah terdekomposisi.

Pemanfaatan lahan gambut untuk pertanian sudah dilakukan sejak lama tetapi lahan gambut tropis memiliki keragaman sifat fisik dan kimia yang besar. Pemanfaatan lahan gambut untuk berbagai budidaya tanaman didahului dengan pengatusan (drainase) sampai kedalaman tertentu untuk meningkatkan ketersediaan oksigen bagi akar, supaya tanaman bisa tumbuh dan berkembang dengan baik. Pengaturan melalui saluran drainase atau kanal ini menyebabkan terjadinya penurunan muka air tanah dan diikuti oleh perubahan kondisi lingkungan pada lapisan dekat permukaan gambut. Oksigen akan mengisi pori-pori gambut yang telah ditinggalkan oleh air, sehingga menyebabkan proses oksidasi atau dekomposisi gambut meningkat. Dalam kondisi seperti ini, jelas bahwa konsekuensi logis dari pembuatan saluran drainase adalah terjadinya peningkatan kehilangan C terutama dalam bentuk emisi CO₂ dan C terlarut (*disolved organic carbon*).

BAB IV

PERSPEKTIF PERUBAHAN IKLIM DAN KOMITMEN INDONESIA

Nourma Al Viandari, Sarah, Miranti Ariani

4.1. Perkembangan Perjanjian Internasional Perubahan Iklim

Fenomena perubahan iklim dan pemanasan global terjadi akibat kenaikan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Kenaikan ini oleh para ahli diyakini mulai terjadi setelah era industrialisasi, yaitu sekitar tahun 1700 M (IPCC, 2013). Tepatnya ketika tahun 1712 seorang tukang pandai besi Inggris, Thomas Newcomen, menemukan mesin uap yang digunakan secara meluas dan membuka jalan ke arah Revolusi Industri serta penggunaan batu bara dalam skala industri. Sekitar satu abad kemudian, tepatnya tahun 1824, seorang Fisikawan Joseph Fourier menggambarkan apa yang disebutnya sebagai efek rumah kaca: "Suhu (bumi) bisa meningkat oleh interposisi atmosfer karena panas dari cahaya menghadapi hambatan lebih sedikit waktu memasuki udara dibanding saat memasuki udara ketika berubah menjadi panas cahaya." Pada tahun 1861 seorang fisikawan John Tyndall memperlihatkan uap air dan gas-gas tertentu lain menciptakan efek rumah kaca. Tahun 1896 seorang ahli kima Swedia, Svante Arrhenius, menyimpulkan bahwa pembakaran batu bara pada skala industri akan meningkatkan efek rumah kaca yang alami. (Sejarah Perubahan iklim, 2009)

Tahun 1900 seorang ilmuwan Swedia, Knut Angstrom, menemukan bukti bahwa dalam konsentrasi yang kecil sekalipun, CO₂ di atmosfer dengan kuat menyerap bagian dari spektrum infra merah. Meski pada saat itu dia tidak menyadari konsekuensinya, Angstrom menunjukkan bahwa jejak gas sekalipun bisa

berdampak buruk pada atmosfer. Pada tahun 1927 emisi karbon dari pembakaran minyak fosil tercatat mencapai 1 milyar ton per tahun. Tahun 1938 ditemukan bukti nyata adanya kenaikan suhu bumi seiring dengan kenaikan konsentrasi gas rumah di atmosfer berdasarkan catatan dari 147 stasiun cuaca di seluruh dunia. Seorang insinyur Inggris, Gyu Callendar, memperlihatkan bahwa suhu bumi meningkat dibanding satu abad sebelumnya. Dia juga menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ meningkat dalam periode yang sama dan menyimpulkan hal itu yang menyebabkan peningkatan suhu, namun teori ini ditolak oleh para ahli meteorologi. Sejak tahun tersebut, beberapa ahli yang percaya dengan teori dari Callendar, terus melakukan penelitian terkait gas rumah kaca, hingga pada tahun 1955 dengan menggunakan peralatan generasi baru, termasuk komputer, peneliti Amerika Serikat Gilbert Plass menganalisis secara rinci penyerapan infra merah dari berbagai gas. Dia memperkirakan ketika ada kenaikan dua kali lipat konsentrasi CO₂ maka akan meningkatkan suhu bumi sekitar 3-4°C. Tahun 1957 ahli kelautan, Roger Revelle, dan ahli kimia, Hans Suess, memperlihatkan bahwa air laut tidak akan menyerap semua kenaikan CO₂ yang masuk ke atmosfer, seperti yang diasumsikan oleh banyak ahli. Tahun 1958 Charles David Keeling, seorang ahli meteorologi, menggunakan peralatan yang dikembangkan sendiri untuk mengamati dan menghitung secara sistematis konsentrasi CO₂ di atmosfer di daerah Mauna Loa, Hawaii, dan Antartika. Dalam waktu 4 tahun, proyek tersebut yang masih diteruskan sampai sekarang memberikan bukti yang jelas bahwa konsentrasi CO₂ meningkat. (Sejarah Perubahan Iklim, 2009)

Tahun 1972 PBB menyelenggarakan Konferensi Lingkungan PBB yang pertama di Stockholm. Perubahan iklim belum masuk dalam agenda pertemuan ini. Salah satu keputusan pertemuan adalah membentuk Program Lingkungan PBB, UNEP. Tahun 1975 menjadi titik tolak mulai dikenalnya istilah pemanasan global ketika seorang ilmuwan Amerika, Wallace Broecker, mengangkat istilah pemanasan global ke dalam khasanah umum lewat judul dari tulisan ilmiahnya. Tahun 1988 akhirnya disepakati terbentuknya sebuah Panel Antara Pemerintah untuk Perubahan Iklim (IPCC/*Intergovernmental Panel on Climate Change*) guna mengkaji dan mengumpulkan

bukti-bukti tentang perubahan iklim dan pemanasan global. Tahun 1989 dalam pidatonya pada pertemuan tingkat tinggi di PBB Perdana Menteri Inggris, Minister Margaret Thatcher yang juga sarjana kimia memperingatkan bahwa jumlah karbon dioksida yang memasuki atmosfer mengalami peningkatan pesat. Dia juga menyerukan adanya sebuah traktat global tentang perubahan iklim. Pada tahun tersebut juga tercatat emisi karbon dari bahan bakar fosil dan industri mencapai 6 milyar ton per tahun. Setelah melakukan kajian selama kurang lebih 2 tahun lamanya, pada tahun 1990 IPCC mengeluarkan Laporan Kajian Pertama (*First Assesment Report*), yang menyimpulkan suhu meningkat sekitar 0,3-0,6°C dalam satu abad terakhir. Laporan itu juga menyebutkan emisi yang dihasilkan manusia (*anthropogenic emissions*) telah menambah gas rumah kaca alami dan penambahan itu akan menyebabkan kenaikan suhu bumi. (Sejarah Perubahan Iklim, 2009)

Tahun 1992 dalam KTT Bumi di Rio de Janeiro, sejumlah pemerintah Negara-negara di dunia menyepakati dibentuknya Konvensi Kerangka Bersama dalam Perubahan Iklim (UNFCCC/*United Nation Convention on Climate Change*). Untuk menjalankan tujuan Konvensi, UNFCCC membentuk badan pengambilan keputusan tertinggi yang disebut Pertemuan Para Pihak (*Conference of the Parties/COP*). Pertemuan Para Pihak berperan dalam mengkaji, memantau pelaksanaan Konvensi dan kewajiban para Negara Pihak. Fungsi dari Pertemuan Para Pihak adalah mengkaji pelaksanaan konvensi, memantau pelaksanaan kewajiban para Pihak sesuai tujuan konvensi, mempromosikan dan memfasilitasi pertukaran informasi, membuat rekomendasi kepada Para Pihak, dan mendirikan badan-badan pendukung jika dipandang perlu. Otoritas pengambilan keputusan tertinggi di bawah UNFCCC dilaksanakan melalui COP/CMP yang merupakan pertemuan tahunan Para Pihak dibawah UNFCCC dan *Conferences of the Parties serving as meeting of parties* (CMP). Pertemuan COP/CMP didukung oleh 2 (dua) badan yaitu Badan Pendukung terkait dengan aspek ilmiah dan teknologi atau *Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice* (SBSTA) dan Badan Pendukung Untuk Pelaksanaan Konvensi atau *Subsidiary Body for Implementation* (SBI). SBSTA memberikan informasi dan rekomendasi ilmiah serta teknologis secara tepat waktu kepada

COP, sedangkan SBI membantu COP mengkaji pelaksanaan dari Konvensi. Konvensi Perubahan Iklim berkekuatan hukum sejak 21 Maret 1994, dimana negara-negara yang meratifikasi Konvensi dibagi dalam 2 (dua) kelompok, yaitu Negara Annex I dan Negara Non-Annex I. Negara Annex I adalah negara-negara penyumbang emisi GRK sejak revolusi industri. Sedangkan Negara Non-Annex I adalah negara-negara yang tidak termasuk dalam Annex I yang kontribusinya terhadap emisi GRK jauh lebih sedikit dan memiliki pertumbuhan ekonomi yang jauh lebih rendah. Pemerintah Indonesia telah meratifikasi Konvensi Perubahan Iklim melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 1994 tentang Pengesahan *United Nations Framework Convention on Climate Change* dan termasuk dalam negara Non-Annex I. Dengan demikian Indonesia secara resmi terikat dengan kewajiban dan memiliki hak untuk memanfaatkan berbagai peluang dukungan yang ditawarkan UNFCCC atau Kerangka Kerja PBB dalam upaya mencapai tujuan konvensi tersebut (Climate summits, n.d.)

Tahun 1995 IPCC merilis Laporan Kajian Kedua yang menyimpulkan bukti-bukti yang cukup tentang pengaruh manusia yang terlibat atas berubahnya iklim bumi. Kesimpulan ini disebut sebagai pernyataan tegas bahwa manusia bertanggungjawab atas perubahan iklim. Sidang ketiga Konferensi Para Pihak (*Third Session of the Conference of Parties, COP-3*) yang diselenggarakan di Kyoto, Jepang, tahun 1997, menghasilkan keputusan (Decision 1/CP.3) untuk mengadopsi Protokol Kyoto untuk Konvensi kerangka PBB tentang Perubahan Iklim. Protokol Kyoto merupakan dasar bagi negara-negara industri untuk mengurangi emisi gas rumah kaca gabungan mereka paling sedikit 5 persen dari tingkat emisi tahun 1990 menjelang periode 2008-2012. Komitmen yang mengikat secara hukum ini, menempatkan beban pada negara-negara maju, dengan berdasarkan pada prinsip *common but differentiated responsibilities (CBDR)*. Pada Protokol Kyoto ini kita kemudian mengenal istilah-istilah *Joint Implementation, Emission Trading* dan *Clean Development Mechanism (CDM)*. Istilah-istilah tersebut merupakan mekanisme untuk mengatur penurunan emisi GRK yang akan dilaksanakan oleh negara-negara maju, yakni: *Joint Implementation (JI)* merupakan mekanisme penurunan emisi dimana negara-negara Annex I dapat mengalihkan pengurangan emisi melalui proyek

bersama dengan tujuan mengurangi emisi GRK. *Emission Trading (ET)* merupakan mekanisme perdagangan emisi yang dilakukan antar negara industri, dimana negara industri yang emisi GRK-nya di bawah batas yang diizinkan dapat menjual kelebihan jatah emisinya ke negara industri lain yang tidak dapat memenuhi kewajibannya. *Clean Development Mechanism (CDM)* merupakan mekanisme penurunan emisi GRK dalam rangka kerja sama negara industri dengan negara berkembang. Mekanisme ini bertujuan agar negara Annex I dapat mencapai target pengurangan emisi melalui program pengurangan emisi GRK di negara berkembang. Indonesia telah melakukan ratifikasi Protokol Kyoto melalui Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2004 tentang Pengesahan *Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change* (Protokol Kyoto atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan). Dengan meratifikasi Protokol Kyoto, Indonesia dapat berpartisipasi melalui salah satu mekanisme Protokol Kyoto yaitu Mekanisme Pembangunan Bersih atau *Clean Development Mechanism (CDM)* (Climate summits, n.d.)

Tahun 2001, IPCC merilis Laporan Kajian Ketiga yang menemukan bukti baru yang lebih kuat bahwa emisi gas rumah kaca yang dihasilkan manusia merupakan penyebab utama dari pemanasan bumi yang terjadi dalam paruh kedua abad 20. Tahun 2005 Protokol Kyoto dinyatakan resmi menjadi undang-undang internasional bagi negara yang mensahkannya. Tahun 2006 tercatat bahwa emisi karbon dari pembakaran minyak fosil dan industri mencapai 8 milyar ton per tahun. Tahun 2007, IPCC merilis Laporan Kajian Keempat yang kembali menyebutkan peran kegiatan manusia sebagai penyumbang emisi gas rumah kaca. Pada laporan tersebut disebutkan bahwa lebih dari 99% emisi yang dihasilkan manusia menyebabkan perubahan iklim pada jaman modern. Pada tahun yang sama, IPCC bersama mantan Wakil Presiden AS Al Gore menerima Hadiah Nobel Perdamaian karena jasa mereka dalam membangun dan menyebarluaskan pengetahuan tentang perubahan iklim yang disebabkan manusia serta meletakkan dasar bagi langkah-langkah yang dibutuhkan untuk menangani perubahan itu (Climate summits, n.d.)

Pasca COP 3 di Kyoto tahun 1997, baru pada pertemuan COP-13 tahun 2007 di Bali, Indonesia, perundingan terkait

perubahan iklim menghasilkan kesepakatan baru yaitu *Bali Action Plan*, yang diantaranya menyepakati *pembentukan The Ad Hoc Working Group on Long-term Cooperative Action under the Convention (AWG- LCA)*. AWG-LCA bertujuan mengefektifkan kerangka kerjasama jangka panjang sampai dengan tahun 2012 dan setelah tahun 2012. Pada Tahun 2008 setengah abad sejak dimulainya pengamatan di Mauna Loa, Proyek Keeling memperlihatkan konsentrasi CO₂ meningkat dari 315 partikel per juta (ppm) pada 1958 menjadi 380 ppm di 2008. Tahun 2009, perwakilan dari 192 pemerintah menghadiri Pertemuan Puncak Perubahan Iklim PBB yang ke-15 di Kopenhagen, Denmark. Pertemuan ini menghasilkan kesepakatan yang dikenal dengan sebutan *Copenhagen Accord (CA)*. Hasil penting yang ada di dalam CA antara lain adalah adanya komitmen Negara-negara maju untuk memberikan pendanaan iklim jangka panjang yang berada dibawah mekanisme *Green Climate Fund (GCF)*. Pada COP 16 di Cancun, Mexico tahun 2010 menghasilkan kesepakatan yang tertuang dalam *Cancun Agreement* atau Perjanjian Cancun. Perjanjian Cancun berhasil menyediakan kerangka kerja untuk beberapa komponen penting dalam upaya mengatasi perubahan Iklim, salah satunya adalah mekanisme REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation, carbon stock enhancement and forest conservation*). Perjanjian Cancun memberi kerangka kuat bagi masuknya hutan hujan tropis dalam agenda utama penanganan perubahan Iklim, melalui skema REDD+, adaptasi, konservasi dan peningkatan cadangan karbon hutan dan pengelolaan hutan berkelanjutan (Climate summits, n.d.)

Tahun 2011 pada COP 17 di Durban, Afrika selatan menghasilkan kesepakatan pembentukan sebuah platform negosiasi baru yaitu *Ad Hoc Working Group on Durban Platform for Enhanced Action (ADP)*. Platform baru dibawah Konvensi dimaksudkan dapat menyepakati protokol emisi GRK yang baru dan universal pada tahun 2015 (setelah periode berakhirnya fase kedua dari Protokol Kyoto) dan berlaku pada periode setelah 2020. Track negosiasi ini mencakup diantaranya mencari cara dan kesepakatan untuk meningkatkan lebih lanjut aksi penurunan emisi GRK di tingkat nasional dan internasional. yang dikenal sebagai *Durban Platform*. COP 18 yang diselenggarakan di Doha, Qatar pada tahun 2012 dinilai tidak membawa hasil karena

Negara-negara maju belum sepenuhnya berpartisipasi pada kesepakatan fase kedua dari Protokol Kyoto. Tahun 2013 perhelatan COP 19 diselenggarakan di Warsaw, Polandia. Beberapa keputusan penting yang berhasil disepakati, antara lain mengenai penajaman rencana kerja menuju kesepakatan 2015, *the Warsaw Framework for REDD+*, *the Warsaw International Mechanism for Loss and Damage*, dan yang terkait dengan peningkatan dan penyaluran pendanaan perubahan iklim (Climate summits, n.d.)

COP 21 di Paris tahun 2015 merupakan titik puncak dihasilkannya kesepakatan baru pasca Protokol Kyoto. Kesepakatan tersebut dikenal dengan sebutan Paris Agreement atau Perjanjian Paris. Kesepakatan tersebut telah dipersiapkan sejak COP 17 di Durban. Pada pertemuan ini Negara Pihak telah menyepakati untuk mengadopsi serangkaian keputusan (*decisions*) di antaranya *Decision 1/CP.21 on Adoption of the Paris Agreement* sebagai hasil utama. Perjanjian Paris mencerminkan kesetaraan dan prinsip tanggung jawab bersama yang dibedakan sesuai kapabilitas (*Common but Differentiated Responsibilities and Respected Capabilities*) Negara Pihak, dengan mempertimbangkan kondisi nasional yang berbeda-beda. Perjanjian Paris bertujuan untuk menahan peningkatan suhu rata-rata global jauh dibawah 2°C di atas tingkat di masa pra-industrialisasi dan melanjutkan upaya untuk menekan kenaikan temperatur ke 1,5°C diatas tingkat pra-industrialisasi. Selain itu, Perjanjian Paris diarahkan untuk meningkatkan kemampuan adaptasi terhadap dampak negatif perubahan iklim, menuju ketahanan iklim dan pembangunan rendah emisi, tanpa mengancam produksi pangan, dan menyiapkan skema pendanaan untuk menuju pembangunan rendah emisi dan berketahanan iklim. Perjanjian Paris di mana *Nationally Determined Contributions (NDCs)* menjadi sebagai bagian penting dari komitmen pasca 2020. Perjanjian Paris mulai berlaku pada 4 November 2016, diratifikasi oleh 187 negara. Indonesia meratifikasi Perjanjian Paris melalui UU 16/2016. Selain itu, negara pihak juga berkewajiban untuk, antara lain: mengestimasi puncak emisi, merencanakan tindakan-tindakan mitigasi yang akan dilakukan secara domestik, mengomunikasikan NDC setiap 5 tahun, meningkatkan ambisi NDC, mempromosikan integritas lingkungan, transparansi,

akurasi, dan kelengkapan, keterbandingan dan konsistensi, dan memastikan penghindaran terhadap perhitungan ganda, dan memformulasikan serta mengomunikasikan pembangunan rendah emisi gas rumah kaca jangka panjang. Berikut ini infograsif yang menggambarkan perjalanan panjang pertemuan perubahan iklim di dunia dan kesepakatan-kesepakatan penting yang dihasilkan.

Tahun 2018 pada COP 24 yang diselenggarakan di Katowice, Polandia menghasilkan kesepakatan yang tertuang dalam *Katowice Rulebook*. Rulebook ini berisi panduan dalam pencapaian target yang ada dalam *Paris Agreement*. *Katowice Rulebook* mencakup panduan untuk mengoperasionalkan kerangka transparansi, menetapkan bagaimana negara-negara akan memberikan informasi tentang kontribusi nasional dalam mengurangi emisi karbon atau *Nationally Determined Contributions* (NDC) (Konvensi Perubahan Iklim, n.d). Berbagai konferensi perubahan iklim dan kesepakatan penting yang telah dihasilkan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konferensi perubahan iklim dan kesepakatan penting yang dihasilkan

No	Kegiatan	Tahun	Lokasi
1	UNFCCC	1992	
2	COP3 - Kyoto Protocol: Emission reduction	1997	Kyoto
3	COP13 - Bali road map	2007	Bali
4	COP15 - Copenhagen Agreement	2009	Copenhagen
5	COP16 - Cancún Agreement	2010	Cancún
6	COP17 - Durban Platform	2011	Durban
7	COP18 - Doha Amendment	2012	Doha
8	COP19 - International Warsaw Mechanism	2013	Warsaw
9	COP20 - Contributions for A Global Agreement	2014	Lima
10	COP21 - Paris Agreement	2015	Paris
11	COP 22 - Marrakesh Partnership	2016	Marrakesh
12	COP23 - Held in Bonn	2017	Fiji
13	COP24 - Katowice Rulebook	2018	Katowice
14	COP25 - Held in Madrid	2019	Chile

Sumber: Iberdrola.com

Tahun 2021 IPCC kembali merilis laporan kajian yang keenam (*Sixth Assesment Report*) yang menunjukkan, emisi gas rumah kaca hasil aktivitas manusia bertanggung jawab atas peningkatan suhu bumi sebesar 1,1 °C sejak masa pra-industri

atau dalam periode 1850-1900. IPCC menyatakan, dalam 20 tahun ke depan, kenaikan suhu global ini diperkirakan akan mencapai atau melebihi 1,5°C. Dalam laporan ini, para ahli mengungkapkan bahwa aktivitas manusia, mempengaruhi semua komponen sistem iklim utama selama beberapa dekade dan sistem iklim lainnya selama berabad-abad. Bukti yang mengaitkan dampak aktivitas manusia terhadap cuaca ekstrem seperti gelombang panas, curah hujan lebat, kekeringan, dan siklon tropis semakin kuat. Bukti-bukti ini termasuk peningkatan frekuensi dan intensitas panas dan curah hujan ekstrem, gelombang panas laut, kekeringan, peningkatan intensitas siklon tropis; serta berkurangnya lapisan es di laut Arktika, tutupan salju, dan permafrost. Dan tidak hanya soal peningkatan suhu. Perubahan iklim juga mempercepat siklus air memicu peningkatan curah hujan dan banjir, serta kekeringan yang lebih intens di berbagai wilayah. Selain itu, kenaikan permukaan laut sepanjang abad ke-21 akan menyebabkan banjir serta erosi yang lebih sering dan parah di wilayah pesisir dan wilayah berdataran rendah. Para ahli memperingatkan, kota-kota di wilayah pesisir menjadi wilayah yang rentan panas, banjir akibat hujan lebat dan kenaikan permukaan laut (IPCC, 2021).

4.2. Komitmen Indonesia terkait Perubahan Iklim

Sejak meratifikasi Protokol Kyoto melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 1994, maka Indonesia secara resmi terikat dengan kewajiban dan memiliki hak untuk memanfaatkan berbagai peluang dukungan yang ditawarkan *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) atau Kerangka Kerja PBB dalam upaya mencapai tujuan konvensi tersebut. Salah satu kewajiban ialah membangun, memutakhirkan secara periodik, dan menyediakan inventarisasi emisi nasional menurut sumber (*source*) dan rosot (*sink*) untuk semua jenis gas yang tidak diatur dalam Protokol Montreal, dengan menggunakan metodologi yang dapat diperbandingkan yang disetujui oleh para pihak penandatanganan konvensi (IPCC, 2006).

Untuk itu pemerintah telah mengeluarkan Peraturan Presiden (PERPRES) No. 61/2011, tentang rencana aksi nasional

penurunan emisi GRK (RAN-GRK), yang menindaklanjuti kesepakatan *Bali Action Plan pada The Conferences of Parties (COP) ke-13 United Nations Frameworks Convention on Climate Change (UNFCCC)* dan hasil COP-15 di Copenhagen dan COP-16 di Cancun. Selanjutnya diterbitkan pula Perpres 71/2011 yang mengenai mengatur tata cara penyelenggaraan inventarisasi (Pemantauan, Evaluasi dan Pelaporan, PEP/MRV) GRK Nasional. Program ini didukung juga melalui moratorium pembukaan lahan yang diatur melalui Inpres No. 10/2011 tentang Penundaan Pemberian Izin Baru dan Penyempurnaan Tata Kelola Hutan Alam Primer dan Lahan Gambut hingga tahun 2013. Upaya penurunan emisi dari deforestasi dan degradasi hutan ini diperpanjang melalui Inpres No.6/2013. Dalam Inpres ini disebutkan bahwa pemerintah melanjutkan penundaan pemberian izin baru hutan alam primer dan lahan gambut yang berada di hutan konservasi, hutan lindung, hutan produksi, dan area penggunaan lain hingga dua tahun ke depan.

Rencana Aksi Nasional penurunan emisi Gas Rumah Kaca dikembangkan untuk mencapai target nasional, target sektoral, acuan dan aksi prioritas untuk mitigasi perubahan iklim semua sektor yang memproduksi emisi. RAN-GRK berfungsi sebagai sebuah panduan kebijakan pemerintah pusat pada tahun 2010-2020 dan sektor-sektor yang terkait untuk mengurangi emisi sebanyak 26% dan 41% jika mendapat bantuan internasional. RAN GRK terdiri atas kegiatan-kegiatan inti dan kegiatan-kegiatan pendukung untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan target pada setiap sektor. Sektor-sektor utama pada RAN GRK adalah kehutanan dan lahan gambut, pertanian, energi dan transportasi, industri, dan pengelolaan sampah. Pembangunan berkelanjutan di tingkat regional tidak dapat dicapai jika emisi-emisi yang diakibatkan oleh perubahan iklim tidak diatasi secara tepat.

RAN-GRK menganjurkan perlunya untuk membuat RAD-GRK sebagai dokumen kerja yang menjadi dasar untuk pemerintah daerah, masyarakat dan swasta untuk melaksanakan aktivitas-aktivitas langsung dan tidak langsung yang bermaksud untuk mengurangi emisi GRK pada kurun waktu 2010-2020 dan mengacu kepada rencana pembangunan daerah. Sebagaimana

telah disebutkan, pasal 2 dan ayat 2 RAN-GRK mengamanatkan bahwa RAN-GRK adalah dasar bagi pemerintah, pemerintah daerah, masyarakat dan sektor bisnis di dalam merencanakan, melaksanakan, mengawasi dan mengevaluasi RAD-GRK. Sesuai amanat Pemerintah Republik Indonesia kepada Pemerintah Daerah yang tertuang dalam Rancangan Peraturan Presiden (Perpres) tentang Rencana Aksi Nasional Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN GRK) pada tahun 2010, khususnya pasal 8 ayat 1, yang meminta Pemerintah Provinsi untuk menyusun Rencana Aksi Daerah dalam upaya untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca yang terjadi di daerah (dokumen perencanaan RAD GRK).

Penyusunan dokumen RAD GRK akan mengacu pada proses dan substansi sektoral yang terdapat di dalam dokumen RAN GRK (*top-down approach*), selain juga akan mempertimbangkan karakteristik dan potensi emisi daerah, kewenangan administrasi dan sektoral daerah, serta prioritas pembangunan daerah (*bottom-up*). Pemerintah daerah dapat berperan serta dalam pengurangan emisi GRK dalam konteks pembangunan berkelanjutan di daerah mereka. Ini dapat dicapai melalui perencanaan strategis, pembuatan konsensus dan peran koordinasi. Pemerintah daerah dapat mendorong keterlibatan publik dan swasta untuk meningkatkan kesadaran dan kepedulian terhadap dampak perubahan iklim. Untuk dapat mengurangi emisi pada tingkat lokal, penting bagi pemerintah lokal untuk memiliki Rencana Aksi Daerah-Gas Rumah Kaca atau disingkat RAD-GRK. Setiap provinsi yang membuat RAD-GRK dapat merumuskan kegiatan pengurangan emisi GRK sampai dengan tahun 2020. Mulai tahun 2020, RAN-GRK kemudian bertransformasi menjadi program *Low Carbon Development Indonesia (LCDI)*, dengan arah tujuan yang selaras dengan RAN-GRK.

Sebagai amanat Perpres No. 71/2011 tentang penyelenggaraan inventarisasi gas rumah kaca nasional, setiap sektor yang mempunyai tanggung jawab untuk menurunkan emisi sesuai Perpres No. 61/2011 melaporkan emisi eksistingnya dan perkembangan capaian penurunan emisinya. Hal ini selaras dengan amanat Konvensi yaitu menyusun laporan mengenai

kondisi emisi di tiap Negara setiap empat tahun sekali yang disebut *National Communication* atau Laporan Komunikasi Nasional, sampai saat ini Indonesia telah menyelesaikan laporannya sampai pada *Third National Communication*. Laporan komunikasi nasional ini juga berisi informasi lain yaitu deskripsi tentang langkah-langkah yang diambil untuk mencapai tujuan konvensi meliputi upaya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim, dan informasi lainnya yang relevan dengan pencapaian tujuan konvensi.

Komitmen dan kontribusi Indonesia kembali ditunjukkan dengan meratifikasi Perjanjian Paris di New York pada tanggal 22 April 2016, Indonesia menandatangani Perjanjian Paris di New York. Sebagai negara peratifikasi, Indonesia berkomitmen untuk melakukan upaya menurunkan emisi gas rumah kaca dan bergerak aktif mencegah terjadinya perubahan iklim. Perjanjian Paris juga memposisikan hutan sebagai kunci dari upaya penurunan gas rumah kaca. Hal ini mengingat kemampuan hutan menyerap gas rumah kaca. Posisi ini tersirat dari ketentuan pasal 5 *Paris Agreement* yang mendorong negara-negara pihak untuk menerapkan dan mendukung kerangka kerja berdasarkan perjanjian untuk kegiatan-kegiatan terkait *reducing emission from deforestation and forest degradation* dan konservasi serta pengelolaan hutan yang didasarkan pada prinsip keberlanjutan.

Pemerintah Indonesia juga telah menerbitkan Undang-Undang No 16 tahun 2016 tentang Ratifikasi Perjanjian Paris. Pemerintah Indonesia dengan 9 (sembilan) aksi prioritas pembangunan nasional yang dituangkan melalui Nawa Cita merupakan komitmen nasional menuju arah pembangunan rendah karbon dan berketahanan iklim, dengan adaptasi dan mitigasi perubahan iklim sebagai satu prioritas yang terintegrasi dan lintas-sektoral dalam agenda Pembangunan Nasional. Komitmen yang tertuang dalam Nawa Cita menjadi dasar bagi penyusunan dokumen the *First Nationally Determined Contribution* (NDC) Indonesia yang telah disampaikan kepada UNFCCC pada bulan November 2016. *First NDC* Indonesia menguraikan transisi Indonesia menuju masa depan yang rendah emisi dan berketahanan iklim.

NDC dipergunakan sebagai salah satu acuan pelaksanaan komitmen mitigasi perubahan iklim dengan rencana penurunan emisi hingga tahun 2030 sebesar 29% sampai dengan 41% bila dengan dukungan internasional, dengan proporsi emisi masing-masing sektor yang meliputi: kehutanan (17.2%), energi (11%), pertanian (0.32%), industri (0.10%), dan limbah (0.38%) (NDC, 2021). Selain itu, Indonesia juga berkomitmen untuk mencapai Net-Zero Emission pada tahun 2060 atau lebih cepat seperti tercantum dalam dokumen *Long-Term Strategies for Low Carbon and Climate Resilience 2050* (LTS-LCCR 2050). Berdasarkan perhitungan LTS-LCCR 2050, Indonesia mampu mengurangi emisi hingga 50% dari kondisi business-as-usual, terutama dengan dukungan Internasional.

Sedangkan untuk adaptasi, komitmen Indonesia meliputi peningkatan ketahanan ekonomi, ketahanan sosial dan sumber penghidupan, serta ketahanan ekosistem dan lansekap. Dalam upaya tersebut, sesuai dengan kewajiban/komitmen negara, telah direncanakan NDC upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim sebagai aksi yang terintegrasi untuk membangun ketahanan dalam menjaga sumber daya pangan, air, dan energi. Sebagai langkah tindak lanjut dari Kesepakatan Paris ini, maka tiap Negara yang meratifikasinya harus menyusun laporan dua tahunan (*Biennial Update Report*) yang berisi tentang aksi-aksi mitigasi yang telah dilakukan dan capaian penurunan emisinya terhadap skenario emisi *business as usual*. Hingga saat ini, Indonesia telah menyusun dan melaporkan sampai Laporan BUR yang kedua.

Dalam konteks nasional, pengendalian perubahan iklim merupakan amanat konstitusi. Dalam diskusi internasional pun, ditegaskan bahwa upaya pengendalian perubahan iklim dilakukan dengan mempertimbangkan *national circumstances* (termasuk kondisi dan kapasitas Negara) dan kedaulatan (*sovereignty*) Negara. Negara memberikan arah dan berkewajiban memastikan agar pembangunan yang dibutuhkan untuk memenuhi kesejahteraan rakyat tetap memperhatikan perlindungan aspek lingkungan dan sosial. Dengan adanya kesadaran akan ancaman dari dampak-dampak negatif perubahan iklim, semestinya pengendalian dan penanganan perubahan iklim bukan merupakan

suatu beban bagi Negara, namun sudah saat menjadi suatu kebutuhan.

Dalam kerangka kerja perubahan iklim internasional, ada target global yang telah menjadi kesepakatan bersama di antara bangsa-bangsa dan dicanangkan secara resmi dalam Perjanjian Paris (*Paris Climate Agreement*) pada COP21 UNFCCC di Paris, Desember 2015; yaitu menekan kenaikan suhu permukaan bumi tidak lebih dari 2°C dari masa pra-industrialisasi, dan mengupayakan untuk lebih menekan kenaikan suhu permukaan global hingga 1,5°C. Dengan adanya ambisi internasional yang telah menjadi kesepakatan bersama ini, Indonesia memperkuat komitmennya untuk melaksanakan aksi-aksi mitigasi perubahan iklim dan berkontribusi dalam pencapaian target penurunan emisi GRK global, sesuai dengan kondisi dan kapasitas nasional. Indonesia sebagai negara berkomitmen untuk melaksanakan kewajiban sebagai bagian dari komunitas internasional, dan terlebih lagi, untuk melaksanakan amanat konstitusi, agar negara hadir dalam menghadapi tantangan masa depan (termasuk tantangan perubahan iklim), menyediakan lingkungan yang sehat dan tahan iklim. Komitmen ini kembali diperbarui dengan diterbitkannya Peraturan Presiden No 98/2021 tentang Nilai Ekonomi Karbon dan didalamnya mengatur tentang pasar karbon. Ketentuan dan skema pembiayaan serta investasi di dalam Perpres tersebut diharapkan mampu mendukung pencapaian target pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) di Indonesia sebagaimana tercantum dalam dokumen NDC untuk pengendalian perubahan iklim. Dalam Perpres tersebut ada beberapa mekanisme perdagangan karbon yang diatur, yaitu perdagangan antara dua pelaku usaha melalui *skema cap and trade*, pengimbangan emisi melalui *skema carbon off set*, pembayaran berbasis kinerja (*result based payment*), dan pungutan atas karbon, serta kombinasi dari skema yang ada.

Salah satu sektor yang berkewajiban untuk menurunkan emisinya yaitu sektor pertanian. Pertanian merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca yang signifikan karena menyumbang sekitar 13% dari emisi antropogenik global. CH₄ dan N₂O merupakan dua gas rumah kaca utama yang dihasilkan dari

kegiatan terkait pertanian. Gas-gas ini menyumbang sekitar 60% dan 38% dari total emisi GRK global (IPCC, 2013; Zhao *et al.*, 2019). Lebih lanjut, CH₄ dan N₂O dianggap bertanggung jawab atas kenaikan suhu bumi karena potensi pemanasan globalnya dalam Laporan Kajian Kelima IPCC masing-masing adalah 28 dan 265 kali lebih besar dari CO₂ (IPCC, 2014). Angka ini kemudian diperbarui dalam Laporan Kajian Keenam IPCC yaitu menjadi sebesar 27,2 dan 273 (IPCC, 2021). Untuk memenuhi kewajiban pelaporan inventarisasi emisi dan capaian mitigasinya sesuai dengan prinsip *Clarity, Tranparancy* dan *Understanding* (CTU) dalam pelaporan emisi GRK, maka metodologi yang digunakan juga harus jelas dan transparan. Dalam melakukan perhitungan untuk pelaporan status emisi GRK, Indonesia berpegang pada pedoman yang telah disusun dan disepakati oleh Para Pihak melalui IPCC yang diterbitkan pada tahun 2006 dan diperbarui terakhir tahun 2019. Perhitungan status emisi GRK untuk Sektor Pertanian Indonesia dan aksi mitigasi yang telah dilakukan akan diuraikan dalam pokok bahasan selanjutnya.

4.3. Pendekatan Perhitungan Emisi GRK Sektor Pertanian di Indonesia

Pedoman perhitungan emisi GRK secara internasional tertuang pada IPCC dengan bab *Agriculture, Forestry, and Other Land Use* (AFOLU), dan pedoman ini pula yang digunakan dalam perhitungan status emisi GRK Sektor Pertanian Indonesia. Secara garis besar, perhitungan emisi GRK merupakan hasil perkalian dari data aktivitas dan faktor emisi sehingga dua faktor tersebut menjadi faktor penentu dalam perhitungan emisi GRK. Data aktivitas berasal dari data lapang yang dikumpulkan. Data aktivitas merupakan data mengenai kegiatan maupun aktivitas yang dapat mempengaruhi penurunan maupun serapan GRK. Faktor emisi merupakan koefisien yang menunjukkan banyaknya emisi per unit aktivitas.

$$\text{Total Emisi} = \text{Data Aktivitas (A)} \times \text{Faktor Emisi (EF)}$$

Kementerian Pertanian melalui Badan Litbang Pertanian telah menerbitkan pedoman mengenai metode perhitungan mitigasi maupun serapan GRK di sektor pertanian Agus (2019). Buku tersebut membahas mengenai pendekatan dan metode yang digunakan dalam perhitungan emisi maupun serapan pada sektor pertanian. Berdasarkan IPCC (2006), terdapat beberapa kegiatan pertanian yang dapat menjadi sumber emisi GRK, di antaranya: sistem pertanian lahan sawah, aktivitas pemupukan, pembakaran lahan, penggunaan kapur, dan juga peternakan. Adapun pendekatan perhitungan emisi GRK di sektor pertanian adalah sebagai berikut:

4.3.1. Sistem budidaya lahan sawah

Sawah dengan kondisi tergenang menjadi salah satu kontributor gas CH₄. Kondisi tergenang menciptakan kondisi anaerob. Faktor lain yang mempengaruhi pembentukan CH₄ dalam budidaya padi sawah yaitu kultivar tanaman padi (Setyanto *et al.* 2004). Oleh karena itu, umur varietas sangat berpengaruh terhadap emisi yang dikeluarkan. Data aktivitas lain yang digunakan dalam perhitungan emisi yaitu luas lahan padi.

Dikutip berdasarkan Agus (2019), di bawah merupakan perhitungan emisi GRK di lahan sawah

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

Perhitungan Faktor Emisi sebagai berikut:

$$FE_{i,j,k} = FE_c \times SF_w \times SF_p \times Sfo \times SF_s \times SF_r$$

CH ₄ padi	: emisi CH ₄ dari lahan sawah (Gg CH ₄ tahun ⁻¹)
FE _{ijk}	: faktor emisi dari pada kondisi tertentu (kg CH ₄ ha ⁻¹ hari ⁻¹)
T _{ijk}	: periode tanam pada saat kondisi tertentu (hari)
A _{ijk}	: luas panen lahan sawah kondisi tertentu (ha tahun ⁻¹)

- i, j, dan k : merepresentasikan kondisi lahan dengan ekosistem berbeda, kondisi pengaturan air, jenis dan tipe bahan organik dan kondisi lainnya yang mempengaruhi terbentuknya emisi CH_4
- FEC : faktor emisi baseline untuk padi sawah dengan irigasi terus-menerus dan tanpa pengembalian bahan organik, menggunakan Tier 2 yaitu $1,61 \text{ kg ha}^{-1} \text{ hari}^{-1}$
- SFw : faktor skala berbagai tipe pengairan merupakan faktor skala pengairan irigasi dengan penggenangan terus menerus sebesar 1 (satu)
- SFp : faktor skala rejim air sebelum tanam. IPCC 2019 membagi faktor skala rejim air sebelum tanam berdasarkan jumlah hari dimana lahan sawah tidak tergenang air.

Metode yang digunakan dalam perhitungan emisi GRK di lahan sawah tersebut menggunakan metode perhitungan Tier 2 pada IPCC. Hal tersebut dikarenakan faktor emisi dan beberapa parameter perhitungan telah disesuaikan dengan kondisi di Indonesia. Berikut merupakan beberapa faktor skala yang menjadi bahan perhitungan emisi metana di Indonesia Agus (2019):

Tabel 4. Faktor skala pengaturan air yang menjadi bahan perhitungan emisi metana di Indonesia

Rejim air		Kondisi umum		Kondisi Spesifik		SFw berdasarkan riset di Indonesia
		Faktor skala (SFw)	Kisaran	Faktor skala (SFw)	Kisaran	
Dataran tinggi		0	-	0	-	
Irigasi	Penggenangan terus menerus			1,00	0,73-1,27	1,00
	Satu periode pengeringan	0,60	0,44-0,78	0,71	0,53-0,94	0,71
	Beberapa kali periode pengeringan			0,55	0,41-0,72	0,46
Tadah Hujan dan Air Dalam	Reguler tadah hujan			0,54	0,39-0,74	0,49
	Rawan Kekeringan	0,45	0,32-0,62	0,16	0,11-0,24	
	Air dalam	0,06	0,03-0,12	0,06	0,03-0,12	

Sumber: Agus, 2019

Tabel 5. Faktor skala untuk varietas (SFr)

Varietas	Umur (hari)	Rata rata hasil (ton/ha)	Faktor skala	Varietas	Umur (hari)	Rata rata hasil (ton/ha)	Faktor skala
Gilirang	120	6,00	2,46	IR 42	140	5,00	1,33
Fatma-wati	110	6,00	1,81	Rokan	110	6,00	1,52
Tukad Unda	110	4,00	1,21	Inpari 1	108	7,32	1,34
IR 72	120	5,00	1,10	Inpari 6 Jete	116	6,82	1,34
Cisadane	135	5,00	1,01	Inpari 9 Elo	125	6,41	1,77
IR 64	110	5,00	1,00	Aromatik	115	-	1,35
Marga-sari	120	3,50	0,93	Batang Anai	110	6,40	0,76
Cisantana	115	5,00	0,92	Muncul	125	-	0,63
Tukad Petanu	110	4,00	0,78	Mendawak	110	3,98	1,26
IR 36	115	4,50	0,73	BP 360	110	5,39	1,06
Membe-ramo	110	6,50	0,72	BP 205	110	-	0,97
Dodokan	115	5,10	0,72	Hipa 4	116	8,00	0,98
Way Apoburu	105	5,50	0,72	Hipa 6	110	7,40	1,08
Tukad Balian	110	4,00	0,57	Hipa 5 Ceva	110	7,30	1,60
Cisang-garung	110	5,50	0,57	IPB 3S	110	7,00	0,95
Ciherang	115	6,00	0,57	Inpari 13	99	6,60	0,89
Limboto	110	4,50	0,49	Inpari 18	102	6,70	0,90
Wayarem	110	3,50	0,45	Inpari 31	119	6,00	1,05
Maros	118	6,30	0,37	Inpari 32	120	6,30	1,22
Mekong-ga	120	6,00	1,16	Inpari 33	107	6,60	0,95

Sumber: Agus, 2019

4.3.2. Pemupukan

Berdasarkan metode perhitungan mitigasi dan serapan GRK (2020), perhitungan emisi GRK dari pemupukan dapat dihitung menggunakan pendekatan:

Emisi N₂O langsung dari tanah yang dikelola + Emisi N₂O tidak langsung dari tanah yang dikelola + Emisi CO₂ dari pemupukan urea.

IPCC (2006) menyebutkan sumber emisi langsung berasal dari N_2O yang dipancarkan langsung ke atmosfer dari tanah yang dibudidayakan baik dipupuk atau digembalakan sehingga dapat memineralisasi N organik. Emisi tidak langsung dihasilkan dari pengangkutan N berasal dari sistem pertanian ke dalam tanah maupun air melalui drainase maupun limpasan permukaan, atau juga emisi yang berupa ammonia dan nitrogen oksida dan pengendapannya yang menyebabkan produksi N_2O .

- a. Perhitungan nilai emisi N_2O langsung dari tanah yang dikelola menggunakan persamaan 11.1 (IPCC 2019)

$$N_2O_{Direct-N} = N_2O-NN \text{ inputs} + N_2O-N_{OS} + N_2O-N_{PRP}$$

$N_2O_{Direct-N}$	: emisi tahunan N_2O-N langsung yang dihasilkan dari lahan yang dikelola (kg N_2O-N /tahun)
$N_2O-NN \text{ inputs}$	: emisi tahunan N_2O-N langsung dari input N ke lahan yang dikelola (kg N_2O-N /tahun)
N_2O-N_{OS}	: emisi tahunan N_2O-N langsung dari tanah organik yang dikelola, kg N_2O-N tahun ⁻¹ . (Tidak relevan untuk perhitungan ini).
N_2O-N_{PRP}	: emisi tahunan N_2O-N langsung dari urin dan kotoran sapi yang diberikan ke lahan gembalaan (kg N_2O-N /tahun). (Tidak relevan untuk perhitungan ini).

Sehingga, perhitungan nilai emisi N_2O langsung dari tanah dapat disederhanakan menjadi:

$$N_2O_{Direct-N} : N_2O-NN \text{ inputs}$$

$N_2O-NN \text{ inputs}$	: $[(F_{SN} + F_{ON} + F_{SOM}) * EF_1] + [(F_{SN} + F_{ON} + F_{SOM}) FR * EF_{1FR}]$
F_{SN}	: penggunaan pupuk N sintetis tahunan, (kg N/tahun)
F_{ON}	: penggunaan N dalam bentuk pupuk kandang, kompos dan N organik lainnya ke tanah

(Catatan: Jika menghitung N dari limbah cair, perlu *cross check* dengan sektor limbah, agar tidak terjadi *double counting*), (kg N/tahun). Unsur ini berpotensi untuk dihitung asalkan datanya tersedia.

F_{SOM}	: jumlah N tahunan yang termineralisasi di dalam tanah bersamaan dengan hilangnya C dari bahan organik tanah karena perubahan cara pengelolaan lahan kg N tahun ⁻¹ . Komponen ini selain angkanya sangat kecil, datanya tidak tersedia.
EF_1	: Faktor emisi N ₂ O dari N inputs, (kg N ₂ O-N/kg N input)
EF_{1FR}	: Faktor emisi N ₂ O dari N inputs ke lahan tergenang (lahan sawah), (kg N ₂ O-N/kg N input) Dengan nilai default untuk EF_{1FR} = 0,004 kg N ₂ O-N/kg N input.

Sumber penurunan emisi yang dapat dihitung adalah dari efisiensi penggunaan pupuk buatan (F_{SN}) pada lahan sawah sehingga dapat disederhanakan lagi menjadi:

$$N_2O_{Direct-N} = F_{SN} * EF_{1FR}$$

- b. Perhitungan nilai emisi N₂O tidak langsung bersumber dari pemupukan urea dengan persamaan 11.1 (IPCC 2006)

$$N_2O \text{ (ATD)} - N \text{ (dalam juta ton CO}_2\text{-e)} = [(F_{SN} \times FracGASF) \times EF_4 \times 310 \times 10^{-9}]$$

$N_2O(ATD) - N$	: jumlah N ₂ O-N yang ter volatilisasi (kg N ₂ O-N/tahun)
$F_{racGASF}$	: fraksi N pupuk buatan yang ter volatilisasi dalam bentuk NH ₃ dan NO _x (kg N ter volatilisasi/kg N yang digunakan)

Nilai default untuk $FracGASF$ = 0,1 kg N₂O-N/kg N input (IPCC 2006; Tabel 11.3).

EF₄ : faktor emisi N₂O dari N yang ter volatilisasi yaitu 0.01 (Tabel 11.3, IPCC 2006)

Konversi nilai emisi dari N₂O(ATD)-N ke N₂O atau perbandingan beratmolekul N₂O dengan N adalah 44/28.

- c. Perhitungan emisi CO₂ dari pemupukan urea menggunakan persamaan 11.13 (IPCC 2006)

Berdasarkan IPCC (2006), penambahan urea ke dalam tanah selama pemupukan juga menyebabkan pelepasan CO₂ yang berasal dari produksi industri pupuk. Urea (CO(NH₂)₂) diubah menjadi amonium (NH⁺), ion hidroksil (OH⁻), dan bikarbonat (HCO⁻). Seperti halnya dengan reaksi tanah setelah penambahan kapur, senyawa bikarbonat yang terbentuk berevolusi menjadi CO₂ dan air. Kategori sumber ini termasuk penghilangan CO₂ dari atmosfer selama pembuatan urea diperkirakan di Sektor Proses Industri dan Penggunaan Produk (Sektor IPPU).

$$\text{Perhitungan emisi CO}_2 = \text{Jumlah Urea (ton ha}^{-1} \text{ th}^{-1}) \times \text{Faktor emisi pupuk urea} \times 44/12 \times 10^{-3}$$

Dalam pendekatan perhitungan yang disusun oleh Agus (2019), data aktivitas yang digunakan yaitu luas panen padi pertanian. Pendekatan ini dilakukan dengan mengasumsikan setengah dari luas panen padi telah menerapkan pemupukan berimbang.

4.3.3. Pembakaran Biomassa

Berdasarkan IPCC (2006), perhitungan emisi dari pembakaran biomassa memiliki dua perhitungan, di antaranya: pembakaran biomassa di lahan tanaman pangan (*cropland*) dan pembakaran biomassa dari padang rumput (*grassland*). Masing-masing memiliki perhitungan emisi GRK terpisah. Pembakaran biomassa dari lahan pertanian tanaman pangan meliputi pembakaran sisa pertanian seperti padi, jagung, tebu.

Pembakaran biomassa dari padang rumput diasumsikan berasal dari pembukaan lahan dengan membakar lahan.

Berdasarkan rumus perhitungan 2.27 IPCC 2006 dari kebakaran biomassa, estimasi perhitungan GRK dari kebakaran biomassa dapat dihitung menggunakan:

$$L_{\text{fire}} = A \times M_B \times C_f \times G_{\text{ef}} \times 10^{-3}$$

L_{fire} : emisi GRK dari pembakaran biomas (ton CH_4 , N_2O dsb)

A : luas area yang terbakar (ha)

M_B : Jumlah biomassa yang terbakar (ton ha^{-1}). Termasuk di dalamnya biomas, seresah dan kayu yang telah mati. Apabila masih menggunakan Tier 1 maka seresah dan kayu yang mati dianggap nol

C_f : faktor pembakaran

G_{ef} : faktor emisi dari bahan yang terbakar (g kg^{-1})

Penggunaan Tier 1, Tier 2, maupun Tier 3 baik pada data aktivitas maupun faktor emisi bergantung pada kondisi maupun karakteristik wilayah tersebut. Data aktivitas yang dibutuhkan pada Tier 1 meliputi luas panen tanaman dan proporsi area dan jumlah biomassa yang terbakar dari masing-masing provinsi yang ada di Indonesia. Sedangkan Tier 2 menggunakan data aktivitas yang bergantung pada karakteristik wilayah yang lebih spesifik seperti zona iklim maupun laju akumulais residu tanaman. Sedangkan Tier 3, data aktivitas yang digunakan sama halnya dengan Tier 2 namun lebih detail seperti jenis tanaman yang berdasarkan iklim, jenis tanah dan faktor lain yang berpengaruh.

Sedangkan faktor emisi untuk Tier 1 dilakukan perhitungan dengan pendekatan yang sederhana yaitu dengan mengasumsikan bahwa bahan organik yang terbakar menghasilkan emisi gas rumah kaca dikarenakan sumber utama berasal dari bahan organik. Sedangkan faktor emisis Tier 2, disesuaikan dengan kondisi negara dalam menghitung pembakaran biomassa. Sedangkan Tier 3, perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan dinamika biomassa dan bahan organik.

4.3.4. Emisi dari Penggunaan Kapur Pertanian

Pemberian kapur yang tidak sesuai dosis dapat menjadi sumber emisi CO₂ (Robertson *et al.* 2000). Perlu dilakukan efisiensi penggunaan kapur untuk menekan emisi CO₂ yang berasal dari pengapuran. Perhitungan status emisi gas rumah kaca dapat dikembangkan dari Tier 1, 2, dan 3 dimana masing-masing Tier membutuhkan data aktivitas dan sumberdaya lebih banyak dari sebelumnya (Agus 2019).

Tier 1

Emisi CO₂ dari penggunaan kapur dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (IPCC 2006):

$$\text{Emisi CO}_2\text{-C} = [(M_{\text{limestone}} \times EF_{\text{limestone}}) + (M_{\text{dolomit}} \times EF_{\text{dolomit}})]$$

Dimana:

Emisi CO ₂ -C	:	Emisi C tahunan dari penggunaan kapur (ton tahun ⁻¹)
M	:	Jumlah atau berat dari limestone atau dolomit yang digunakan (ton tahun ⁻¹)
EF	:	Faktor emisi, ton C dari limestone atau dolomit

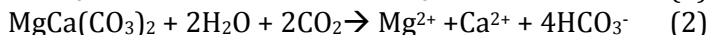
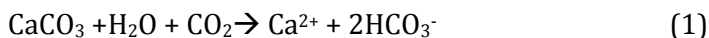
Tabel 6. Faktor emisi default berdasarkan kandungan bahan karbonat

Jenis	FE
Limestone	0,12
Dolomit	0,13

Sumber: IPCC, 2006

Perhitungan emisi CO₂ Tier 2 dari kegiatan pemberian kapur sama seperti pada Tier 1 namun menggunakan faktor emisi berdasarkan spesifik negara. Penentuan faktor emisi memerlukan pemahaman terkait transformasi karbon organik dari Ca, Mg, dan anorganik C. Sedangkan untuk Tier 3 perhitungan emisi CO₂ berdasarkan variasi spesifik lokasi dan lingkungan. Pada Tier 3 menggunakan data aktivitas sesuai dengan model/desain pengukuran yang digunakan (Agus, 2019).

West and McBride (2005) menjelaskan skenario setelah pemberian kapur pertanian pada tanah, pelepasan CaCO₃ dan MgCa (CO₃)₂ dapat dicirikan sebagai berikut:



Reaksi 1 dan 2 mewakili pembentukan bikarbonat dimana menghasilkan dua mol $\text{CO}_2\text{-eq}$ (2HCO_2^-) untuk setiap mol gas CO_2 yang diambil. Bikarbonat yang dihasilkan dapat tetap berada di dalam tanah atau dialirkan melalui badan tanah. Bikarbonat yang tersisa di dalam tanah diharapkan akan bereaksi dengan H^+ tersedia untuk membentuk asam karbonat (H_2CO_3), diikuti penurunan pH tanah dari penambahan aplikasi pupuk N dan bahan organik dari sisa tanaman. Reaksi asam karbonat di dalam air akan menghasilkan CO_2 yang dilepaskan ke atmosfer. Akibat penambahan pupuk N, kapur pertanian akan bereaksi dengan H^+ yang dihasilkan selama proses nitrifikasi. Oksidasi amonia oleh bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas*) menghasilkan nitrat (NO_2^-) dan ion H^+ yang tersedia untuk penyerapan tanaman. Nitrat dan H^+ akan membentuk asam nitrat (HNO_3). Jika kalsium karbonat bereaksi dengan HNO_3 maka akan menghasilkan CO_2 (persamaan 4).

4.3.5. Peternakan

Persamaan yang digunakan untuk menghitung emisi gas rumah kaca dari sektor peternakan berpedoman pada IPCC (2006) seperti pada penjelasan berikut:

1. Perhitungan emisi CH_4 dari fermentasi enterik

Fermentasi enterik merupakan proses alami pencernaan pakan oleh mikroba rumen pada ternak ruminansia yang menghasilkan gas metana sehingga berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Emisi metana dari proses fermentasi enterik di Inodensia dapat dihitung dengan menggunakan faktor emisi Tier 2 dan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Emisi } \text{CH}_4 \text{ enterik} = \text{FE}_{(T)} \times \left(\frac{N_{(T)}}{10^{-6}} \right)$$

Dimana:

Emisi CH_4 enterik : emisi CH_4 dari fermentasi enterik
[kg/ CH_4 /tahun]

$\text{FE}_{(T)}$: Faktor emisi (dapat menggunakan *default factor* dari IPCC 2006 untuk Tier 1 atau FE nasional dan sub nasional

untuk setiap jenis ternak untuk Tier 2 dan Tier 3) [kg/CH₄/ekor/tahun]

N_(T) : Populasi jenis ternak [ekor]

Faktor koreksi : Penurunan emisi enterik metana rata-rata untuk ternak yang mengkonsumsi hijauan pakan yang dicampur 20% leguminosa adalah 11% dan dan penurunan emisi rata-rata ternak yang mengkonsumsi 5 kg konsentrat per hari adalah sekitar 8%

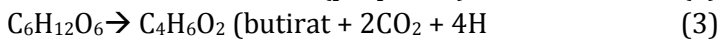
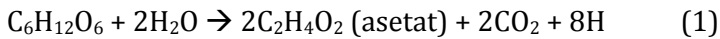
Tabel 7. Faktor emisi CH₄ fermentasi enterik Tier 2 berbagai jenis ternak

Jenis Ternak	Sub- Kategori	FE (kg CH ₄ ekor ⁻¹ tahun ⁻¹)
Sapi Potong	Anak (0-1 tahun)	18,2
	Pertumbuhan (1- 2 tahun)	27,2
	Muda (2- 4 tahun)	41,78
	Dewasa (>4 tahun)	55,89
	Import (Fattening)	25,49
Sapi Perah	Anak (0-1 tahun)	16,55
	Pertumbuhan (1- 2 tahun)	35,05
	Muda (2- 4 tahun)	51,96
	Dewasa (>4 tahun)	77,14
Kerbau	Anak (0-1 tahun)	20,55
	Pertumbuhan (1- 2 tahun)	41,11
	Muda (2- 4 tahun)	61,66
	Dewasa (>4 tahun)	82,21
Domba	Anak	1,31
	Muda	4,22
	Dewasa	5,25
Kambing	Anak	2,29
	Muda	2,64
	Dewasa	3,27

Sumber: Widawati *et al.* (2016) dalam Susilawati *et al.* (2021)

Ternak menghasilkan metana dimana dalam proses pencernaan karbohidrat dipecah oleh mikroorganisme menjadi molekul sederhana untuk diserap ke aliran darah. Pada ternak ruminansia seperti sapi, kerbau, domba, dan kambing, senyawa-senyawa organik dari bahan pakan difermentasi oleh mikroba

rumen kemudian menghasilkan asam-asam lemak volatile (*volatile fatty acids*= VFA), karbondioksida (CO₂), hidrogen (H₂), dan massa mikroba (Haryanto dan Thalib 2009). Komponen utama VFA yaitu asam asetat, propionat, dan butarat yang terbentuk akan digunakan dan diserap oleh ternak ruminansia sebagai sumber energi untuk produktivitasnya (Hegarty 1999).



Proses metanogenesis oleh bakteri metanogenik, CO₂ direduksi dengan H₂ membentuk CH₄ yang keluar melalui eruktasi (83%), pernapasan (16%), dan anus (1%) (Vlaming, 2008). Tiga faktor utama dalam pembentukan gas CH₄ dari fermentasi enterik ruminansia adalah laju fermentasi bahan organik dari pakan yang dikonsumsi, tipe VFA yang dihasilkan menunjukkan tingkat kelebihan sisa H₂ yang dihasilkan untuk dirubah menjadi gas CH₄ oleh bakteri metanogenesis, dan efisiensi biosintesis mikroba (Monteny *et al* 2006).

2. Perhitungan emisi dari kotoran ternak

Perhitungan estimasi emisi CH₄ dan N₂O dari kotoran ternak di Indonesia telah menggunakan Tier 2 dimana faktor emisi yang digunakan berdasarkan pada sistem pengelolaan kotoran ternak di Indonesia.

$$\text{Direct } N_2O \text{ (mm)} = NE_{MMS} \times EF_{3(s)} \times \frac{44}{28}$$

$$\text{Indirect } N_2O \text{ (mm)}$$

$$= NE_{\text{volatilization-MMS}} \times EF \times \frac{44}{28}$$

$$\text{Emisi } CH_4 \text{ kotoran} = N_{(T)} \times (EF_{(T)}) \times 10^{-6}$$

Dimana:

NE_{mms} : N_(T) * N_{ex(T)} * MS_{T,S}
 Emisi langsung N₂O dari
 Direct N₂O : pengelolaan kotoran ternak [kg
 N₂O-N tahun⁻¹]

$EF_{3(S)}$	:	Faktor emisi langsung dari sistem pengelolaan kotoran ternak [kg N_2O -N tahun ⁻¹]
Nvolatilization-MMS	:	Jumlah kotoran ternak yang hilang akibat volatilisasi NH_3 dan NO_x
Indirect N_2O	:	Emisi tidak langsung N_2O akibat dari penguapan N dari pengelolaan kotoran ternak [kg N_2O -N tahun ⁻¹]
EF	:	Faktor emisi N_2O dari deposisi atmosfer nitrogen di tanah dan permukaan air [kg N_2O -N tahun ⁻¹]
44/28	:	Bobot molekul N_2O / bobot molekul N_2
Emisi CH_4 kotoran	:	Emisi CH_4 kotoran ternak [Gg CH_4 /tahun]
$EF_{(T)}$	:	Faktor emisi untuk jenis ternak (dapat menggunakan <i>default factor</i> dari IPCC 2006 untuk Tier 1 atau FE spesifik Indonesia untuk setiap jenis ternak untuk Tier 2 dan Tier 3) [kg/ CH_4 /ekor/tahun]
$N_{(T)}$	:	Populasi jenis ternak [ekor]

Tabel 8. Faktor emisi CH_4 dari pengelolaan ternak Tier 2

Jenis Ternak	Sub – Kategori	FE (kg CH_4 ekor ⁻¹ tahun ⁻¹)
Sapi Potong	Anak (0-1 tahun)	0,78
	Pertumbuhan (1- 2 tahun)	1,62
	Muda (2- 4 tahun)	3,47
	Dewasa (>4 tahun)	3,64
	Import (Fattening)	7,97
Sapi Perah	Anak (0-1 tahun)	0.52
	Pertumbuhan (1- 2 tahun)	2,52
	Muda (2- 4 tahun)	5,52
	Dewasa (>4 tahun)	12,18
Kerbau	Anak (0-1 tahun)	0,75
	Pertumbuhan (1- 2 tahun)	3,99
	Muda (2- 4 tahun)	8,97

Jenis Ternak	Sub - Kategori	FE (kg CH ₄ ekor ⁻¹ tahun ⁻¹)
	Dewasa (>4 tahun)	15,95
Kambing	Anak	0,03
	Muda	0,02
	Dewasa	0,03
Domba	Anak	0,01
	Muda	0,05
	Dewasa	0,08
Babi	Anak	0,00
	Pedaging	0,01
	Breeding	0,01
Kuda	Anak	0,60
	Muda	2,51
	Dewasa	4,95
Ayam	Native	0,0031
	Petelur	0,0043
	Pedaging	0,0039

Sumber: Agus, 2019

Tabel 9. Faktor emisi N₂O dari pengelolaan kotoran ternak Tier 2

Jenis Ternak	FE direct N ₂ O (kg N ekor ⁻¹ tahun ⁻¹)	FE indirect N ₂ O (kg NH ₃ -N + NO _x -N volatilised) ⁻¹
Sapi pedaging	0	0,008
Sapi perah	0,0144	0,007
Kerbau	0,0144	0,007
Domba	0,02	0,01
Kambing	0,02	0,01
Babi	0,02	0,01
Kuda	0,02	0,01
Ayam Kampung	0,001	0,01
Ayam pedaging	0,001	0,01
Ayam petelur	0,001	0,01
Bebek	0,001	0,01

Sumber: IPCC, 2006 modifikasi Pulitbangnak 2016 (unpublished)

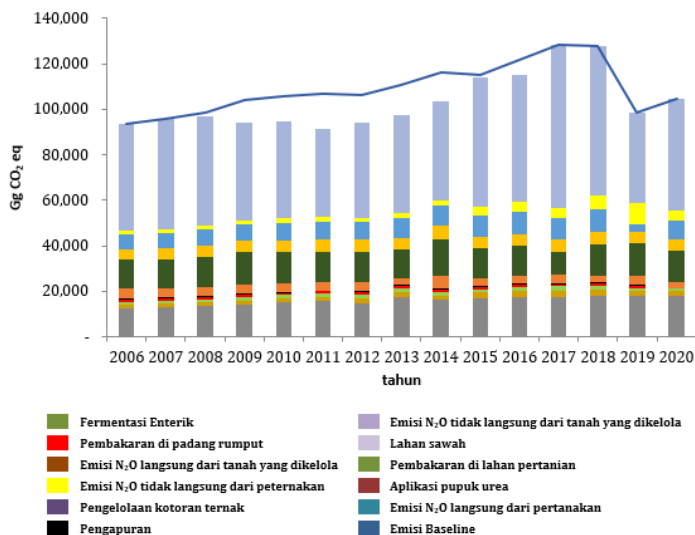
Gas metana dihasilkan selama penyimpanan, pengelolaan pupuk, serta dari kotoran yang disimpan di padang rumput. Dekomposisi pupuk kandang dalam kondisi anerob selama penyimpanan dan perawatan dapat menghasilkan gas metana. Jumlah N yang dikeluarkan melalui kotoran ternak ditentukan oleh populasi dan berat rata-rata ternak. Semakin lama dan

semakin banyak kotoran ditumpuk akan menyebabkan jumlah oksigen di dalam tumpukan makin terbatas dan akan membentuk N_2O . Bila kotoran tidak ditumpuk dan langsung disebar ke lahan, maka hampir seluruh N tersebut berubah menjadi NO_3^- (nitrat) yang merupakan zat hara tanaman.

Gas CH_4 dihasilkan apabila dekomposisi bahan organik terjadi pada kondisi kekurangan anaerob, terutama pada proses pencernaan ruminansia, kotoran ternak, dan lahan sawah (Smith dan Conen 2004). N_2O dihasilkan dari transformasi mikroba pada tanah dan kotoran ternak dan meningkat apabila ketersediaan nitrogen melebihi kebutuhan tanaman. Proses fermentasi anaerobik berlangsung melalui hidrolisis dari (hemi-) selulosa, asidogenesis, asetogenesis dan, metanogenesis. Faktor suhu, waktu retensi, komposisi *slurry*, dan senyawa penghambat adalah faktor yang paling penting (Zeeman, 1991).

4.4. Status Emisi GRK Nasional

Total emisi GRK dari sektor pertanian sebesar 104.471 Gg CO_2e pada tahun 2020. Berdasarkan sumber emisi GRK, emisi utama GRK pada tahun 2020 dihasilkan oleh lahan sawah sebesar 48.830,91 Gg CO_2e (47%), diikuti oleh fermentasi enteric sebesar 18.231,11 Gg CO_2e (17%), dan N_2O secara langsung dari tanah yang dikelola sebesar 13.434,21 Gg CO_2e . Total emisi tahun 2020 mengalami peningkatan sebesar 6% dari tahun sebelumnya (2019) sebesar 98.392 Gg CO_2e . Emisi GRK pada sektor pertanian tahun 2006 hingga 2020 tersaji pada Gambar 10.



Gambar 10. Emisi GRK dari sektor pertanian berdasarkan kategori tahun 2006-2020

Sumber: Balingtan, 2021 (unpublished)

Perhitungan emisi GRK di sektor pertanian berdasarkan kesepakatan nasional menggunakan AR2 yaitu 21. Emisi GRK dari sektor pertanian cenderung mengalami peningkatan namun Emisi GRK pada tahun 2018 hingga 2020 mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan perubahan data aktivitas berupa luas sawah sehingga mempengaruhi perhitungan emisi secara signifikan.

BAB V

PENCEMARAN BAHAN AGROKIMIA PADA LINGKUNGAN PERTANIAN

Ria Fauriah, Hidayatuz Zu'amah, Asep Kurnia

5.1. Definisi Pencemaran Bahan Agrokimia secara umum

Dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup pasal 1 ayat 15 dijelaskan bahwa pencemaran lingkungan hidup adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan. Menurut Peraturan pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya.

Dalam Peraturan BPOM Nomor 8 Tahun 2018 menjelaskan bahwa cemar pangan yang selanjutnya disebut cemar adalah bahan yang tidak sengaja ada dan/atau tidak dikehendaki dalam pangan yang berasal dari lingkungan atau sebagai akibat proses di sepanjang rantai pangan, baik berupa cemar biologis, cemar kimia, residu obat hewan dan pestisida maupun benda lain yang dapat mengganggu, merugikan, dan membahayakan kesehatan manusia.

Dalam Peraturan BPOM Nomor 8 Tahun 2018 menjelaskan bahwa cemar kimia adalah cemar dalam makanan yang

berasal dari unsur atau senyawa kimia yang dapat merugikan dan membahayakan kesehatan manusia.

Dalam WHO (2014) Batas Maksimum Residu (MRL) berarti konsentrasi maksimum residu yang diizinkan secara hukum atau diakui sebagai dapat diterima dalam atau pada komoditas pangan atau pertanian atau bahan pakan ternak.

5.1.1. Bahan Agrokimia

Bahan agrokimia adalah produk kimia yang terdiri dari pupuk, bahan kimia pelindung tanaman atau pestisida, dan hormon pertumbuhan tanaman yang digunakan dalam pertanian (Mandal *et al*, 2020).

Bahan agrokimia adalah berbagai produk kimia yang digunakan dalam pertanian. Dalam kebanyakan kasus, istilah agrokimia mengacu pada berbagai bahan kimia pestisida, termasuk bahan kimia insektisida, bahan kimia herbisida, bahan kimia fungisida, dan bahan kimia nematisida dan lain-lain. Istilah ini juga dapat mencakup pupuk sintetis, hormon, dan zat pertumbuhan kimia lainnya, serta penyimpanan kotoran hewan mentah yang terkonsentrasi (Speight, 2017).

5.1.2. Pupuk

Pupuk adalah suatu bahan baik berbentuk padat, cair, butiran yang mengandung satu atau lebih unsur hara atau nutrisi bagi tanaman untuk menopang tumbuh dan berkembangnya tanaman. Berdasarkan kandungan haranya pupuk dibagi menjadi pupuk tunggal dan pupuk majemuk. Berdasarkan asal bahan dan proses pembuatannya pupuk dibagi menjadi pupuk organik dan pupuk an organik (Purwanto *et. al.*, 2014).

Pupuk adalah bahan kimia atau organisme yang berperan dalam penyediaan unsur hara bagi keperluan tanaman secara langsung atau tidak langsung (PP R1 No. 8, 2001).

Pupuk an-organik adalah pupuk hasil proses rekayasa secara kimia, fisik dan atau biologis, dan merupakan hasil industri atau pabrik pembuat pupuk (PP R1 No. 8, 2001).

Pupuk organik adalah pupuk yang berasal dari tumbuhan mati, kotoran hewan dan/atau bagian hewan dan/atau limbah organik lainnya yang telah melalui proses rekayasa, berbentuk

padat atau cair, dapat diperkaya dengan bahan mineral dan/atau mikroba, yang bermanfaat untuk meningkatkan kandungan hara dan bahan organik tanah serta memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi tanah (Permentan No. 70, 2011).

Pupuk hayati adalah produk biologi aktif terdiri atas mikroba yang dapat meningkatkan efisiensi pemupukan, kesuburan, dan kesehatan tanah (Permentan No. 70, 2011).

Pembenah tanah adalah bahan-bahan sintetis dan/atau alami, organik dan/atau mineral berbentuk padat dan/atau cair yang mampu memperbaiki sifat fisik, kimia dan/atau biologi tanah (Permentan No. 70, 2011).

5.1.3. Pestisida

Dalam WHO (2014) menyebutkan bahwa pestisida adalah setiap bahan, atau campuran bahan kimia atau bahan biologis yang dimaksudkan untuk mengusir, menghancurkan atau mengendalikan hama, atau mengatur pertumbuhan tanaman.

Dalam EPA (2005) menyebutkan bahwa pestisida adalah zat atau organisme yang digunakan untuk menghilangkan, melumpuhkan, memodifikasi, menghambat pertumbuhan atau mengusir hama. Mereka dapat berupa bahan kimia alami atau sintetis, campurannya, atau organisme hidup yang bertindak sebagai agen kontrol biologis. Hama adalah organisme hidup yang menurunkan kesehatan, nilai, kegunaan, kondisi atau kemudahan organisme lain, struktur atau tempat. Organisme hama dapat berupa tumbuhan, jamur, alga, hewan vertebrata atau invertebrata, atau mikroorganisme seperti bakteri, kapang, lendir, dan jamur.

Dalam Permentan (2019) menyebutkan bahwa pestisida merupakan bahan beracun yang memiliki potensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan keanekaragaman hayati, menyebabkan resistensi, resurgensi, timbulnya hama baru, serta gangguan kesehatan manusia dan makhluk hidup lainnya, sehingga harus dikelola dengan penuh kehati-hatian. Lebih jelas lagi diuraikan bahwa pestisida adalah semua zat kimia dan bahan lain serta jasad renik dan virus yang dipergunakan untuk:

- a) memberantas atau mencegah hama-hama dan penyakit yang merusak tanaman, bagian-bagian tanaman, atau hasil-hasil pertanian;
- b) memberantas rerumputan;
- c) mematikan daun dan mencegah pertumbuhan yang tidak diinginkan;
- d) mengatur atau merangsang pertumbuhan tanaman atau bagian-bagian tanaman tidak termasuk pupuk;
- e) memberantas atau mencegah hama-hama luar pada hewan-hewan piaraan dan ternak;
- f) memberantas atau mencegah hama-hama air;
- g) memberantas atau mencegah binatang-binatang dan jasad-jasad renik dalam rumah tangga, bangunan dan dalam alat-alat pengangkutan; dan/atau
- h) memberantas atau mencegah binatang-binatang yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia atau binatang yang perlu dilindungi dengan penggunaan pada tanaman, tanah atau air.

Dalam WHO (2014) menjelaskan bahwa residu pestisida adalah zat tertentu di dalam atau pada makanan, pertanian dan jenis komoditas lain atau pakan ternak serta pada media lingkungan termasuk tanah, udara dan air yang dihasilkan dari penggunaan pestisida. Istilah ini mencakup setiap turunan pestisida, seperti produk konversi, metabolit, produk penguraian, produk reaksi, dan pengotor yang dianggap memiliki signifikansi toksikologi atau ekotoksikologi. Istilah "residu pestisida" mencakup residu dari sumber yang tidak diketahui atau tidak dapat dihindari (misalnya pencemaran lingkungan) serta penggunaan bahan kimia yang diketahui dan diizinkan.

5.2. Sumber Pencemaran Bahan Agrokimia di Lingkungan Pertanian

Pencemaran lingkungan pertanian dapat berasal dari beberapa faktor, seperti penggunaan pupuk terutama pupuk nitrogen (N) yang berlebihan, penggunaan pestisida sintetik yang tidak tepat dan secara terus menerus, limbah industri yang menghasilkan logam berat (seperti Hg, Fe, Cd, Cu, Zn, dan Mn) atau kebocoran limbah cair atau bahan kimia, kegiatan pertambangan, pembukaan atau alih fungsi lahan yang menyebabkan terjadinya degradasi lahan (seperti pemasaman,

erosi, menurunnya kandungan bahan organik tanah, kekeringan, dan banjir), limbah dari rumah tangga seperti sampah yang mencemari air tanah (Las dkk, 2006; Kurnia dan Sutrisno, 2008; Dayani dkk, 2011; Wijaya dkk, 2013; Ramadhan, 2018).

5.3. Jenis Pencemaran Bahan Agrokimia

5.3.1. Pencemaran Fisik: Limbah pestisida

Limbah bekas pestisida yang dibuang secara sembarangan tanpa mengikuti prosedur yang telah ditetapkan menyebabkan terjadinya pencemaran di sekitar pertanaman. Perilaku petani saat mengaplikasikan pestisida pada lahan pertanian sering menyebabkan resiko cemaran akibat limbah bekas pestisida yang tidak sesuai prosedur. Penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar petani membuang air bilasan sisa pencucian alat aplikasi pestisida pada lahan pertanaman, dan sisanya membuangnya ke sungai atau sumber air yang ada disekitar pertanaman (Bagheri *et al*, 2021).

Di wilayah China, ditemukan bahwa sebesar 48,80% masyarakat membuang limbah botol pestisida secara langsung tanpa mengikuti prosedur yang telah ditetapkan, dengan membuangnya bersama dengan sampah rumah tangga lainnya, sementara hanya 0,30% masyarakat yang melakukan penanganan limbah botol pestisida sesuai aturan (Xu *et al*, 2021).



Gambar 11. Pencemaran plastik berupa kemasan bekas pestisida
Sumber: Dokumentasi Balingtan

5.3.2. Pencemaran Kimia: Nitrat, residu pestisida, dll

Di Indonesia, penggunaan bahan-bahan agrokimia seperti pupuk dan pestisida kimia mulai masif digunakan sejak era revolusi hijau tahun 1970 an. Revolusi Hijau yang didalamnya terdapat intensifikasi pertanian dengan programnya yang disebut panca usaha tani yaitu terdiri dari penggunaan benih unggul, penggunaan pupuk, irigasi, pemberantasan hama tanaman, dan perbaikan cara bercocok tanam. Dalam upaya untuk meningkatkan produksi bahan pangan, petani dikenalkan dengan penggunaan pupuk buatan dan pestisida. Sejak itu, penggunaan pupuk dan pestisida menjadi keharusan bagi petani. Hingga saat ini masih terjadi ketergantungan petani yang besar kepada pihak luar, yaitu perusahaan besar yang memproduksi pupuk buatan, pestisida, dan sebagainya (Husnain, *et. al.*, 2019; Rinardi, *et. al.*, 2019; Ekowati, 2012, Agung dan Gunawan, 2020).

Bahan-bahan agrokimia terutama pupuk dan pestisida umumnya digunakan secara luas di dalam budidaya pertanian. Penggunaan pupuk anorganik dan pestisida yang dilakukan secara intensif, cenderung dalam jumlah yang berlebihan atau tidak sesuai dosis, dan dilakukan dalam jangka panjang secara terus-menerus dapat menimbulkan dampak negatif dan penurunan kualitas lingkungan. Dampak yang timbul antara lain adalah adanya pencemaran tanah dan air, menurunkan tingkat kesuburan tanah, keracunan tanaman, timbulnya resistensi hama dan ketergantungan petani secara ekonomi dan sosial. Selain pencemaran lingkungan, pengaruh cemaran agrokimia ini juga memberikan dampak negatif terhadap manusia dan makhluk hidup lainnya (Nopiantari *et al.*, 2017; Kurnia, 2008; Udiyani, 2003; Husnain, *et. al.*, 2019).

Di tingkat nasional, penggunaan bahan agrokimia terutama pupuk dan pestisida di Indonesia terus meningkat. Peningkatan penggunaan pestisida dan pupuk anorganik secara berlebihan secara terus menerus dalam kurun waktu lama menyebabkan kontaminasi kadmium pada lahan pertanian semakin meningkat (Schipper *et al.* 2011). Pencemaran logam kadmium pada lahan pertanian juga berasal dari penggunaan pestisida dan pupuk fosfat anorganik (Fang dan Zhu, 2014). Pupuk Urea mengandung

timbal (Pb) sebanyak 4,4511 ppm dan Nitro Ponska mengandung timbal (Pb) sebanyak 2,1620 ppm (Rasman dan Hasmayani, 2018).

Pupuk P yang digunakan dalam budidaya pertanian dapat menyebabkan pencemaran tanah, karena pupuk tersebut mengandung logam berat (Setyorini *et al.*, 2003). Berbagai jenis pupuk, khususnya sumber pupuk P (fosfor), selain mengandung unsur-unsur hara utama (P_2O_5), hara sekunder (Ca dan Mg), dan hara mikro (Fe, Mn, Cu, dan Zn) juga mengandung unsur-unsur logam berat. Logam berat di dalam pupuk berasal dari bahan baku yang digunakan untuk pembuatan pupuk. Hasil analisis berbagai jenis pupuk P, diketahui bahwa total kandungan Pb dalam pupuk P-alam bervariasi dari 5-156 ppm, dan kandungan Cd bervariasi dari 1-113 ppm. Kandungan logam berat lain, seperti Cr bervariasi dari 4-452 ppm, Ni berkisar dari 14-241 ppm, dan Co bervariasi dari 0,5-40 ppm (Kurina, 2008). Selain itu, unsur Hg dan As ditemukan dalam jumlah kecil, berturut-turut < 0,5 ppm dan < 9 ppm (Setyorini *et al.*, 2003).

Pupuk organik, terutama yang menggunakan bahan baku sampah kota, juga dapat tercemar B3/logam berat akibat berbagai macam limbah rumah tangga dan sampah kota yang digunakan sebagai sumber pupuk organik mengandung atau tercemar bahan beracun berbahaya (B3)/logam berat, seperti eks baterai, kaleng, seng, aluminium foil, dan lain-lain (Kurnia, 2008)

Selain menyebabkan pencemaran logam berat, penggunaan pupuk dan pestisida juga dapat menyebabkan eutrofikasi. Sebagian pupuk yang diberikan dalam tanah tidak terserap oleh tanaman, tetapi sebagian tercuci dan masuk ke perairan melalui aliran air. Tingkat aplikasi pupuk berkorelasi positif terhadap hilangnya unsur hara (*leaching*). Semakin tinggi masukan pupuk ke lahan maka akan semakin besar unsur hara yang hilang (Tian *et. al.*, 2020). Masukan unsur hara yang terbawa melalui limbah yang dihasilkan oleh kegiatan manusia akan masuk ke perairan dan pada kondisi tertentu akan mengganggu existing perairan. Kandungan unsur hara yang terlalu tinggi terutama nitrogen dan fosfor akan menyebabkan perairan baik air tawar maupun air laut mengalami eutrofikasi

dan peningkatan gas rumah kaca (Scavi, 2012). Eutrofikasi adalah proses pengkayaan (*enrichment*) air dengan unsur hara berupa senyawa-senyawa anorganik yang dibutuhkan tumbuhan yang mengakibatkan peningkatan produktivitas primer perairan terutama unsur hara nitrogen (N) dan fosfor (P). Hal tersebut dapat memicu perkembangan tumbuhan air yang tidak terkendali atau dikenal dengan istilah blooming (Simbolon, 2016).

Pestisida sintetis merupakan salah satu solusi utama dalam mengendalikan OPT di pertanian secara cepat dan tepat sasaran. Meskipun faktanya penggunaan pestisida menjadi salah satu penyumbang cemaran pada lingkungan pertanian. Penggunaannya memang dapat menekan serangan hama di pertanian dan sebagian besar dapat memacu produksi (Zhao and Pei, 2012), namun aplikasi pestisida yang tidak tepat dan dilakukan secara terus menerus merupakan salah satu sumber pencemaran lingkungan pertanian yang sangat potensial. Pencemaran ini pada umumnya terjadi karena penanganan pestisida yang tidak tepat dan sifat fisika kimia pestisidanya (Ramadhan, 2018). Golongan pestisida organoklorin, karbamat, organofosfat, dan piretroid ditemukan pada tanah dan air yang dimanfaatkan sebagai lahan perikanan di Sukabumi (Taufik, 2011). Penggunaan pestisida sintetis seperti azinfos-metil, karbaril, dan klorpirifos, dapat menyebabkan terdistribusinya residu pestisida yang kemudian menyebar ke tanah, air tanah dangkal, dan endapan yang kemudian terbawa ke aliran air (Loewy *et al*, 2011).

Selain residu pestisida, pemberian pestisida pada tanaman juga dapat menyebabkan timbulnya kandungan logam berat pada pertanian. Lahan pertanian yang diberikan pestisida menyebabkan tanaman kentang mengandung logam berat krom (Cr) dari awal pembibitan hingga pada buah kentang (Manurung dkk, 2018). Pestisida yang digunakan petani bawang merah diketahui mengandung logam berat Pb dengan kisaran hingga 19,37 ppm sehingga menyebabkan terakumulasinya logam berat ini hingga ke produk pertanian (Rasman dan Hasmayani, 2018). Kontaminasi logam Pb dan Cd pada biji kedelai meningkat akibat penggunaan bahan agrokimia dibandingkan tanpa penggunaan

bahan agrokimia selama proses budidaya kedelai (Priyadi dkk, 2013).

Di negara lain telah ditemukan bahwa penggunaan pestisida merupakan salah satu sumber pencemaran lingkungan pertanian. Di Korea Selatan ditemukan kasus pencemaran senyawa karbofuran pada lahan pertanian hingga konsentrasi 116 mg/L. Ditemukannya senyawa karbofuran ini mengindikasikan adanya potensi pencemaran air tanah dari kegiatan pertanian (Lee *et al.*, 2019).

Di wilayah Indonesia, penggunaan pestisida yang intens juga menyebabkan ditemukannya pestisida ini sebagai pencemar pada lingkungan pertanian. Di wilayah pesisir Semarang, Jawa Tengah, ditemukan kandungan heptaklor pada sampel air dengan kisaran 0,023-0,055 g/L yang masuk dalam kategori tercemar jika mengacu pada WHO dan baku mutu (Rochaddi *et al.*, 2018). Di wilayah pesisir Surabaya dan Sidoarjo, Jawa Timur, ditemukan senyawa klorpirifos pada sampel air yang diduga disebabkan karena kegiatan pertanian di wilayah hulu. (Rochaddi *et al.*, 2019). Di lahan pertanian di Brebes, Jawa Tengah, juga ditemukan tanah yang tercemar oleh pestisida dari golongan organofosfat (klorpirifos, profenofos, diazinon) (Joko *et al.*, 2018). Di wilayah Brebes, akibat dari penggunaan pestisida dan pupuk di Kecamatan Kersana menyebabkan ditemukannya residu Pb pada umbi bawang merah dengan kisaran 0,16 – 0,20 mg/kg (Hartini, 2011).

Pada sampel air waduk Saguling yang merupakan wilayah DAS Citarum, Jawa Barat, ditemukan senyawa pestisida dari golongan organoklorin (lindan, aldrin, dieldrin, heptaklor, DDT, dan endosulfan) pada air, sedimen, moluska, dan ikan. Adanya pestisida organoklorin ini disebabkan karena kegiatan pertanian pada lahan sehingga masuk dan mencemari sungai (Oginawati *et al.*, 2021).

Dalam Permentan RI Nomor 43 (2019) telah dinyatakan pelarangan dan pembatasan penggunaan pestisida berbahan aktif organoklorin, organofosfat, dan karbamat, namun residu ketiga golongan pestisida ini masih ditemukan di sampel tanah, tanaman, dan air di wilayah sentra padi Jawa Tengah. Residu insektisida organoklorin dan organofosfat ditemukan di Kabupaten

Grobogan, Demak, Pemalang, Brebes, Tegal Cilacap, Kebumen, Sragen, dan Klaten, sementara residu insektisida karbamat ditemukan di Kabupaten Klaten, Demak, Cilacap, dan Pati (Ardiwinata dan Nursyamsi, 2012). Pada wilayah perairan Semarang, ditemukan kontaminasi pestisida berbahan aktif heptachlor, aldrin, endosulfan, pp-DDT, dan endrin yang tinggi jika dibandingkan dengan BMR yang telah ditetapkan Pemerintah (Suryono dkk, 2016).

5.3.3. Pencemaran Biologi: Salmonella, dll

Buah dan sayur dapat tercemar oleh bakteri patogen dari air irigasi yang tercemar limbah, tanah, atau kotoran hewan yang digunakan sebagai pupuk. Cemaran akan semakin tinggi pada bagian tanaman yang ada di dalam tanah atau dekat dengan tanah. Mikroba tertentu seperti Liver fluke dan *Fasciola hepatica* akan berpindah dari tanah ke selada air akibat penggunaan kotoran kambing atau domba yang tercemar sebagai pupuk. Air irigasi yang tercemar *Shigella sp.*, *Salmonella sp.*, *E.coli*, dan *Vibrio cholerae* dapat mencemari buah dan sayur. Selain itu, bakteri *Bacillus sp.*, *Clostridium sp.*, dan *Listeriamonocytogenes* dapat mencemari buah dan sayur melalui tanah. Namun, penanganan dan pemasakan yang baik dan benar dapat mematikan bakteri patogen tersebut, kecuali bakteri pembentuk spora (Djaafar, 2007).

5.4. Dampak Cemaran Lingkungan Terhadap Sektor Pertanian

5.4.1. Dampak Terhadap Faktor Fisik, Kimia, Biologi (Abiotik = Tanah, Air, tanaman, Biotik)

Pencemaran yang berasal dari berbagai kegiatan pertanian atau non pertanian dapat menimbulkan dampak negatif pada lingkungan pertanian. Penggunaan bahan agrokimia yang berlebihan (pupuk, pestisida, dan aktivitas penambangan) menyebabkan terakumulasinya logam berat dalam tanah. Dampak negatif dari akumulasi logam berat pada tanah yaitu terjadi keracunan pada proses biologi oleh mikroorganisme tanah (Karamina dkk, 2018). Pencemaran yang disebabkan oleh kandungan logam kadmium dapat mengakibatkan penyakit

kanker, kerusakan jantung, hati, ginjal, paru-paru, dan lain sebagainya (Sutrisno dan Kuntastyuti, 2015). Logam berat Arsen (As) digunakan pada pestisida untuk aplikasinya di lahan. Kandungan As yang tinggi dalam tanah dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman yaitu tinggi tanaman, jumlah anakan, dan biomassa tanaman, serta mempengaruhi kualitas tanaman padi (Dewi dan Purbalisa, 2017).

Pencemaran lingkungan oleh pestisida ditunjukkan dengan tercemarnya tanah, air, dan unsur lingkungan lainnya, dimana pestisida tertentu dapat merusak lapisan ozon stratosfir (Ramadhan, 2018). Pada manusia, keracunan akibat terpapar pestisida ditandai dengan gejala penurunan kondisi kesehatan (Pamungkas, 2017).

Paparan dari penggunaan pestisida pada petani dapat menyebabkan terjadinya gangguan kesehatan fisik seperti tremor dan gangguan kesehatan lainnya seperti iritasi kulit, pusing, mual, batuk, sakit kepala, serta kesulitan bernapas, anemia, hipertensi, diabetes mellitus, gangguan pada sistem saraf, gangguan kesehatan pada wanita seperti hipotiroid dan gangguan reproduksi, gangguan kesehatan pada pria seperti gangguan kesuburan (Pratama dkk, 2021).

Penggunaan pupuk N dalam pertanian juga dapat mencemari air minum. Meskipun pencemaran nitrat juga dapat terjadi secara alami, namun yang paling sering yakni akibat pencemaran yang berasal dari air limbah pertanian yang banyak mengandung senyawa nitrat akibat pemakaian pupuk nitrogen (urea). Senyawa nitrat dalam air minum dalam jumlah yang besar dapat menyebabkan methaemoglobinemia, yakni kondisi dimana haemoglobin di dalam darah berubah menjadi methaemoglobin sehingga darah menjadi kekurangan oksigen. Hal ini dapat mengakibatkan pengaruh yang fatal, serta dapat mengakibatkan kematian khususnya pada bayi (Herlambang, 2006).

Penggunaan pestisida yang tidak terkontrol akan mengganggu agroekosistem pertanian dan mencemari lingkungan. Adapun dampak negatif yang mungkin terjadi akibat penggunaan pestisida diantaranya (Arif, 2017) :

1. Tanaman yang diberi pestisida dapat menyerap pestisida yang kemudian terdistribusi ke dalam akar, batang, daun,

dan buah. Pestisida yang sukar terurai akan berkumpul pada hewan pemakan tumbuhan tersebut termasuk manusia. Secara tidak langsung dan tidak sengaja, tubuh mahluk hidup itu telah tercemar pestisida. Bila seorang ibu menyusui memakan makanan dari tumbuhan yang telah tercemar pestisida maka bayi yang disusui menanggung resiko yang lebih besar untuk teracuni oleh pestisida tersebut daripada sang ibu. Zat beracun ini akan pindah ke tubuh bayi lewat air susu yang diberikan. Dan kemudian racun ini akan terkumpul dalam tubuh bayi (bioakumulasi).

2. Pestisida yang tidak dapat terurai akan terbawa aliran air dan masuk ke dalam sistem biota air (kehidupan air). Konsentrasi pestisida yang tinggi dalam air dapat membunuh organisme air diantaranya ikan dan udang. Sementara dalam kadar rendah dapat meracuni organisme kecil seperti plankton. Bila plankton ini termakan oleh ikan maka ia akan terakumulasi dalam tubuh ikan. Tentu saja akan sangat berbahaya bila ikan tersebut termakan oleh burung-burung atau manusia. Salah satu kasus yang pernah terjadi adalah turunnya populasi burung pelikan coklat dan burung kasa dari daerah Artika sampai daerah Antartika. Setelah diteliti ternyata burung-burung tersebut banyak yang tercemar oleh pestisida organiklor yang menjadi penyebab rusaknya dinding telur burung itu sehingga gagal ketika dierami. Bila dibiarkan terus tentu saja perkembangbiakan burung itu akan terhenti, dan akhirnya jenis burung itu akan punah.
3. Ada kemungkinan munculnya hama spesies baru yang tahan terhadap takaran pestisida yang diterapkan. Hama ini baru musnah bila takaran pestisida diperbesar jumlahnya. Akibatnya, jelas akan mempercepat dan memperbesar tingkat pencemaran pestisida pada mahluk hidup dan lingkungan kehidupan, tidak terkecuali manusia yang menjadi pelaku utamanya. Upaya mengurangi efek negatif pestisida.

Paparan pestisida dan bahan agrokimia yang berbahaya dapat menyebabkan masalah kesehatan bagi manusia (Coscolla, *et al.*, 2017; Damalas dan Eleftherohorinos, 2011). Paparan debu organik, pestisida, dan bahan kimia pertanian yang berbahaya dapat menyebabkan penyakit pernapasan dan penurunan fungsi paru-paru (Damalas dan Eleftherohorinos, 2011).

5.4.2. Dampak Terhadap Sosial Ekonomi Pertanian

Beberapa kasus penolakan ekspor produk pertanian dan perikanan salah satunya disebabkan karena produk tersebut mengandung residu pestisida yang melampaui batas aman untuk dikonsumsi. Penggunaan pestisida yang berlebihan dan tidak tepat juga menyebabkan petani aplikator pestisida terganggu kesehatannya banyak terjadi kasus kematian mendadak dan gejala keracunan terhadap petani aplikator pestisida tersebut.

5.5. Dukungan kebijakan tentang pertanian ramah lingkungan dan bebas cemaran baik aturan nasional maupun internasional

Dalam penggunaan dan peredaran pestisida, setiap masyarakat wajib mengikuti aturan dan menggunakan pestisida yang telah melalui izin resmi dari Kementerian Pertanian. UU No 13 tahun 2010 tentang Hortikultura Pasal 32 Ayat (1): Bahan pengendali OPT ramah lingkungan. Ayat (2): Dikembangkan dengan teknologi yang memperhatikan kondisi iklim, lahan, dan ramah lingkungan UU No. 22 Tahun 2019 tentang Sistem Budi Daya Pertanian Berkelanjutan Pasal 48 Ayat (1): Perlindungan Pertanian dilaksanakan dengan sistem Pengelolaan Hama Terpadu serta penanganan dampak perubahan iklim Ayat (2): Pelaksanaan Pelindungan Pertanian menjadi tanggung jawab Pemerintah Pusat dan Pemerintah Daerah sesuai dengan kewenangannya, Petani, Pelaku Usaha, dan masyarakat.

Aturan yang membahas mengenai peredaran dan bahan aktif pestisida yang dilarang tertuang dalam Permentan RI Nomor 43 Tahun 2019. Aturan yang membahas mengenai batas maksimum cemaran kimia dalam pangan tertuang dalam Peraturan BPOM Nomor 8 Tahun 2018.

5.6. Batas cemaran bahan agrokimia (BMR)

Peraturan yang mengatur mengenai tata cara pengukuran kriteria baku kerusakan tanah untuk produksi biomassa yakni Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2006. Kriteria baku kerusakan tanah untuk produksi biomassa baik dalam Peraturan Pemerintah RI No. 150 Tahun 2000 maupun Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2006 belum menyebutkan mengenai cemaran bahan agrokimia tanah, terutama untuk cemaran logam berat dan residu pestisida.

Dalam undang-undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Pasal 20 ayat 1 dan 2 juga dijelaskan bahwa penentuan terjadinya pencemaran lingkungan hidup diukur melalui baku mutu lingkungan hidup. Baku mutu lingkungan hidup meliputi: a. baku mutu air; b. baku mutu air limbah; c. baku mutu air laut; d. baku mutu udara ambien; e. baku mutu emisi; f. baku mutu gangguan; dan g. baku mutu lain sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Baku mutu air untuk pertanian telah diungkapkan dalam Peraturan pemerintah nomer 82 tahun 2021. Baku mutu tanah, ataupun yang lebih spesifik baku mutu lahan pertanian belum muncul dalam peraturan tersebut ataupun dalam Undang-undang. Namun demikian di beberapa literatur ilmiah telah diungkapkan baku mutu cemaran bahan agrokimia baik di tanah, air, maupun tanaman. Baku mutu logam berat dan residu pestisida dalam tanah, air dan tanaman terdapat pada Tabel 10, 11, dan 12.

Tabel 10. Batas Kritis dan Batas Normal Logam Berat dalam Tanah dan Tanaman

Elemen	Tanah (mg/kg)		Tanaman (mg/kg)	
	Batas normal	Batas Kritis	Batas normal	Batas Kritis
Ag	0,01 - 8	2	0,1 - 0,8	1 - 4
As	0,1 - 40	20 - 50	0,02 - 7	1 - 20
Au	0,001 - 0,02	-	< 0,0017	< 1
Cd	0,01 - 2,0	3 - 8	0,1 - 2,4	4 - 200
Co	0,5 - 65	25 - 50	0,02 - 1	4 - 40
Cr	5 - 1500	75 - 100	0,03 - 14	2 - 18
Cu	2 - 250	60 - 125	5 - 20	5 - 64
Hg	0,01 - 0,5	0,3 - 5	0,005 - 0,17	1 - 8

Elemen	Tanah (mg/kg)		Tanaman (mg/kg)	
	Batas normal	Batas Kritis	Batas normal	Batas Kritis
Mn	20 - 10000	1500 - 3000	20 - 1000	100 - 7000
Mo	0,1 - 40	2 - 10	0,03 - 5	-
Ni	2 - 750	100	0,02 - 5	8 - 220
Pb	2 - 300	100 - 400	0,2 - 20	-
Sb	0,2 - 10	5 - 10	0,0001 - 0,2	1 - 2
Se	0,1 - 5	5 - 10	0,001 - 2	3 - 40
Sn	1 - 200	50	0,2 - 6,8	63
Ti	0,1 - 0,8	1	0,03 - 3	-
Zn	1 - 900	70 - 400	1 - 400	100 - 900

Sumber: Alloway, 1995

Tabel 11. Batas maksimum kandungan logam berat dalam air untuk kepentingan irigasi tanaman

Elemen	Batas Maksimum (mg/L)
Arsen	1
Kobalt	0,2
Barium	(-)
Boron	1
Selenium	0,05
Kadmium	0,01
Khrom	0,01
Tembaga	0,2
Besi	(-)
Timbal	1
Mangan	(-)
Raksa	0,005
Seng	2
Khlorida	(-)
Sianida	(-)
Fluorida	(-)

Sumber: PP RI No. 82, 2001

Tabel 12. Batas Maksimum Residu (BMR) Pestisida pada tanah dan air

Bahan Aktif pestisida	Tanah (ppm)	Air (ppb)	Keterangan
2,4-D	0,0453	175	Non Carsinogen
Abamektin	14,1	8,02	Non Carsinogen
Acephate	0,00529	24	Non Carsinogen
Aldicarb	0,00493	19,8	Non Carsinogen
Aldicarbulfon	0,00441	20	Non Carsinogen
Aldrin	0,0151	0,0917	Carsinogen
Amitraz	4,21	8,18	Non Carsinogen
beta-cyfluthrin	31,3	120	Non Carsinogen
Captan	1,69	2400	Non Carsinogen
Carbaryl	1,68	1850	Non Carsinogen
Chlordan	0,1	0,742	Non Carsinogen
Chlorothalonil	0,6	263	Non Carsinogen
Cyfluthrin	31,3	120	Non Carsinogen
Cyromazine	2,55	9900	Non Carsinogen
DDT	3,38	10	Non Carsinogen
Diazinon	0,0648	10,3	Non Carsinogen
Dichlorvos	0,00303	9,85	Non Carsinogen
Dieldrin	0,00708	0,175	Carsinogen
Diiflubenzuron	0,327	290	Non Carsinogen
Dimethoate	0,00989	43,8	Non Carsinogen
Endosulfan	1,39	101	Non Carsinogen
Endrin	0,0922	2,28	Non Carsinogen
Ethephon	0,021	100	Non Carsinogen
Ethion	0,00853	4,35	Non Carsinogen
Fenamiphos	0,00435	4,36	Non Carsinogen
Fenpropathrin	2,89	64	Non Carsinogen
Fenvalerate	318	501	Non Carsinogen
Folpet	0,387	1650	Non Carsinogen
Glifosat	8,82	2010	Non Carsinogen
Heptaklor	0,0115	0,139	Carsinogen
Iprodione	0,225	737	Non Carsinogen
Karbaril	1,68	1850	Non Carsinogen
Karbofuran	0,0366	93,7	Non Carsinogen

Bahan Aktif pestisida	Tanah (ppm)	Air (ppb)	Keterangan
Klorpirifos	0,125	8,44	Non Carsinogen
Lambda- Sihalotrin	13,7	20,1	Non Carsinogen
Lindan	0,0212	3,65	Non Carsinogen
Malathion	0,102	387	Non Carsinogen
Mankozeb	0,759	536	Non Carsinogen
Metalaxyl	0,327	1180	Non Carsinogen
Methamidophos	0,000211	1	Non Carsinogen
Methidathion	0,00705	29,1	Non Carsinogen
Methomyl	0,109	498	Non Carsinogen
Mirex	0,0626	0,0878	Carsinogen
Paraquat	1,1	0,01	Non Carsinogen
Parathion	0,432	85,7	Non Carsinogen
Permethrin	238	1000	Non Carsinogen
Propiconazole	5,33	1610	Non Carsinogen
Toxapene	0,279	1,8	Non Carsinogen
Triadimefon	0,5	627	Non Carsinogen

Sumber: AEP, 2019

BAB VI

TINGKAT PENCEMARAN RESIDU PESTISIDA DAN LOGAM BERAT

Cicik Oktasari Handayani, Elga Riesta Putri, Sukarjo

6.1. Kondisi eksisting lingkungan pertanian

Peningkatan populasi manusia secara global berbanding lurus dengan peningkatan kebutuhan bahan pangan. Namun pada kenyataannya, sumberdaya alam dan lingkungan yang tersedia sangat terbatas sehingga berpotensi menyebabkan krisis pangan pada masa yang akan datang (Foley *et al.*, 2011; Graf *et al.*, 2014).

Sejak *World Food Summit* (WFS) tahun 1996, upaya besar-besaran telah dilakukan dalam meningkatkan produksi dan ketahanan pangan pertanian (Ericksen, 2008; FAO, 2017). Pada tahun 2015, Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) menetapkan 17 tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), di mana tujuan utamanya adalah tidak ada lagi orang yang kelaparan (*zero hunger*).

Pertanian di negara-negara Asia Tenggara dan Afrika mengalami kendala pada peningkatan kejadian ekstrim (misalnya, kekeringan dan banjir) dan meningkatnya frekuensi hama dan penyakit yang terkait dengan perubahan iklim sehingga menyebabkan kegagalan atau kerusakan panen (Richardson *et al.*, 2018; Spence *et al.*, 2020). Daerah tersebut juga mengalami degradasi lahan yang menjadi masalah serius (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Oleh karena itu, sebagian besar upaya harus dilakukan di Asia Tenggara dan Afrika untuk meningkatkan kapasitas kawasan ini untuk mencapai SDGs (FAO, 2021; FAO *et al.*, 2020).

Berbagai negara berupaya meningkatkan produksi pangan untuk tetap memenuhi kebutuhan manusia, antara lain melalui penggunaan pupuk dan pestisida. Namun, penggunaan bahan-bahan agrokimia tersebut masih menjadi kontroversial karena

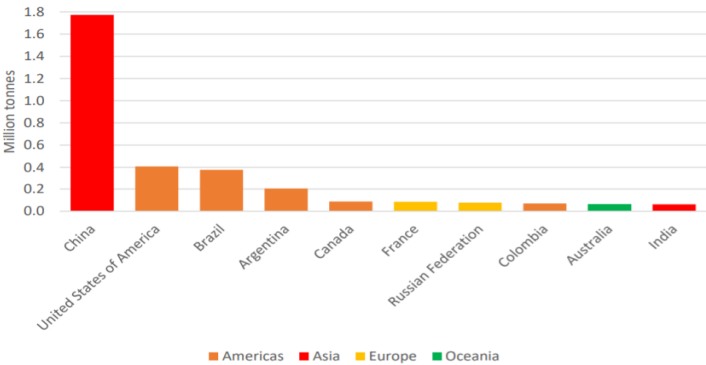
beberapa dampak merugikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Popp *et al.*, 2012; Pelosi *et al.*, 2013). Beberapa negara mulai berupaya mengurangi penggunaan pupuk dan pestisida karena dampak merugikannya terhadap lingkungan (MacDonald *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2012). Pencemaran residu pestisida dan logam berat pada lahan pertanian merupakan salah satu dampak lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan pupuk dan pestisida yang intensif (Tian *et al.*, 2022). Aplikasi bahan agrokimia yang tidak efisien dan tidak sesuai dosis merupakan penyebab utama adanya pencemaran di tanah, air dan produk pertanian (Rasool *et al.*, 2022).

Berdasarkan FAO (2020), penggunaan pupuk (nitrogen, kalium, dan fosfat) secara global mengalami peningkatan dari 184,02 juta ton pada tahun 2015 menjadi 201,66 juta ton pada tahun 2020.

Tabel 13. Data penggunaan pupuk secara global pada 2015-2020 (ribu ton)

Year	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Nitrogen (N)	110 027	111 575	113 607	115 376	117 116	118 763
Fosfat (P ₂ O ₅)	41 151	41 945	43 945	44 120	45 013	45 858
Kalium (K ₂ O)	32 838	33 149	34 048	34 894	34 978	37 042
Total (N+ P ₂ O ₅ + K ₂ O)	184 017	186 668	190 850	194 390	198 107	201 663

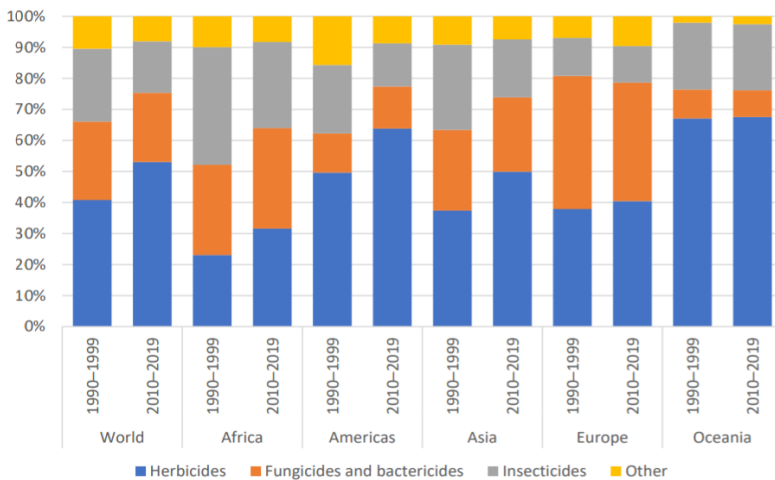
Sumber : FAO, 2020



Gambar 12. Top 10 negara pengguna pestisida pada tahun 2019
Sumber: FAO, 2021

Berdasarkan data FAOSTAT website, penggunaan pestisida dalam aktivitas pertanian relatif stabil pada tahun 2019 yaitu 4,2 juta ton bahan aktif dengan dosis penggunaan 2,7 kg/ha.

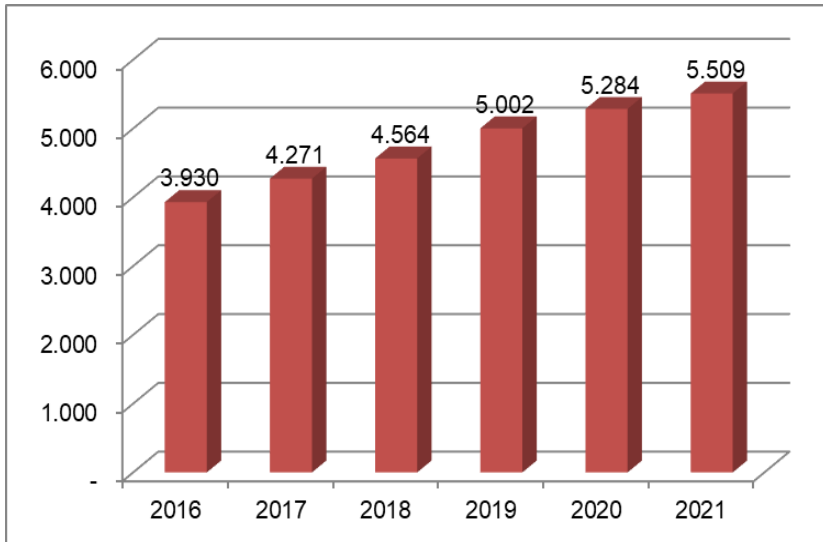
Negara China merupakan pengguna terbesar pestisida diikuti oleh USA pada urutan kedua dan Brazil pada urutan ketiga (Gambar 12). China dan India merupakan negara di Asia yang masuk dalam 10 peringkat pengguna pestisida terbesar di dunia. Jenis pestisida yang paling banyak digunakan di Asia adalah herbisida sedangkan penggunaan paling sedikit adalah pestisida jenis insektisida yaitu sekitar 12 persen (Gambar 13).



Gambar 13. Penggunaan pestisida berdasarkan kategorinya pada tahun 1990-1999 dan 2010-2019

Sumber: FAO, 2021

Indonesia berada di peringkat ke-74 dunia dengan penggunaan pestisida sebesar 1.597 ton yang digunakan pada tahun 2019 (Mueller, 2020). Sebagai negara agraris, mayoritas penduduk Indonesia berkerja pada sektor pertanian. Saat ini para petani di Indonesia masih bergantung pada pestisida sebagai pelindung tanaman dari hama. Data Kementerian Pertanian menunjukkan peningkatan jumlah pestisida dari tahun ke tahun (Gambar 14). Hal tersebut bertolak belakang dengan kebijakan dan arahan untuk melakukan budidaya pertanian ramah lingkungan dengan mengurangi penggunaan bahan-bahan agrokimia.



Gambar 14. Jumlah pestisida terdaftar dan diijinkan dari tahun 2016-2021

Sumber: Dirjen PSP Kementan, 2021

Pesatnya perkembangan pembangunan di berbagai bidang; seperti industri, pertambangan, dan aktivitas pertanian yang melibatkan bahan-bahan kimia, dapat berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan melalui limbah berbahaya (B3) yang dihasilkan. Keadaan ini juga diperparah dengan adanya pembuangan limbah industri ke badan sungai yang dimanfaatkan untuk pengairan pertanian. Pencemaran lingkungan dapat berpengaruh terhadap menurunnya produktivitas lahan dan terkontaminasinya produk pertanian sehingga menurunkan kualitas produk, tanah dan air di sekitarnya. Permasalahan ini menjadi perhatian dari pemerintah dan berbagai pihak terkait. Keberadaan kontaminan berbahaya dalam lingkungan pertanian umumnya tidak dapat terurai dan terakumulasi dalam jangka waktu tertentu. Hal tersebut memberikan dampak merugikan bagi fungsi tanah, pertumbuhan tanaman, hingga kesehatan manusia.

Lahan pertanian yang umumnya tercemar akibat *non-point source pollution* tidak akan mudah untuk dikendalikan. Berbagai jenis polutan-polutan organik seperti pestisida *organochlorine*, *polychlorinated biphenyls*, *phthalate esters* dan PAHs yang banyak digunakan dalam aktivitas pertanian

merupakan polutan dengan toksisitas tinggi, persistent, dan dapat terakumulasi di lingkungan (Pies *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2016). Sulit terurainya residu polutan organik di lahan pertanian pada kondisi normal dapat menyebabkan polutan masuk dalam rantai makanan melalui tanaman dan terangkut dalam produk tanaman yang membahayakan bagi kesehatan manusia. Selain polutan organik, cemaran logam berat juga berpengaruh nyata terhadap kualitas lahan pertanian. Logam berat secara alami terkandung dalam batuan, material induk, vegetasi, dan aktivitas vulkanik; namun juga bersumber dari aktivitas antropogenik berupa aktivitas industri, transportasi, pertambangan, dan lain-lain. Berdasarkan Du *et al.*, (2015), kontribusi sumber dari aktivitas antropogenik lebih besar dibandingkan sumber alami logam berat. Logam berat kadmium (Cd), timbal (Pb), dan kromium (Cr) dengan kadar tinggi dapat ditemukan dari penggunaan bahan agrokimia yang berlebihan. Tanaman akan menyerap logam-logam berat tersebut dan mengangkutnya ke organ-organ tanaman, sehingga menyebabkan penurunan kualitas dan kuantitas produk hasil pertanian.

Pengawasan pemerintah terhadap pencemaran pada lahan pertanian maupun perairan di Indonesia sudah banyak dilakukan. Kebijakan pemerintah dan regulasi sangat berperan penting dalam meminimalkan kontaminan/polutan pada lahan pertanian. Penegakan aturan yang tegas, sanksi yang berat serta pengawasan intensif pemerintah terhadap penggunaan bahan-bahan agrokimia dan pelaku industri dalam mengelola limbah akan mengurangi tingkat pencemaran pada lahan pertanian. Sehingga, meminimalisir dampak merugikan lingkungan.

6.2. Tingkat Pencemaran Residu Pestisida

Pestisida mencakup berbagai macam senyawa antara lain insektisida, fungisida, herbisida, rodentisida, moluskisida, nematisida, zat pengatur tumbuh dan yang lain. Insektisida organoklorin awalnya digunakan karena dapat untuk mengobati sejumlah penyakit, seperti: seperti malaria dan tifus, setelah tahun 1960-an mulai dilarang atau dibatasi peredarannya di sebagian besar negara berteknologi maju. Pengenalan insektisida sintesis lainnya – insektisida organofosfat pada 1960-an, karbamat dalam

1970-an dan piretroid pada 1980-an dan pengenalan herbisida dan fungisida pada 1970-an hingga 1980-an yang sangat berkontribusi untuk pengendalian hama dan meningkatkan hasil pertanian (Aktor *et al.*, 2009).

Pestisida dapat mencemari tanah, air, rumput, dan vegetasi lainnya. Tujuan utama dari pemakaian pestisida adalah mematikan hama yang mengganggu pertumbuhan tanaman, tetapi dapat menjadi racun bagi sejumlah organisme lain termasuk burung, ikan, serangga yang menguntungkan, tanaman yang bukan sasaran, dan manusia. Insektisida umumnya merupakan kelas pestisida yang paling beracun, selain itu herbisida juga dapat menimbulkan risiko bagi organisme lain. Risiko keracunan pada hewan dan manusia dapat bersifat langsung atau tidak langsung melalui rantai makanan. Paparan pestisida secara langsung pada ibu hamil selama masa kehamilan dapat meningkatkan risiko leukimia pada anak yang dapat terjadi pada anak mulai bayi hingga sudah besar (Karalexi *et al.*, 2021).

6.2.1. Tingkat pencemaran residu pestisida pada lahan pertanian

Dalam penerapan di bidang pertanian, pestisida yang diaplikasikan dengan teknik konvensional secara efisien dapat melindungi tanaman dari hama dan penyakit sekitar 20-30% pada saat pembibitan dan sekitar 50-60% saat tanaman telah berdaun sempurna (Huizhu, 2012). Faktanya, saat pestisida diaplikasikan pada tanaman hanya sedikit sekali yang mengenai sasaran (hama dan penyakit tanaman) yaitu kurang dari 0,1% saja dan sisanya lebih dari 99,9% berpindah ke lingkungan yang dapat berdampak buruk bagi kesehatan masyarakat dan biota yang bermanfaat, selain itu dapat mencemari air, udara dan tanah (Pimentel, 1995). Pestisida dalam tanah akan mengalami dekomposisi baik secara fisik, kimia maupun biologis, tetapi untuk senyawa yang persisten akan terakumulasi dalam tanah (Wahyuni, 2010). Residu pestisida yang tertinggal dalam tanah akan mengalami transformasi biologis dan fisikokimia sehingga akan mempengaruhi pertumbuhan mikroba dan aktivitas enzim dalam tanah (Wołejko *et al.*, 2020), dan termasuk juga mempengaruhi populasi cacing tanah (Maggi dan Tang, 2021).

Senyawa organoklorin ditemukan dalam contoh tanah dan tanaman padi di seluruh Kabupaten sentra produksi padi di Jawa Tengah (Kabupaten Grobogan, Demak, Pemalang, Brebes, Tegal Cilacap, Kebumen, Sragen, dan Klaten). Senyawa organofosfat juga ditemukan di dalam contoh tanah dan tanaman padi di seluruh Kabupaten sentra produksi padi di Jawa Tengah. (Ardiwinata dan Nursyamsi, 2012)

Identifikasi residu pestisida di lahan-lahan sawah intensif telah dilakukan Balai Penelitian Lingkungan Pertanian (Balington) sejak tahun 1996 hingga kini. Hasil identifikasi lahan sawah beberapa wilayah di Indonesia telah tercemar residu pestisida tertentu. Residu organoklorin berbahan aktif lindan ditemukan dalam tanah dan air di beberapa wilayah di Jawa Barat telah melebihi BMR (Munarso *et al.*, 2006). Residu lindan juga ditemukan di Desa Srigading kabupaten Bantul Yogyakarta dengan kisaran konsentrasi dalam tanah 5,6 - 38,8 ppb (Narwanti, 2008).

Penggunaan residu insektisida golongan organoklorin sejak tahun 90-an telah dilarang. Namun, karena harganya murah, mudah digunakan, dan efektif memberantas hama, maka beberapa jenis organoklorin seperti DDT masih digunakan di Indonesia, serta kurangnya ketegasan hukum dan peraturan yang berlaku (Sudaryanto *et al.*, 2007). Meskipun telah dilarang residu yang tertinggal dalam tanah masih tertinggal dan berpotensi mengganggu kelestarian lingkungan.

Hasil identifikasi lahan sawah DAS Brantas Hilir di Kabupaten Jombang, beberapa lahan sawah telah tercemar residu pestisida senyawa POPs (berbahan aktif DDT, deldrin, endosulfan, endrin, heptaklor, klordan, toxaphen dan mirex) dengan persentase luasan masing-masing 1,58%; 1,01%; 16,40%; 3,33%; 4,85%; 27,44%; 0,13% dan 0,08% dari total luasan lahan sawah (Balington, 2013). Lahan sawah di DAS Citarum Tengah Kabupaten Cianjur terdeteksi insektisida endosulfan dan aldrin masing-masing 0,001-0,027 mg/kg dan 0,004-0,039 mg/kg, di mana 43% dari 21 lokasi pengambilan contoh kadar endosulfan sudah melebihi batas maksimum residu (BMR), sedangkan aldrin sebesar 14% melebihi BMR (Mulyadi *et al.*, 2014). Padahal endosulfan sudah dilarang penggunaannya berdasarkan konvensi Stockholm 2011.

Delineasi pestisida senyawa POPs di DAS Serayu telah dilakukan Balingtang tahun 2015, yaitu sebanyak 319 titik di Kabupaten Wonosobo, 320 titik di Banjarnegara 320, dan 62 titik di Kabupaten Cilacap, lahan sawah terdeteksi lindan, heptaklor, aldrin, klordan, endosulfan, toxapen, dieldrin, endrin, DDT dan Mirex. Senyawa POPs di lahan sawah di kabupaten Wonosobo umumnya telah melebihi BMR pada kisaran 0,6 - 7,8 mg/kg, kecuali aldrin dan mirex. Sedangkan di kabupaten Banjarnegara selain mirex semua senyawa POPs telah melebihi BMR, cemaran tertinggi adalah endosulfan 23,4 mg/kg dan endrin 34,1 mg/kg, untuk kabupaten Cilacap terdapat 5 senyawa POPs yang melebihi BMR yaitu lindan, klordan, endosulfan, endrin dan DDT masing-masing sebesar 6,5; 1,6; 25,8; 27,4 dan 3,2 mg/kg (Balingtang, 2015). Kandungan DDT dan turunannya dalam tanah di sentra sayuran Brastagi Medan, Dieng dan perkebunan Batu masing-masing adalah <0,001-5,3 ppb; <0,001-14,6 ppb <0,001-54,9 ppb (Rokhwani dan Ratnaningsih, 2010).

Lahan sayuran di DAS Brantas Hulu kota Batu terdeteksi pestisida POPs: lindan, heptaklor, klordan, endosulfan, toxapen, dieldrin, endrin, DDT dan Mirex. Beberapa lahan sudah tercemar khlordan, DDT, dieldrin, endrin, endosulfan, heptaklor, lindan dan mirex dengan luasan masing-masing 83; 88; 9966; 778; 4121; 18; 42; dan 10 ha (Balingtang, 2014).

Hasil identifikasi residu pestisida pada lahan pertanian sentral sayuran di 8 provinsi (Balingtang, 2015^b), sebagian lahan sayuran di provinsi Jawa Timur, Jawa Barat, Jawa Tengah dan Sumatera Barat terdeteksi residu pestisida organoklorin, organofosfat, herbisida dan fungisida. Residu insektisida organoklorin berbahan aktif endosulfan sudah mencemari sebagian lahan sayuran di provinsi Jambi, Nusa Tenggara Barat, Jawa Barat dan Jawa Tengah, sedangkan dieldrin mencemari sebagian lahan di provinsi Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur.

Residu pestisida organofosfat berbahan aktif diazinon sudah mencemari sebagian lahan sayuran di provinsi Sumatera Barat, Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur, sedangkan organofosfat berbahan aktif klorpirifos sudah mencemari sebagian lahan di Nusa Tenggara Barat. Lahan sayuran di provinsi Sumatera Utara, Jawa Barat dan Jawa Tengah sebagian sudah

tercemar residu herbisida bahan aktif glyfosat dan paraquat. Residu fungisida bahan aktif mankozeb sudah mencemari sebagian lahan sayuran di provinsi Sumatera Utara, Sumatera Barat, Jawa Barat dan Jawa Tengah, sedangkan fungisida bahan aktif propineb sudah mencemari sebagian lahan sayuran di propinsi Jawa Tengah (Balingtan, 2015^b).

Residu pestisida golongan organoklorin (klordan dan Dieldrin) dan golongan organoklorin (endosulfan, klordan dan dieldrin) sudah mencemari lahan pertanian di DAS Citarum hulu dengan konsentrasi residu yang terindikasi sudah melebihi batas maksimum residu di dalam tanah (Balingtan, 2018).

6.2.2. Tingkat pencemaran residu pestisida pada air

Sebagian besar sungai di negara-negara Asia Selatan telah terkontaminasi oleh residu pestisida, dan keberadaannya residu pestisida dengan bahan aktif *hexachlorocyclohexane* (HCH), *diklorodifeniltrikloroetana* (DDT), endosulfan, heptaklor, dan klorpirifos pada sungai sudah sangat umum dengan tingkat konsentrasi yang melebihi batas standar yang direkomendasikan (Sarker *et al.*, 2021). Keberadaan residu pestisida bahan aktif DDT yang banyak ditemukan pada perairan Negara China dan memberikan dampak yang sangat buruk pada biota yang hidup di dalamnya (Grung *et al.*, 2015). Sungai Gangga di India telah tercemar residu pestisida dengan bahan aktif lindan, DDT, HCH dan heptaklor (Shah dan Parveen, 2021)

Senyawa yang paling sering terdeteksi pada sungai-sungai di Yunani adalah atrazin, simazin, alaklor, metolaklor dan trifluralin dari herbisida, diazinon, parathion methyl dari insektisida dan lindane, endosulfan dan aldrin dari pestisida organoklorin. Konsentrasi residu pestisida di sungai-sungai Yunani meningkat pada area dengan penggunaan pestisida yang tinggi dan praktik pertanian yang intensif (Konstantinou *et al.*, 2006).

Perairan bertindak sebagai suatu tempat penampungan utama bagi residu pestisida. Masuknya residu pestisida ke dalam perairan melalui berbagai jalur, antara lain: akibat pemakaian langsung untuk membasmi hama tanaman, limpasan dari air persawahan, pencucian melalui tanah, curah hujan dan

penyerapan dari fase uap pada antara fase udara dan air, serta pemakaian langsung di sungai untuk meracun ikan.

Air sungai di Hulu DAS Brantas terdeteksi profenofos pada musim hujan sebesar 10,71 µg/L dan musim kemarau 6,79 µg/L; sedangkan pada air sumur sebesar 1,37 µg/L pada musim hujan dan 0,61 µg/L pada musim kemarau (Kusuma, 2009). Hasil identifikasi Balingtan (2013), persentase jumlah sampel terdeteksi POPs lindan sebesar 1,4% dan endosulfan 8,5% dari 71 lokasi pengambilan sampel, namun kadar pestisida tersebut masih di bawah BMR. Sedangkan senyawa POPs yang lain heptaklor, aldrin, dieldrin, DDT dan endrin tidak ditemukan dalam air.

Perairan Mlonggo yang merupakan kawasan perairan teluk yang terletak di Kabupaten Jepara terdeteksi residu pestisida klorpirifos (organofosfat) berkisar antara 0,0020 – 0,0028 ppm (Nugroho *et al.*, 2015). Air sungai dan saluran Sub DAS Brantas Hulu kota Batu terdeteksi pestisida lindan, endosulfan, khlordan, toxaphen, endrin, heptaklor dan mirex masing-masing sebesar 9; 8; 8; 7; 4; 2; dan 2 titik dari 9 titik pengambilan contoh (Balingtan, 2014). Kadar *polyaromatic hydrocarbon* (PAH) dalam air laut di Teluk Jakarta juga telah melebihi Nilai Ambang Batas yang ditetapkan oleh KMNLIH untuk biota laut, dan Nilai Ambang Batas untuk sedimen yang ditetapkan oleh *Handbook for Sediment Quality Assessment* (Ahmad, 2012).

6.2.3. Tingkat pencemaran residu pestisida pada tanaman

Residu pestisida dapat memberikan paparan secara langsung dan tidak langsung pada manusia. Orang yang berisiko tinggi terkena paparan langsung pestisida antara lain adalah pekerja di pabrik pembuatan pestisida, penjual dan petani, petani berisiko terkena paparan pestisida saat pencampuran dan penyemprotan (Aktor *et al.*, 2009). Paparan secara tidak langsung pada manusia didapat dari makanan, bahan makanan yang dikonsumsi manusia diharapkan terjaga kualitas dan keamanannya khususnya dari bahan pencemar seperti residu pestisida. Produk pertanian seperti tanaman pangan, hortikultura dan tanaman perkebunan di Indonesia saat ini telah terindikasi mengandung konsentrasi residu pestisida.

Beras di beberapa wilayah di Jombang juga tercemar pestisida organoklorin dimana persentase jumlah sampel yang tercemar lindan 7,4%; heptaklor 72,1%; aldrin 48,5%; dieldrin 4,4%; endosulfan 13,2%; DDT 8,8% dan endrin 10,3% dari 68 sampel (Balington, 2013). Pada sampel beras yang diperoleh dari beberapa petani dari Kecamatan Baebunta, Kabupaten Luwu Utara Provinsi Sulawesi Selatan terindikasi adanya residu pestisida klorpirifos dengan konsentrasi antara 0,133 – 0,380 mg/kg (Nurjannah *et al.*, 2020). Pada sampel beras yang diperoleh dari lahan sawah dengan perlakuan pestisida yang sering dilakukan petani di Kampung Sidomulyo Distrik Oransbari Kabupaten Manokwari selatan telah terindikasi konsentrasi residu pestisida permetrin, sipermetrin dan abamektin (Prabawardani *et al.*, 2020).

Pada tanaman hortikultura dan tanaman perkebunan juga telah tercemar residu pestisida di beberapa daerah di Indonesia. Pada perkebunan jeruk yang ditanam oleh petani di Kota Batu terdeteksi residu pestisida profenofos (Sumiati dan Julianto, 2019). Sedangkan sayuran wortel di kota Batu terdeteksi pestisida lindan, heptaklor, endosulfan, endrin dan DDT, demikian pula sayuran kentang juga terdeteksi lindan, endosulfan dan endrin dan terdapat beberapa sampel kadar pestisida sudah melebihi BMR (Balington, 2014). Pestisida golongan organoklorin, organofosfat, karbamat dan piretroid (heptaktor, aldrin, endosulfan, lindan, klorpirifos, profenofos, diazinon, monokrotofos, paration, karbofuran, dan Sipermatrin) terdeteksi dalam sayuran bayam, kangkung, sawi dan kacang panjang segar di sentra pemasaran Mardika dan Passo, Kota Ambon (Tuhumury *et al.*, 2012). Residu pestida profenofos juga ditemukan telah melebihi BMR pada sayuran selada yang ditanam di daerah Padang Luar, Kecamatan Banuhampu, Kabupaten Agam (Alen *et al.*, 2015). Pada buah anggur lokal yang dijual oleh pedagang buah eceran di sekitar Pasar Induk Kramat Jati, Jakarta juga terdeteksi adanya residu pestisida golongan organofosfat seperti diazinon, malation dan profenofos (Athennia dan Suparman, 2019). Pada perkebunan kakao yang terdapat di Desa Batok Kecamatan Gemarang Kabupaten Madiun terdeteksi deltametrin dan klorpirifos di atas BMR (Fitriadi dan Putri, 2019).

6.3. Tingkat Pencemaran Logam Berat

Tanah secara alami memiliki kandungan logam berat dengan konsentrasi yang sangat rendah. Kandungan logam berat pada tanah ini akan terakumulasi jika ada penambahan bahan kimia dari luar atau berasal dari proses antropogenik. Aplikasi penggunaan pupuk dan pestisida kimia pada lahan pertanian dan limbah pada air irigasi merupakan sumber utama logam berat dari proses antropogenik ke lahan pertanian (Hoe *et al*, 2014).

Penggunaan pupuk dan pestisida oleh petani tidak dapat dihindari sebagai upaya untuk meningkatkan hasil produksi pertaniannya tanpa mempertimbangkan akibat yang ditimbulkan pada tanah dan produk pertanian yang dihasilkan. Penggunaan bahan agrokimia yang tidak terkendali pada lahan pertanian terutama pada sayuran berdampak negatif antara lain meningkatnya resistensi hama atau penyakit tanaman, terbunuhnya musuh alami dan organisme yang berguna, serta terakumulasinya zat-zat kimia berbahaya dalam tanah (Charlene, 2004).

6.3.1. Tingkat pencemaran logam berat di lahan pertanian

Pada lahan pertanian di DAS Serayu ditemukan sejumlah sampel tanah tercemar logam berat Fe (0,1%) dan Mn (2,9%) serta defisiensi Mn (0,3%), Cu (2,8%) dan Zn (5,4%) dari total 685 sampel. Sedangkan logam berat Pb, Cd, Co, Ni dan Cr tidak terjadi cemaran meskipun terdeteksi pada beberapa area namun masih di bawah batas kritis logam berat (Balingtan, 2015^c).

Pada lahan pertanian di DAS Citarum (Kabupaten Bandung, Kabupaten Kerawang dan Bekasi) kandungan logam berat Pb, As, Ni dan Cr tidak terjadi cemaran meskipun terdeteksi namun masih di bawah batas kritis logam berat. Logam Cd baik di Kabupaten Bandung dan Kabupaten Kerawang-Bekasi ditemukan dengan konsentrasi berada pada kategori normal-toksik meskipun jumlahnya sedikit (Balingtan, 2018)

Pada sistem integrasi tanaman ternak di DAS Serang terdeteksi kandungan logam berat Cd sampel tanah dari Desa Noborejo Kecamatan Argomulyo Kabupaten Salatiga berkisar antara 0,11-4,42 mg/kg dan Desa Pilangpayung Kecamatan Toroh Kabupaten Grobogan 0,74-3,16 mg/kg, beberapa sampel untuk

masing-masing lokasi sudah berada dalam ambang batas, hal ini diduga adanya masukan SP-36 dan pupuk kandang yang tinggi pada beberapa lahan petani (Pramono, 2008).

Lahan persawahan di dekat kawasan industri di beberapa kota menunjukkan adanya pencemaran logam berat seperti lahan persawahan didekat kawasan industri di Kecamatan Rancaekek Kabupaten Bandung dan di kawasan Industri Kabupaten Sidoarjo. Lahan persawahan di Jelegong, Kecamatan Rancaekek, menunjukkan beberapa logam berat terdeteksi dalam konsentrasi yang cukup tinggi akibat terkena dampak limbah cair kawasan Industri tekstil. Kandungan logam berat yang tinggi adalah Cr (0,06-174,7 mg/l), As (0,28-4,0 mg/l) dan Hg (25,9 – 92,2 mg/l), Pb (0,05 – 11,7 mg/l), Cd (0,02 – 0,17 mg/l) (Komarawidjaja, 2017). Lahan persawahan didekat kawasan industri Sidoarjo terdeteksi mengandung logam berat berkisar: Pb (1,3-1,65 mg/kg), Cd (0,14-0,48 mg/kg), Hg (0,58-1,04 mg/kg), Zn (36,2-125,16 mg/kg), Cu (33,91-69,26 mg/kg), Mn (662,11-942,56 mg/kg), dan Fe (1342,72-1738,71 mg/kg) (Khasanah *et al.*, 2021).

6.3.2. Tingkat pencemaran logam berat di perairan

Air sungai, saluran dan tanah di DAS Citarum Hulu, terdeteksi adanya logam Pb dan Cd dalam air, konsentrasi minimum logam Pb dan Cd dalam air sebesar 0,01 mg/L, sedangkan konsentrasi maksimum 2,02 dan 5,03 mg/L. Logam Pb dan Cd juga terdeteksi di dalam tanah dengan konsentrasi minimum masing-masing 1,17 dan 0,28 ppm, dan konsentrasi maksimumnya 17,8 dan 9,50 ppm. Keberadaan Cd dalam tanah sudah masuk rentang batas kritis sehingga perlu tindakan remediasi untuk menekan terangkutnya logam tersebut dalam jaringan tanaman (Hikmat, 2012).

Pada air sungai Citarum terdeteksi kandungan logam berat Pb, Ni dan As dengan konsentrasi lebih rendah daripada baku mutu sehingga masih layak untuk digunakan sebagai air irigasi, dan dimanfaatkan oleh masyarakat sekitarnya (Balington, 2018). Kondisi perairan Sungai Siak dalam wilayah administrasi Kota Pekanbaru telah berada dalam taraf yang mengkhawatirkan dengan estimasi total beban pencemar logam Pb, Cu dan Zn yang sangat tinggi. Beban pencemar logam Pb merupakan logam yang

memiliki beban pencemar tertinggi yaitu sebesar 889,55 ton/bulan yang diikuti dengan beban pencemar logam Zn sebesar 737,10 ton/bulan dan beban pencemar logam Cu sebesar 726,37 ton/bulan (Agustina *et al.*, 2012).

Kandungan logam yang terdapat di dalam air tanah pada Kecamatan Kubu Babussalam, Rokan Hilir, Riau terdeteksi logam berat Pb, Cu, Fe, Cd dan Cr, konsentrasi logam berat Pb dan Fe telah melebihi baku mutu (Putra dan Mairizki, 2020).

6.3.3. Tingkat pencemaran logam berat pada tanaman

Pemberian pestisida, pupuk organik dan kombinasinya dapat meningkatkan akumulasi logam berat pada tanah dan tanaman. Tanaman kentang (*Solanum tuberosum L.*) yang dibudidayakan dengan aplikasi pestisida dan pupuk organik mengalami peningkatan kandungan logam Cr sejak bulan ke-1 dan akan semakin bertambah disemua bagian tanaman (Manurung *et al.*, 2018).

Pada beberapa sampel beras dan sayuran yang ditanam di lahan pertanian DAS Citarum (Kabupaten Bandung, Kabupaten Kerawang dan Bekasi) mengandung logam berat Pb dan Cd yang telah melebihi baku mutu yang telah ditentukan. Sehingga perlu upaya penurunannya agar beras dan sayuran tersebut layak untuk dikonsumsi (Balingtan, 2018). Kandungan logam berat Pb juga ditemukan pada seluruh sampel beras yang diambil dari sawah di Kabupaten Wonosobo dengan konsentrasi kurang dari baku mutu (Mellyga *et al.*, 2016). Pada beras yang ditanam pada lahan sawah Kabupaten Jombang terdeteksi mengandung logam berat Pb, Cr, Cu, Co, Mn, Zn, Fe dengan konsentrasi di bawah baku mutu (Sukarjo *et al.*, 2019).

Pada beras kurmo, beras setra, dan kedelai yang dijual di wilayah kota Bandung terdeteksi kandungan Cr, Co, Zn, dan Hg tetapi secara keseluruhan masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan (Yatu *et al.*, 2011).

Analisis logam berat pada beras yang ditanam di daerah industri karet Mekar Jaya terdeteksi logam berat Cu dan Fe, logam berat Cu masih berada dalam batas aman sedangkan logam Fe telah melebihi batas aman yang ditetapkan (Rasydy dan Sylvia, 2021).

Buah pisang dan pepaya yang ditanam pada lahan perusahaan bekas tambang batubara Desa Embalut Kutai Kertanegara menunjukkan pencemaran logam berat Pb yang melebihi baku mutu 0,5 mg/kg, sehingga buah tersebut berbahaya bilamana dikonsumsi manusia (Sarief, 2019).

BAB VII

TEKNOLOGI ADAPTASI DAN MITIGASI PERUBAHAN IKLIM PADA SEKTOR PERTANIAN

*Terry Ayu Adriany, Hesti Yulianingrum, Rina Kartikawati,
Ali Pramono*

Pemerintah Indonesia telah berkomitmen untuk berkontribusi dalam mendukung upaya global dalam penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) tahun 2030 sebesar 29% melalui upaya sendiri (*unconditional*) dan 41% dengan dukungan kerjasama internasional (*conditional*), yang sesuai dengan Kesepakatan Paris. Komitmen tersebut dituangkan dalam *nationally determined contribution (NDC)*. Salah satu sektor yang berkontribusi dalam pencapaian target NDC adalah pertanian. Sektor pertanian mempunyai posisi yang strategis karena aksi yang dilakukan dalam penurunan emisi harus sejalan dan tidak bertentangan dengan kegiatan/program yang dilakukan dalam pencapaian pemenuhan kebutuhan pangan domestik, nasional, dan global. Sektor pertanian sekaligus berperan penting dalam ketahanan ekonomi dan sosial nasional. Oleh karena itu, langkah adaptasi menjadi pokok utama yang dilakukan, mengingat sektor pertanian menjadi bagian dari sektor yang terdampak dari perubahan iklim dan mitigasinya merupakan keuntungan tambahan yang diperoleh dari dilakukannya kegiatan adaptasi.

7.1. Teknologi Adaptasi Perubahan Iklim

Adaptasi merupakan usaha untuk pengembangan pola pembangunan yang tahan terhadap dampak perubahan iklim dan anomali iklim yang terjadi (Ridwan dan Chazanah, 2013). Adaptasi berperan dalam mengurangi dampak negatif yang muncul akibat perubahan iklim yang tidak dapat dilakukan oleh

upaya mitigasi. Dampak negatif perubahan iklim yang terjadi pada sektor pertanian yaitu kerusakan (degradasi) sumberdaya lahan, ekosistem, air dan infrastruktur pertanian, penurunan produksi dan produktivitas tanaman. Kondisi tersebut dapat menyebabkan kerentanan dan kerawanan terhadap ketahanan pangan hingga kemiskinan pangan.

Pemerintah memfasilitasi upaya adaptasi perubahan iklim melalui Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim (RAN-API), yang merupakan bagian dari kerangka pembangunan nasional Indonesia. RAN-API memberikan arahan pada Rencana Kerja Pemerintah dan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN), serta menjadi acuan bagi pemerintah daerah dalam menyusun Strategi atau Rencana Aksi Daerah Adaptasi Perubahan Iklim sebagai arahan dalam menyiapkan dokumen perencanaan pembangunan yang tahan perubahan iklim. Sasaran RAN-API diarahkan untuk membangun ketahanan ekonomi, tatanan kehidupan sosial yang tangguh terhadap perubahan iklim, menjaga ketahanan ekosistem, penguatan ketahanan wilayah, sistem pendukung baik data dan informasi maupun peningkatan kapasitas riset dan pengembangan (Bappenas, 2014).

Strategi adaptasi dilakukan dengan penyesuaian sistem alam dan sosial ekonomi untuk menghadapi dampak negatif dari perubahan iklim akibat pemanasan global. Kemampuan adaptasi terhadap perubahan iklim dilakukan dengan cara mengurangi kerusakan yang muncul pada lingkungan. Strategi adaptasi yang dapat dilakukan dibagi menjadi dua kegiatan yaitu kegiatan yang bersifat struktural dan non-struktural. Kegiatan struktural yaitu kegiatan yang meningkatkan ketahanan sistem produksi pangan dari dampak perubahan iklim melalui upaya perbaikan kondisi fisik dan infratraktur, seperti pembangunan dan perbaikan jaringan irigasi, waduk, embung dan dam. Kegiatan yang bersifat non-struktural yaitu melalui pengembangan teknologi budidaya yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim, penguatan kelembagaan dan peraturan, pemberdayaan petani dalam memanfaatkan informasi iklim untuk mengatasi dan mengantisipasi anomali iklim ekstrim (FAO, 2012).

Upaya adaptasi dilakukan Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pertanian pada sektor pertanian melalui pedoman umum adaptasi perubahan iklim di sektor

pertanian secara konseptual yaitu (1) optimalisasi pengelolaan sumberdaya lahan dan air/irigasi; (2) penyesuaian pengelolaan pola dan waktu tanam, rotasi tanaman dan varietas; (3) pengembangan teknologi adaptif serta penyusunan berbagai pedoman/*tool*; (4) penerapan teknologi adaptif (produksi, perlindungan tanaman, panen, dan pasca-panen) dan ramah lingkungan (Balitbangtan, 2011).

7.1.1. Optimalisasi pengelolaan sumberdaya lahan dan air

Maraknya alih fungsi lahan dan semakin sempitnya lahan pertanian memacu pengelolaan pada lahan suboptimal yang belum dimanfaatkan secara optimal untuk pertanian yang berkelanjutan. Lahan suboptimal seperti lahan kering, lahan rawa, lahan sulfat masam yang memiliki produktivitas tanaman pertanian yang relatif rendah. Lahan suboptimal tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumberdaya lahan pertanian masa depan. Diperlukan usaha konservasi lahan tersebut sehingga memberikan aspek penting, utamanya untuk pengembangan pertanian tanaman pangan sebagai penopang kehidupan berbagai masyarakat, dengan tetap menjaga peranannya sebagai stabilisasi dan peningkatan fungsi ekosistem. Optimalisasi pengelolaan sumberdaya lahan dan air bertujuan untuk meningkatkan produksi dan produktivitas tanaman pertanian (Balitbangtan, 2011).

Pemanfaatan sumberdaya air harus dilakukan yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan air dan ketahanan pangan dengan membangun banyak bendungan yang berperan sebagai penampung air pada saat musim hujan sehingga dapat menyediakan air pada musim kemarau. Pembangunan bendungan, dam parit, embung (pemanen air) akan berkontribusi terhadap peningkatan produksi tanaman. Adanya ketersediaan sumberdaya air yang cukup pada musim kemarau akan meningkatkan indeks pertanaman (IP), yang pada awalnya IP-100 atau IP-200 menjadi IP-300 (Sutrisno dan Hamdani, 2020). Keuntungan embung dan parit sebagai upaya antisipasi perubahan iklim adalah untuk menyimpan air yang melimpah pada musim hujan sehingga aliran permukaan air, erosi dan bahaya banjir dapat dikurangi dan dapat dimanfaatkan pada

musim kemarau. Selain itu, juga dapat menunjang pengembangan sistem pertanian di lahan kering, sarana pengembangan usaha tani di subsektor perikanan dan peternakan serta dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan air rumah tangga (Gambar 15).



Gambar 15. Embung sebagai penyedia kebutuhan air di musim kemarau

Sumber: Foto arsip Balingtan

Upaya mengatasi kekeringan akibat perubahan iklim dapat dengan mengembangkan teknologi irigasi untuk mengefisiensikan penggunaan air. Beberapa teknologi yang dapat digunakan antara lain sumur renteng, irigasi kapiler, irigasi tetes, irigasi semprot, irigasi parit, irigasi macak macak di lahan sawah, irigasi berselang dan irigasi bergilir (Balitbangtan, 2011). Penerapan teknik irigasi bertujuan untuk memenuhi kebutuhan air tanaman pada kondisi ketersediaan air yang terbatas dan meningkatkan efisiensi penggunaan air (Surmaini *et al.*, 2011). Selain menghemat penggunaan air, pengaturan irigasi lahan dapat menurunkan emisi GRK pada lahan padi sawah. Hasil penelitian Balai Penelitian Lingkungan Pertanian dengan perlakuan basah kering (*alternate wetting and drying, AWD*) pada lahan sawah dapat menurunkan emisi CH_4 , apalagi dipadukan dengan

penggunaan varietas padi seperti varietas Ciherang, Inpari 32, and Mekongga yang masing-masing juga menurunkan emisi CH₄ sebesar 23%, 46% dan 6% (Pramono *et al.*, 2020).

7.1.2. Penyesuaian pola dan waktu tanam, rotasi tanam, dan pemilihan varietas

Perubahan iklim berdampak terhadap anomali cuaca yang dapat merubah intensitas curah hujan dapat meningkat ataupun menurun. Perubahan intensitas curah hujan ini akan membuat lahan budidaya lebih rawan terhadap cekaman kekeringan ataupun cekaman genangan. Adanya perubahan iklim menyebabkan pergeseran pola hujan yang akan mempengaruhi sumberdaya dan infrastruktur pertanian sehingga menyebabkan terjadinya pergeseran waktu tanam, musim, dan pola tanam. Penyesuaian pola dan waktu tanam merupakan upaya yang strategis untuk mengurangi dampak perubahan iklim akibat pergeseran musim dan perubahan pola hujan (Surmaini *et al.*, 2011). Teknologi yang dapat digunakan untuk penyesuaian pola dan waktu tanam dengan menggunakan peta kalender tanam. Peta kalender tanam ini disusun untuk menggambarkan potensi pola tanam dan waktu tanam terutama tanaman pangan berdasarkan potensi sumberdaya iklim dan air (Las *et al.*, 2007).

Selain menyesuaikan pola dan waktu tanam, melakukan rotasi tanaman merupakan salah satu usaha untuk membuat struktur tanah menjadi lebih baik, memperbaiki drainase, mengurangi aliran permukaan (*run off*) dan meningkatkan ketersediaan air tanah. Rotasi tanaman juga dapat mengendalikan gulma dan serangan hama penyakit tanaman sehingga dapat menurunkan penggunaan pestisida kimia. Selain itu, juga dapat memperbaiki sifat kimia, fisik dan biologi tanah (Suprihatin dan Amirullah, 2018). . Rotasi tanam antara tanaman padi dengan tanaman palawija maupun hortikultura merupakan salah alternatif yang bijak untuk tetap mempertahankan produktivitas, kesuburan tanah, dan perekonomian petani. Hasil penelitian dengan rotasi tanaman padi dengan palawija dapat memperbaiki struktur tanah sawah (Chen *et al.*, 2012).

Salah satu teknologi lain untuk mengatasi permasalahan yang ditimbulkan dari dampak perubahan iklim adalah melalui

penggunaan varietas unggul baru. Teknologi ini merupakan teknologi yang murah dan mudah diterapkan oleh petani dan tidak menimbulkan kerusakan pada lingkungan. Penggunaan varietas unggul baru yang dapat digunakan untuk adaptasi cekaman lingkungan (faktor biotik dan abiotik) akibat dampak perubahan iklim serta dapat mempertahankan atau meningkatkan produksi tanaman. Varietas unggul baru seperti padi, kedelai, kacang tanah, jagung, gandum, dan sorgum dengan memanfaatkan sumberdaya genetik yang unggul sehingga memberikan banyak pilihan bagi petani dalam mempercepat upaya peningkatan produksi menuju swasembada pangan berkelanjutan. Varietas unggul tersebut juga diharapkan toleran kekeringan dan genangan, berumur genjah, dan toleran salinitas serta menghasilkan emisi GRK yang rendah.

Badan Litbang Pertanian mengembangkan varietas unggul padi sebagai komoditas utama pertanian dengan beberapa varietas unggul yang toleran terhadap kekeringan antara lain Inpari 18, Inpari 19, Inpari 20, Inpago 4, Inpago 5, Inpago 6, Inpago 8 dan Inpago Lipigo 5. Varietas unggul yang toleran terhadap rendaman antara lain Inpari 29, Inpari 30, Inpara 4, Inpara 5. Varietas tahan salinitas antara lain Inpari 34, Inpari 35 dan Inpara 5. Varietas unggul tahan hama wereng coklat dan penyakit hawar daun antara lain Inpari 13, Inpari 18, Inpari 19, dan Inpari 20. Varietas lain yang tahan penyakit tungro yaitu Inpari 9 Elo. Varietas tahan penyakit blas yaitu Inpari 15 parahiyangan serta varietas tahan hawar daun Inpari 28 Kerinci (BB Padi, 2016).

Hasil penelitian pada kondisi media tanam dengan salinitas 4000 ppm/l, varietas IR 64 cenderung lebih adaptif dibandingkan dengan varietas Ciherang, Inpari 11, IRBB-27 dan Inpara (Jalil *et al.*, 2016). Varietas Sintanur dan Ciherang sangat berpotensi untuk dikembangkan sebagai varietas tahan kekeringan dengan indeks sensitivitas kekeringan 2,1-2,5 dan mudah beradaptasi dengan lingkungan dengan indeks adaptasi 1,16 -1,29 (Ruminta *et al.*, 2016). Varietas padi yang memiliki ketahanan terhadap hawar daun bakteri (HDB) patotipe III adalah HIPA 9, 10, 11, 12, 13, 14, dan HIPA Jatim 2 (Jamil *et al.*, 2016). Hasil penelitian pada varietas padi Hitam Gagak dan Pandan Wangi termasuk dalam varietas tahan terhadap patogen *Cercospora oryzae* yang menyebabkan

penyakit bercak daun coklat, sedangkan IR64, Inpari 4, Sunggal serta Ciherang termasuk dalam varietas yang rentan (Lakshita *et al.*, 2019). Selain varietas tahan salin, kekeringan dan penyakit tanaman, Balai Penelitian Lingkungan Pertanian memiliki hasil pengukuran emisi GRK dari beberapa varietas unggul Badan Litbang. Hasil penelitian varietas padi Inpari 13 dan Mekongga mengemisikan GRK dengan *global warming potential (GWP)* yang rendah masing-masing sebesar 10,3 ton CO₂ e ha⁻¹ dan 12,8 ton CO₂ e ha⁻¹ dibandingkan 6 varietas lain yang diujikan seperti Ciherang, Inpari 18, Inpari 31, Inpari 32, inpari 33 dan IPB 3S (Kartikawati *et al.*, 2017). Hasil peneliian pada varietas padi hibrida yaitu Arize Gold, Mapan 05, Hipa 8, Hipa 19, Hipa 18, Sembada 168 dan Sembada 989 menghasilkan emisi metana yang lebih tinggi dibandingkan varietas padi inbrida Ciherang. Hasil perhitungan emisi CH₄ dari tujuh varietas padi hibrida yang diujikan, varietas Sembada 168 memiliki emisi metana yang lebih rendah dibandingkan varietas hibrida lainnya (Kartikawati *et al.*, 2019).

7.1.3. Teknologi adaptif serta penyusunan berbagai pedoman/tool

Peta kalender tanam dikembangkan berbasis *online* menjadi Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu (Katam Terpadu). Katam Terpadu yang sampai saat ini sudah memasuki versi 3.1 menampilkan data yang lebih mudah dipahami dan dapat diakses dimana saja karena berbasis android (Gambar 16).



Gambar 16. Sistem Informasi Katam Terpadu

Sumber: katam.litbang.pertanian.go.id

Katam Terpadu ini memberikan informasi mengenai, informasi musim tanam dan komoditas, perkiraan waktu tanam, luas baku sawah dan potensi luas tanam. Data yang ditampilkan dari level nasional, provinsi, kabupaten hingga kecamatan.

Manfaat dari penggunaan Katam Terpadu antara lain digunakan sebagai referensi dalam menentukan waktu tanam setiap musim tanam, sebagai pedoman dalam menentukan pola tanam yang digunakan dengan referensi teknologi (varietas dan pupuk) pada skala kecamatan, dapat digunakan sebagai prediksi dari potensi luas tanam untuk mendukung sistem perencanaan tanam dan produksi tanaman pangan, mengurangi risiko penurunan dan kegagalan produksi akibat kebanjiran, kekeringan dan serangan organisme pengganggu tanaman (OPT).

Penentuan pola dan waktu tanam yang tepat dapat mendukung keberlangsungan sistem pertanian di masa depan. Teknologi ini juga dapat membantu petani memperoleh informasi yang tepat dan dapat mengambil keputusan yang tepat dalam menjalankan usahatani. Tantangan perubahan iklim akan menyebabkan penggunaan Katam Terpadu akan memberi manfaat dalam mendukung peningkatan produksi tanaman. Penanaman dapat dilakukan sesuai dengan waktu yang tepat sehingga produksi tetap terjaga.

Selain Katam Terpadu, pengembangan integrasi sekolah lapang iklim (SLI) ke dalam Sekolah Lapang Pengelolaan Tanaman Terpadu (SLPTT) dan Sekolah Lapang Pengendalian Hama Terpadu (SLPHT) juga dapat dilakukan di tingkat daerah untuk memberdayakan petani dalam memilih dan menerapkan teknologi budidaya yang disesuaikan dengan kondisi iklim. Program tersebut diharapkan akan lebih terstruktur dengan penyelarasan penelitian aksi teknologi pemanfaatan informasi iklim dengan pengembangan modul, target penyediaan tenaga penyuluh yang memahami dengan baik pengetahuan iklim dan teknologi pemanfaatan informasi iklim, disertai pengembangan kurikulum SL yang lebih terintegrasi (Balitbangtan, 2011).

7.1.4. Penerapan teknologi adaptif dan ramah lingkungan

Badan Litbang Pertanian melalui unit pelaksana teknis Balai Penelitian Lingkungan Pertanian telah mengembangkan

teknologi adaptasi perubahan iklim dengan pengelolaan yang tepat, yaitu sistem integrasi tanaman-ternak (SITT) *zero waste* yang tidak hanya meningkatkan pendapatan petani, tetapi juga menekan emisi gas CH_4 , N_2O dan CO_2 dari lahan sawah. Selain sebagai upaya adaptasi, SITT *zero waste* dipandang sebagai *co-benefit* dari aksi adaptasi berupa aksi mitigasi. Ciri utama integrasi tanaman ternak adalah adanya sinergi yang saling menguntungkan antara tanaman pertanian ataupun perkebunan dengan ternak. Petani memanfaatkan kotoran ternak sebagai pupuk organik untuk pertumbuhan tanaman, limbah pertanian dimanfaatkan sebagai pakan ternak hingga tidak ada sisa limbah yang tidak dimanfaatkan (Hendrickson *et al.*, 2008). Pemanfaatan kotoran ternak selain sebagai pupuk organik juga dapat menghemat penggunaan pupuk anorganik, memperbaiki struktur dan ketersediaan unsur hara tanah sehingga dapat meningkatnya produktivitas lahan dan menciptakan sistem pertanian yang berkelanjutan serta ramah lingkungan. Penerapan SITT di tingkat petani juga merupakan cara petani untuk merespon terhadap faktor risiko yang harus dihadapi petani dengan adanya ketidakpastian dalam berusaha tani akibat adanya perubahan iklim yang terjadi.

Hasil penelitian Susilawati *et al.* (2021) dengan sistem integrasi tanaman padi dan hewan ternak sapi dapat mengurangi emisi GRK dari padi sawah sekitar 23,2–32,0% dan mampu meningkatkan hasil padi sekitar 2,2–27,7% dibandingkan dengan konvensional petani. Penerapan SITT, pemanfaatan kotoran hewan ke dalam biodigester anaerobik mampu mengurangi pelepasan CH_4 ke atmosfer dan menghasilkan gas CH_4 untuk substitusi energi sebagai bahan bakar alternatif. Peningkatan kualitas lahan juga mengalami peningkatan dengan meningkatnya C organik dan KTK tanah dengan memberikan pupuk pakan sapi yang ditambahkan ke lahan. Selain itu, penerapan SITT mampu meningkatkan B/C rasio dibandingkan pengelolaan lahan konvensional petani. Model SITT ramah lingkungan yang adaptif terhadap perubahan iklim dapat dilihat pada Gambar 17. Sistem tersebut merupakan sistem tertutup agar karbon tidak terlepas ke atmosfer bumi dan dapat dimanfaatkan seefisien mungkin dengan

konsep *zero waste*. Pemanfaatan biogas sangat penting karena dalam biogas gas CH_4 dapat dikelola sehingga tidak teremisikan ke atmosfer. Gas yang dikeluarkan dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam rumah tangga sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar dari fosil (minyak tanah, batu bara dll). Limbah biogas, yaitu kotoran ternak yang telah hilang gasnya (*slurry*) merupakan pupuk organik yang sangat kaya akan unsur-unsur yang dibutuhkan oleh tanaman. Bahkan, unsur-unsur tertentu seperti protein, selulose, lignin, dan lain-lain tidak bisa digantikan oleh pupuk kimia. Pupuk organik dari biogas telah dicobakan pada tanaman jagung, bawang merah dan padi.



Gambar 17. Model SITT di lahan tadah hujan

Sumber: Wihardjaka *et al.*, 2018 yang dimodifikasi

7.2. Teknologi Mitigasi di Sektor Pertanian

Peluang mitigasi GRK di sektor pertanian meliputi: 1) Pengurangan emisi melalui pengelolaan aliran karbon dan nitrogen yang lebih efisien dalam ekosistem pertanian, 2) Mengurangi karbon atmosfer melalui peningkatan produksi biomasa dan penyerapan karbon tanah, dan 3) Mencegah emisi

melalui produksi bioenergi dengan memanfaatkan tanaman dan limbah (Biala, 2011).

Lahan sawah mempunyai peran yang sangat penting dalam pemenuhan pangan nasional. Dengan luas sekitar 7,46 juta ha, lahan sawah harus mampu memenuhi pangan bagi 270,2 juta jiwa penduduk Indonesia (BPS, 2021). Seiring dengan peran strategisnya, lahan sawah juga memiliki peran yang tidak kalah penting, yaitu sebagai bagian dari upaya mitigasi emisi gas rumah kaca. Lahan sawah yang selalu tergenang merupakan sumber gas metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Dengan pengelolaan tanaman yang tepat, emisi GRK dari lahan sawah dapat ditekan. Beberapa teknologi yang dapat mengurangi emisi GRK dari lahan sawah adalah teknologi hemat air, pemanfaatan varietas padi yang mengemisi rendah CH_4 , pemupukan dan ameliorasi, pengelolaan bahan organik, metode tanam.

7.2.1. Teknologi pengairan hemat air

Praktek pengelolaan air tradisional pada budidaya padi sawah di Negara Asia Tenggara adalah sistem tergenang yang cocok bagi produksi CH_4 pada kondisi tanah *anaerobic* (Bachelet dan Neue, 1993). Air merupakan kebutuhan utama dalam budidaya tanaman padi, namun tidak semua fase pertumbuhan padi membutuhkan air yang berlimpah. Adakalanya padi membutuhkan air dalam jumlah yang banyak, yaitu pada saat fase pembentukan anakan dan pengisian bulir malai, dan pada saat tertentu tanah dibiarkan dalam kondisi macak-macak untuk menciptakan kondisi kaya oksigen sehingga akar dapat berespirasi dan makroorganisme penyubur tanah dapat beraktivitas meningkatkan kesuburan tanah. Pengaturan air selain berpengaruh terhadap hasil padi juga berpengaruh pada besarnya emisi gas CH_4 . Pada kondisi tergenang emisi gas CH_4 lebih tinggi daripada kondisi kering. Hal ini disebabkan kondisi tergenang merupakan kondisi yang ideal untuk metanogen dalam melakukan aktivitas metabolismenya untuk menghasilkan gas CH_4 (Conrad, 2002).

Upaya menekan besarnya emisi gas CH_4 dari sistem pengairan selain dapat menurunkan emisi gas CH_4 juga dapat menghemat penggunaan air yang berlebihan. Beberapa alternatif

praktek penanaman benih langsung pada kondisi kering juga dapat dilakukan untuk mengatasi krisis air (Haque *et al.*, 2021). Pengeringan lahan sementara dalam budidaya padi seperti *single drainage* atau *multiple drainage* dapat mengurangi CH₄ secara signifikan (Wassmann *et al.*, 2000). Namun, beberapa literatur menunjukkan terdapat peningkatan emisi N₂O selama pengeringan lahan. Pengaturan air dengan pengeringan di tengah musim (*mid-season drainage*) dan *alternate wetting and drying* (AWD) juga berpotensi sebagai aksi mitigasi pada lahan sawah (Sander *et al.*, 2015; Setyanto *et al.*, 2018). Hasil penelitian AWD di Indonesia menunjukkan penurunan emisi GRK sebesar 34-37% (Tabel 14) dan menghemat air 10-20% dibandingkan perlakuan tergenang.

Tabel 14. Emisi CH₄ dari perlakuan AWD selama enam musim

Musim	CH ₄ kg ha ⁻¹						Rata-rata musim
	CF		AWD		AWDS		
MH 2013	250	a	160	a	159	a	190 D
MK 2014	300	a	167	a	253	a	240 CD
MH 2014	597	a	323	ab	221	b	380 B
MK 2015	432	a	303	b	236	b	324 BC
MH 2015	699	a	539	a	553	a	597 A
MH 2016	425	a	260	b	244	b	340 BC
Rata-rata perlakuan	450	A	292	B	278	B	
Penurunan CH ₄ (%)			34.5		37.6		

Keterangan: Huruf yang sama pada kolom dan baris antarmusim menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%, CF=Tergenang; AWD = AWD 15 cm; AWDS = AWD 25 cm

Sumber: Setyanto et al., 2018

Mekanisme penekanan emisi CH₄ pada pengeringan sementara tidak terlepas dari penciptaan kondisi aerob pada tanah sawah. Pada kondisi ini, terjadi oksidasi CH₄ menjadi CO₂ oleh bakteri metanotrof yang dapat mencapai 80 % dari CH₄ yang diproduksi oleh archaea metanogen. Oksidasi CH₄ dilakukan oleh berbagai macam bakteri metanotrof seperti: *Methylobacter luteus*,

Methylosinus trichosporium, *Methylococcus capsulatus*. Bakteri metanotrof membutuhkan CH_4 sebagai sumber karbon dan energinya, dan mengurainya menjadi unsur lain yang tidak berbahaya. Selain mengurangi CH_4 , bakteri ini juga bisa memfiksasi gas nitrogen menjadi amonium yang dibutuhkan oleh tanaman. Bakteri metanotrof yang digunakan pada lahan sawah intensif, selain membantu mengurangi emisi gas metan ke udara, juga dapat meningkatkan produktivitas padi.

Kendala penerapan opsi pengaturan air adalah bahwa produktivitas padi yang tidak meningkat pada kondisi kesuburan tanah dan agronomis tertentu. Pengeringan lahan dalam waktu lebih panjang justru akan menurunkan hasil gabah. Opsi pengaturan air terbatas pada lahan yang tertata jaringan irigasinya sehingga air tersedia bila diperlukan. AWD efektif diterapkan hanya pada musim kering (Sander *et al.*, 2017). Disamping itu, kendala lain adalah ketika opsi pengaturan air ini menjadi tidak menarik petani jika biayanya lebih mahal.

7.2.2. Pemilihan varietas padi beremisi rendah

Salah satu komponen penting dalam budidaya padi adalah pemilihan varietas yang tepat, artinya varietas yang digunakan sesuai dengan ekosistemnya sehingga produksi padi dapat optimal. Namun sebagian besar pemilihan varietas padi yang dilakukan oleh petani lebih berdasarkan pada permintaan pasar sehingga terkadang hanya varietas-varietas tertentu yang ditanam oleh petani meskipun pemerintah telah merilis banyak varietas unggul baru. Pemerintah Indonesia baik melalui Kementerian Pertanian (Kementan), perusahaan swasta maupun perguruan tinggi telah merakit varietas padi dengan keunggulan tertentu seperti produksi tinggi, tahan genangan air, tahan kekeringan, tahan salinitas tinggi, tahan serangan OPT dan penyakit tertentu serta varietas yang mengandung nutrisi esensial tertentu. Perakitan varietas padi unggul yang “cerdas” saat ini diharapkan tidak hanya fokus pada peningkatan produktivitas dan kondisi lingkungan khusus namun juga harus mulai dirakit varietas yang “rendah emisi GRK”. Istilah ini disebutkan untuk varietas padi yang mengeluarkan emisi gas metana lebih rendah dari varietas

lainnya yang ditanam pada kondisi optimum pembentukan gas metana, yaitu keadaan tergenang.

Tanaman padi dianggap sebagai kontributor dalam pelepasan emisi gas metana karena perannya sebagai penyedia substrat bagi mikroorganisme penghasil gas metana dan perantara lepasnya gas metana dari dalam tanah ke atmosfer melalui aerenkhima. Beberapa studi yang dilakukan menyebutkan bahwa emisi gas metana yang dikeluarkan oleh tanaman padi berkaitan dengan jumlah anakan, biomassa atas dan biomassa bawah, eksudat akar dan aerenkhima akar. Namun dari tanaman padi itu sendiri mempunyai peluang untuk dirakit karakteristik-karakteristik tertentu sehingga mampu mengurangi emisi gas metana yang dilepaskan ke atmosfer. Salah satu karakteristik yang paling menonjol adalah umur tanaman (Aulakh *et al.*, 2002). Hampir 90% gas metana dilepaskan melalui tanaman padi sehingga lama periode tumbuh berpengaruh terhadap akumulasi gas metana yang dilepaskan. Hal ini dapat dikatakan bahwa varietas padi umur genjah menghasilkan emisi gas metana lebih sedikit dibandingkan dengan varietas padi umur dalam. Jiang *et al.* (2016) menyebutkan lebih lanjut terkait dengan varietas yang didesign dengan malai yang lebih besar. Sifat ini sangat bermanfaat selain bagi peningkatan hasil juga pengurangan emisi metana. Hal ini bisa terjadi karena fotosintat sebagian besar akan dialokasikan pada bagian malai sehingga mengurangi porsi fotosintat yang disalurkan pada akar. Dengan demikian dapat mengurangi suplai bahan makanan bagi metanogen.

Bagian tanaman yang tidak kalah pentingnya dalam transportasi gas metana adalah akar. Akar memberikan koneksi langsung antara bagian atas tanaman dan mikroorganisme yang berkaitan dengan produksi gas metana. Das dan Baruah (2008) mengatakan bahwa akar menjadi jalur dominan dari pelepasan gas metana dalam tanah, yaitu sekitar 80-90%. Menurut Chen *et al.* (2019), sifat morfologi dan fisiologi akar ternyata mempunyai peran yang penting dalam pengaturan produksi gas metana. Sistem perakaran yang luas memungkinkan tersedianya banyak oksigen yang dapat dimanfaatkan oleh bakteri metanotrof. Pada kondisi ini, asam-asam amino seperti *malic acid*, *citric acid* dan

succinic acid pada eksudat akar tersedia dan digunakan oleh bakteri metanotrof sebagai sumber makanannya. Selain itu sistem perakaran yang kuat dapat meningkatkan lingkungan yang sesuai bagi bakteri metanotrof dan mengurangi emisi metana serta meningkatkan hasil tanaman. Aktivitas perakaran dapat ditingkatkan melalui pemberian pupuk yang mengandung unsur nitrogen pada fase awal pembentukan malai sehingga dapat dikatakan bahwa dua hal penting yang berkaitan dengan pengurangan emisi metana adalah melalui pemilihan varietas yang mempunyai sistem perakaran kuat dan pemberian pupuk nitrogen pada fase inisiasi malai. Selanjutnya Chen *et al.* (2021) menyebutkan bahwa varietas padi yang mempunyai keunggulan penggunaan nitrogen secara efisien dapat mengalokasikan fotosintat untuk proses pembentukan organ dan jaringannya sehingga turut menciptakan perakaran yang kuat serta mengurangi terhambatnya ketersediaan nitrogen pada proses metanotrof. Hal ini dapat mendorong rendahnya emisi metana dan dapat meningkatkan produksi tanaman.

Pemilihan varietas padi yang mampu mengurangi emisi gas metana tidak hanya berkaitan dengan sifat morfologi dan fisiologi varietas tersebut secara langsung namun juga dapat dilakukan melalui pendekatan asosiasi varietas padi dengan mikroorganisme penghasil gas metana. Fernández-Baca *et al.* (2021) menyebutkan bahwa genotip tanaman padi mempunyai peran yang penting bagi mikroorganisme selama fase reproduktif (bunting dan munculnya malai) sampai fase pematangan (pengisian malai dan gabah matang penuh). Emisi gas metana berfluktuasi pada fase-fase tersebut, yaitu rendah pada fase bunting, tinggi pada fase munculnya dan pengisian malai dan akan menurun kembali pada fase pematangan. Fluktuasi gas metana ternyata berasosiasi dengan perubahan struktur komunitas mikroorganisme pada perakaran, yaitu pada beberapa bakteri pengoksidasi metana dan bakteri pendaur sulfur.

Tanaman padi menjadi penyumbang emisi metana lebih besar hanya pada kondisi tergenang. Namun jika air tidak tersedia secara optimal dapat mengurangi hasil padi. Pengaturan air kemudian menjadi cara yang paling menonjol dalam mengurangi emisi gas metana. Kombinasi antara penghematan air dan

penggunaan varietas tahan kekeringan dapat menjadi strategi mitigasi emisi GRK dari lahan pertanian. Penggunaan varietas tahan kekeringan pada sistem budidaya dimana pengairan hanya diberikan pada saat potensial air di bawah -15 kPa selama periode kritis air (fase anakan dan bunting) mampu mengurangi emisi GRK sebesar 65 – 74% dengan nilai GWP (rasio hasil dan emisi) sebesar 68 – 72% dan tetap mampu mempertahankan hasil padi dibandingkan pada kondisi tergenang terus-menerus (Zhang *et al.*, 2021).

Beberapa varietas padi unggul yang dirakit di Indonesia, seperti Mekongga (202 kg CH₄ ha⁻¹ musim⁻¹) dan Inpari 13 (168 kg CH₄ ha⁻¹ musim⁻¹) berpotensi untuk dikembangkan menjadi varietas rendah emisi gas metana (Kartikawati *et al.*, 2017a). Pada percobaan yang dilakukan kedua varietas tersebut mempunyai karakteristik penurunan fluks CH₄ pada akhir fase vegetatif atau menjelang fase generatif. Hal ini berbeda dengan varietas yang menghasilkan fluks CH₄ lebih tinggi yang masih meningkat dalam melepaskan fluks CH₄ meskipun memasuki fase generatif. Lebih lanjut disebutkan jumlah anakan pada fase vegetatif akhir, anakan maksimum dan awal generatif berkorelasi positif dengan fluks CH₄ demikian pula dengan berat biomas atas. Selain hal tersebut jumlah anakan dan biomas atas. Selain hal tersebut, jumlah anakan dan biomas yang efektif juga berkontribusi terhadap besarnya fluks CH₄. Varietas Mekongga dan Inpari 13 menghasilkan jumlah anakan lebih efektif sampai dengan fase generatif dibandingkan dengan varietas lain yang memiliki jumlah anakan yang tidak produktif lebih banyak sehingga mengeluarkan fluks CH₄ yang lebih tinggi. Varietas tersebut lebih banyak kehilangan jumlah anakan sehingga banyak biomas atas yang luruh (Kartikawati *et al.*, 2017a). Selain menghasilkan emisi CH₄ yang lebih rendah, varietas Mekongga dan Inpari 13 juga menghasilkan emisi N₂O lebih rendah sehingga nilai *Global Warming Potential* (GWP) kedua varietas tersebut juga lebih rendah (Kartikawati *et al.*, 2017b). Beberapa varietas rendah emisi metana antara lain Ciherang, Unsrat 2, Inpari 23, Inpari 28 (Kartikawati *et al.*, 2018).

Dalam perakitan varietas rendah emisi berat biomassa atas dan bawah juga berpengaruh pada fluks CH_4 . Pada varietas padi hibrida seringkali dicirikan dengan performa biomassa atas yang lebih banyak dari varietas inbrid sehingga beberapa varietas hibrida yang diamati cenderung menghasilkan fluks CH_4 lebih tinggi dari varietas inbrid. Varietas Sembada 168 adalah salah satu varietas padi hibrida yang berpotensi untuk dikembangkan karena menghasilkan indeks emisi CH_4 terhadap hasil yang lebih kecil adalah Sembada 168 ($405 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ musim}^{-1}$). Varietas ini menghasilkan berat jerami dan akar lebih sedikit dari varietas hibrida lainnya seperti Mapan 05, Intani, Arize gold dan Hipa (Kartikawati *et al.*, 2019).

7.2.3. Pemupukan dan Ameliorasi di lahan sawah

Pemberian pupuk N mengandung sulfat, ammonium sulfat dan fosfor gipsum dapat mengurangi emisi CH_4 , meskipun pada penelitian Yagi *et al.* (2020) menyatakan bahwa ammonium sulfat dapat meningkatkan emisi N_2O . Penggunaan urea tablet sedikit menurunkan emisi CH_4 dan sangat nyata dapat menurunkan emisi N_2O . Cara pemberian pupuk N, waktu dan penempatan tidak berpengaruh terhadap emisi CH_4 , tetapi berpengaruh terhadap penurunan emisi N_2O . Aplikasi biofertilizer dengan bakteri non-sulfur ungu dapat mengurangi emisi CH_4 karena berkompetisi dengan archaea penghasil CH_4 dan meningkatkan hasil gabah baik pada lahan salin atau organik (Meulepas *et al.*, 2010).

Upaya mengurangi emisi GRK dari lahan pertanian dapat dilakukan dengan pemberian bahan amelioran baik untuk gas tunggal misalnya CH_4 sendiri atau N_2O maupun keduanya. Besarnya emisi CH_4 berkaitan dengan status air irigasi sedangkan N_2O berhubungan dengan input pupuk nitrogen (terutama urea). Kegiatan mitigasi untuk menurunkan kedua gas tersebut seringkali menimbulkan dampak yang berkebalikan. Artinya jika melalui pengelolaan tertentu emisi CH_4 dapat menurun namun sebaliknya emisi N_2O justru meningkat. Oleh karena itu, penurunan kedua gas tersebut menjadi fokus banyak penelitian. Penelitian yang dilakukan oleh Malyan *et al.* (2019) memperlihatkan bahwa penggunaan azolla mampu mengurangi intensitas gas rumah kaca (GHGI), yaitu rasio besarnya karbon

yang diemisikan dengan hasil padi per satuan luas, berkisar antara 16 – 18% tergantung dari varietas yang digunakan. Kedua emisi gas (CH_4 dan N_2O) lebih rendah dengan menggunakan kombinasi azolla dan urea. Azolla diaplikasikan bersama dengan pupuk urea dengan dosis lebih rendah dari yang direkomendasikan sehingga terdapat sekitar 25% penghematan pupuk urea tanpa menurunkan hasil padi.

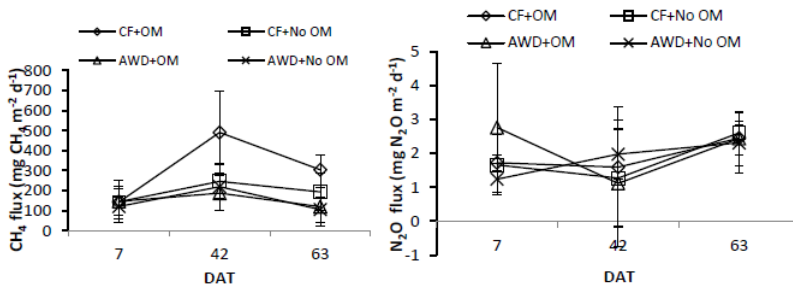
Bahan amelioran lainnya yang dapat digunakan untuk menurunkan emisi GRK, khususnya emisi N_2O adalah biochar. Hasil percobaan dari Xu *et al.* (2020) menyebutkan bahwa biochar yang berasal dari jerami padi mampu menurunkan emisi N_2O sebesar 363% dan 200% secara berturut-turut dibandingkan dengan biochar berbahan substrat jamur dari kulit buah *Camellia oleifera* dan kulit buah *Camellia oleifera* itu sendiri pada *water holding capacity* (WHC) sebesar 120%. Pengaruh jerami padi sebagai bahan biochar juga disampaikan oleh Aamer *et al.* (2021), dimana kombinasi biochar jerami padi dengan atau tanpa pupuk N dapat mengurangi emisi N_2O secara berturut-turut 62% dan 59%. Pada penggunaan biochar dengan dosis 40 t/ha mampu menurunkan emisi N_2O dan meningkatkan hasil padi. Zhang *et al.* (2020) lebih lanjut menyatakan penggunaan biochar secara nyata menurunkan nilai GWP dan GHGI sebesar 23% dan 41% dengan meningkatkan hasil tanaman sebesar 21 %. Hasil penelitian lain menggunakan biochar berbahan baku biomas rumput *Miscanthus giganteus* mampu menekan emisi N_2O dari tanah yang mendapat input unsur N di wilayah tropis. Secara umum biochar berperan dalam proses denitrifikasi, memfasilitasi reduksi N_2O menjadi N_2 (Rittl *et al.*, 2021).

Penggunaan biochar sebagai bahan amelioran tidak hanya pada tanah pertanian namun juga digunakan pada tanah hutan dan padang rumput. Pada percobaan skala laboratorium menunjukkan bahwa biochar yang dibuat dari serbuk gergaji pohon pinus yang diproses tanpa aktivasi uap secara nyata mengurangi akumulasi emisi gas CO_2 pada tanah hutan sebesar 16,4% dibandingkan tanpa penggunaan biochar. Namun hal ini tidak berlaku pada tanah yang diambil dari area padang rumput. Biochar yang dibuat baik dengan atau tanpa aktivasi uap pada suhu 550 °C mampu menurunkan emisi gas N_2O baik pada tanah hutan maupun tanah padang rumput. Kedua perlakuan tersebut

memperlihatkan konsistensinya sampai dengan akhir masa inkubasi sehingga biochar tersebut berpotensi mempunyai pengaruh jangka panjang (Pokharel *et al.*, 2018).

7.2.4. Pengelolaan bahan organik

Aplikasi bahan organik secara substansi dapat meningkatkan emisi CH_4 . Opsi mitigasi dengan bahan organik dapat dilakukan dengan menggunakan bahan organik yang matang, menggunakan residu jerami pada pertanaman sebelumnya atau pemberian kompos. Kombinasi pengelolaan jerami dengan pengaturan air efektif menurunkan emisi GRK. Penambahan bahan organik pada lahan dengan pengairan basah kering (AWD) menyebabkan emisi CH_4 harian lebih rendah dibandingkan pada sistem tergenang (CF) (Gambar 18). Kadar karbon dalam tanah berkorelasi positif terhadap emisi CH_4 pada sistem tergenang (Ariani *et al.*, 2019).



Gambar 18. Fluks CH_4 dan N_2O pada tanah Inceptisol Jakenan, Musim Kering 2019

Keterangan: CF: penggenangan terus-menerus; AWD: pengairan basah kering; No OM: tanpa bahan organik; OM: dengan bahan organik

Sumber: Ariani *et al.*, 2019

7.2.5. Perbaikan Sistem Tanam

Tanam benih langsung signifikan menurunkan emisi CH_4 dibandingkan dengan tanam pindah (Tabel 15). Sistem tanam dengan pengelolaan kondisi lahan sawah macak-macak (sistem tanam SRI) juga dapat mengurangi emisi GRK, tetapi dapat menurunkan hasil gabah. Rotasi tanaman padi dengan jagung atau sorghum dapat mengurangi emisi CH_4 (Yagi *et al.*, 2020). Rotasi

tanaman dipraktekkan untuk mengoptimasi tanaman terpilih, terutama untuk meningkatkan fiksasi nitrogen sekaligus meningkatkan cadangan karbon tanah dan mengurangi kebutuhan pupuk anorganik.

Tabel 15. Hasil, GWP dan indeks emisi dari metode tanam benih langsung dan tanam pindah pada musim hujan

Perlakuan	Hasil (ton/ha)	GWP (t CO ₂ -e/ha)	Indeks emisi
Tanam benih langsung	4,9a	4,4b	0,9
Tanam pindah	5,2a	8,2a	1,6

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan beda nyata pada taraf 0,05 pada uji Tukey's HSD

Sumber: Susilawati *et al.*, 2019

7.2.6. Aplikasi bakteri pereduksi GRK (CH₄ dan N₂O)

Keberadaan bakteri yang mampu mengoksidasi metana dan mereduksi N₂O di lahan padi sawah menjadi salah satu alternatif teknologi mitigasi GRK. Aplikasi konsorsium bakteri yang mampu mengoksidasi CH₄ telah banyak dikaji dalam penelitian skala lapang. Hasil penelitian Davamani *et al.*, 2020 menyatakan bahwa aplikasi bakteri metanotrof yang mampu memanfaatkan CH₄ dengan kombinasi bakteri penambat N₂ dan bakteri pelarut fosfat dapat menurunkan emisi CH₄ hingga 60% di lahan padi sawah dan peningkatan hasil padi sebesar 35%.

Penelitian Balingtan (2021) dengan aplikasi konsorsium bakteri yang berasal dari lahan sawah yaitu *Amorphomonas oryzae*/SI5 (Adriany *et al.*, 2021) dan *Bacillus aryabhatai* (Wahyuni, 2018) serta biodigester (*Bordetella petrii*, BD4) signifikan mampu menekan emisi GRK dibandingkan kontrol. Bakteri *A. oryzae* merupakan bakteri yang berperan sebagai penambat nitrogen di daerah perakaran tanaman yang hidup bebas (Yousuf *et al.*, 2014). Bakteri *B. aryabhatai* adalah spesies bakteri yang tergolong ke dalam *plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR) yang mampu menghasilkan fitohormon seperti asam absisat, asam indol asetat, sitokinin, asam giberelat, toleran terhadap stres oksidatif yang disebabkan oleh H₂O₂ dan stres nitrosatif (Park *et al.*, 2017). Keberadaan 2 spesies bakteri

ini mampu menghasilkan fitohormon, menyediakan nitrogen untuk mendukung pertumbuhan tanaman, sedangkan *B. petrii* merupakan bakteri yang diisolasi dari *slurry* biodigester. Hasil penelitian dari analisa genom, bakteri tersebut yang memiliki gen yang mengkode *nitrate-*, *nitrite-*, *nitrous oxide reductases* yang berperan penting dalam proses denitrifikasi untuk mengubah NO_3 menjadi N_2 yang akan dilepaskan ke atmosfer (Gross *et al.* 2008). Hasil penelitian Wang *et al.* (2007) *B. petrii* memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa aromatik seperti 1,2,4-*trichlorobenzene* yang tergolong senyawa organoklorin, sehingga dapat berperan sebagai agen bioremediasi di lahan tercemar dari bahan kimia berbahaya.

Kombinasi tiga spesies bakteri ini mampu menekan emisi CH_4 dan N_2O di lahan sawah dengan sistem irigasi tergenang terus-menerus. Kelimpahan bakteri metanotrof dan bakteri pendenitrifikasi di lahan sawah meningkat dengan aplikasi konsorsium tiga bakteri tersebut dibandingkan dengan kontrol (Balintan, 2021). Peningkatan jumlah populasi bakteri metanotrof akan berdampak pada penurunan emisi CH_4 di lahan sawah. Dimana jumlah populasi bakteri metanotrof dan emisi CH_4 yang dikeluarkan akan berkorelasi negatif (Davamani *et al.*, 2020). Peningkatan bakteri pendenitrifikasi seperti *B. petrii* yang mampu mengubah NO_3 menjadi N_2 menjadi sangat penting untuk menekan pelepasan N_2O ke atmosfer.

BAB VIII

TEKNOLOGI PENANGGULANGAN CEMARAN RESIDU PESTISIDA PADA LINGKUNGAN PERTANIAN

Ina Zulaehah, Siska Apriyani, Poniman, E. Srihayu Harsanti

Penggunaan bahan agrokimia seperti pestisida dalam sistem produksi pertanian diperlukan untuk mempertahankan produksi tanaman pertanian tetap tinggi. Sejak berlangsungnya revolusi hijau dunia pertanian memasuki babak baru yang ditandai dengan penggunaan bahan agrokimia secara miss-use dan overuse. Program tersebut mengantar negara Indonesia sebagai negara pertama di dunia swasembada beras bagi penduduknya pada tahun 1984 (Las, 2009; Firdaus et al., 2019; Sastrosupadi, 2019). Namun disisi lain penggunaan pestisida secara berlebihan dan kurang tepat ternyata meninggalkan residu pestisida yang dapat berdampak pada penurunan kualitas tanah dan produk pertanian. Residu pestisida yang tertinggal dalam tanah dapat terbawa pada produk pertanian maupun lingkungan perairan di sekitarnya.

Lahan pertanian yang tercemar residu pestisida ditandai dengan terdeteksinya residu pestisida di tanah, air, maupun produknya. Beberapa lahan sentra produksi tanaman padi maupun sayuran di Indonesia telah terdeteksi residu pestisida baik yang bersifat persisten ringan-sedang-tinggi seperti telah disampaikan di Bab sebelumnya. Oleh karena itu upaya penanggulangan residu pestisida di lahan pertanian perlu dilakukan. Berikut beberapa teknologi minimalisir residu pestisida agar dapat diperoleh produk yang berkualitas dan sehat.

8.1. Teknologi Remediasi Residu Pestisida

Teknologi remediasi dapat digunakan untuk menanggulangi cemaran residu pestisida pada lingkungan pertanian terutama di

tanah dan air. Pemilihan metode remediasi yang digunakan bergantung pada banyak faktor seperti pH, jenis bahan yang akan diremediasi, suhu, sifat pestisida, dan biaya.

8.1.1. Remediasi Secara Fisik

Berikut beberapa Teknologi remediasi fisik yang sering digunakan untuk meremediasi lingkungan yang tercemar pestisida:

a) Liat (*Clay*)

Mineral liat bersifat hidrofilik dan umumnya bermuatan negatif sehingga dapat digunakan untuk remediasi polutan organik seperti residu pestisida. Beberapa penelitian melaporkan bahwa air yang tercemar oleh karbaril dapat diturunkan konsentrasinya atau dihilangkan dengan menggunakan lempung. Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi daya adsorpsi lempung yaitu konsentrasi awal pestisida, waktu kontak, massa adsorben, pH larutan, kekuatan ion, dan suhu (Marican dan Duran-Lara, 2018).

b) Arang aktif

Arang aktif adalah arang yang diproses pirolisis lebih lanjut pada suhu tinggi dengan menggunakan gas CO₂, uap air atau bahan-bahan kimia, sehingga pori-porinya terbuka dan dapat digunakan sebagai adsorben (Polli, 2017). Arang aktif terdiri atas 87-97% C dan mengandung unsur-unsur seperti oksigen, hidrogen, sulfur, dan nitrogen (Choma dan Jaroniec 2006). Arang aktif memiliki kapasitas dan daya adsorpsi kuat karena memiliki luas permukaan spesifik besar yang dapat mencapai 1500 m²/g (Cobb *et al.*, 2012). Daya adsorpsi arang aktif disebabkan adanya pori-pori mikro yang sangat besar jumlahnya, sehingga menimbulkan gejala kapiler yang mengakibatkan adanya daya adsorpsi. Keunggulan arang aktif dari biochar kapasitas dan daya serapnya yang lebih besar karena struktur pori dan keberadaan gugus fungsional kimiawi di permukaan arang seperti C=O (Ardiwinata, 2020)

Arang aktif dapat dibuat dari limbah pertanian/perkebunan atau bahan lain yang mengandung lignin dan selulosa tinggi. Arang aktif yang dibuat dari bahan yang tinggi kandungan lignin

dan seluosa akan menghasilkan arang aktif yang berkualitas baik. Kandungan lignin dan selulosa memberikan struktur berpori yang menjadikan bahan tersebut dapat digunakan sebagai media adsorpsi (Aisyahlika *et al.*, 2018).

Menurut Wahyuni *et al.*, (2012) arang aktif meningkatkan populasi bakteri *Azospirillum, sp.*; *Azotobacter, sp.*; *Bacillus sp.*; *Chromobacterium, sp.*; dan *Pseudomonas, sp.* Mikroba-mikroba tersebut merupakan mikroba degradator residu pestisida dalam tanah. Arang aktif juga dapat memperbaiki sifat fisika tanah, ketersediaan hara esensial bagi tanaman, dan meningkatkan populasi mikroba yang menguntungkan bagi kesuburan tanah (Lehmann dan Joseph, 2009; Zheng *et al.*, 2018).

c) Zeolit

Zeolit termasuk dalam kelompok bahan aluminosilikat kristal dengan mikropori yang berhubungan yang menunjukkan distribusi ukuran pori yang sangat sempit (Pham *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016). zeolit banyak dipergunakan karena sifat fisikokimianya, ketersediaannya, dan biaya yang rendah. Zeolit banyak digunakan dalam pertanian, industri, dan pengendalian cemaran khususnya remediasi logam berat dan pestisida (houng *et al.*, 2016). Akan tetapi, daya adsorpsi zeolit sangat bergantung pada mobilitas dan polaritas pestisida.

d) Bahan polimer

Bahan polimer yang banyak digunakan sebagai bahan remediasi adalah Cyclodextrins (CD), Dendrimers, Hyper-crosslinked. Remediasi menggunakan CD memiliki keuntungan yaitu peningkatan kelarutan pestisida dalam air. Tetapi faktor pembatas metode ini adalah biaya produksi yang tinggi. Hyper-crosslinked memiliki beberapa keunggulan yang menguntungkan dalam proses remediasi yaitu biaya rendah dan pemrosesan mudah. Sedangkan untuk dendrimer efisiensi menghilangkan cemaran residu pestisida tinggi tetapi memerlukan biaya produksi tinggi daam skala besar (Marican dan Duran-Lara, 2018).

8.1.2. Remediasi Secara Kimia

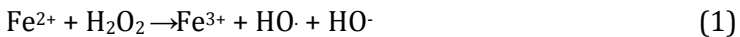
Metode ini melibatkan reaksi kimia dalam pendegradasian cemaran residu pestisida. Proses ini terkadang memerlukan biaya yang sangat tinggi. Seringkali remediasi kimia digunakan dalam kombinasi dengan remediasi fisik. Beberapa metode remediasi kimia yaitu:

a) Advanced Oxidation process (AOP)

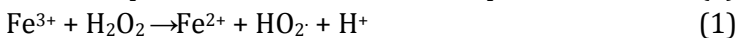
Teknik ini beroperasi pada suhu dan tekanan ambient. Teknik ini ramah lingkungan karena tidak mentransferkan kontaminan dari satu fase ke fase lain. AOP dapat mendegradasi hampir semua jenis polutan organik menjadi produk yang tidak berbahaya (Cheng *et al.*, 2016)

b) Reaksi Fenton

Proses oksidasi substrat organik oleh Fe(II) dan hidrogen peroksida disebut reaksi fenton. Metode remediasi ini merupakan salah satu metode yang paling efektif untuk oksidasi cemaran organik. Proses fenton bergantung pada pH. Bekerja pada nilai optimal 2,8-3,0 dalam media larutan. Mekanisme fenton secara umum dapat dilihat pada persamaan (1) dan (2) (Barbusinski, 2009).



Katalis dapat bertransformasi melalui persamaan (2)



c) Photodegradation

Photodegradasi pestisida dapat dilakukan dengan fotolisis langsung, dimana pestisida menyerap energi cahaya yang tereksitasi dan dapat ditransformasikan tergantung ketersediaan energi aktivasi. Fotodegradasi terjadi pada lapisan permukaan tanah yang dangkal. Spektrum dan intensitas cahaya matahari yang sampai ke tanah bergantung pada musim, waktu, ketinggian, garis lintang, dan keadaan atmosfer.

d) Photocatalysis

Photocatalysisi menggunakan semikonduktor oksida logam sebagai katalis seperti TiO_2 dan WO_3 , yang bersifat inert secara kimia, tidak beracun, mudah diperoleh, dan memiliki

fotoaktivitas tinggi (Ibhadon dan Fitzpatrick, 2013). Pengujian yang dilakukan pada kondisi optimum pH 7, 12 mg katalis C, N-codoped TiO₂ selama 300 menit dengan fotokatalisi sinar matahari mampu mendegradasi diazinon sebesar 90,75% (Khoiriah *et al.*, 2019)

8.1.3. Bioremediasi

Bioremediasi merupakan metode penguraian pestisida yang menggunakan organisme hidup dalam prosesnya sehingga pestisida akan terdegradasi menjadi senyawa yang kurang kompleks dan produk akhir yang kurang berbahaya seperti CO₂ dan H₂O (Marican dan Duran-lara, 2017). Metode ini merupakan metode yang berbiaya rendah dan ramah lingkungan dibandingkan dengan metode fisik atau kimia. Bioremediasi mencakup beberapa metode yaitu penggunaan mikroorganisme, fitoremediasi menggunakan tumbuhan, atau vermiremediasi menggunakan cacing tanah (Morillo dan Villaverde, 2017).

a) Bioremediasi menggunakan Mikroorganisme

Terdapat 3 jenis bioremediasi menggunakan mikroorganisme yaitu (a) *natural attenuation* (memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme yang ada di dalam matriks), (b) bioaugmentasi (penggunaan mikroorganisme non-native dan/atau rekayasa genetika), (c) biostimulasi (penambahan elektroaseptor atau nutrisi) (Nwankwegu dan Onwosi, 2017). Mikroorganisme yang mampu mendegradasi pestisida dapat ditemukan dan diisolasi di berbagai lingkungan termasuk diantaranya pada lokasi yang terkontaminasi atau sedimen laut (Ferreira *et al.*, 2016). Beberapa mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk mendegradasi residu pestisida diantaranya adalah *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Clostridium* sp., *Azotobacter*, *Enterobacter*, *Serratia marcescens*, dll. Mazen *et al.* (2015) melaporkan bahwa *Bacillus* dan *Morganella* mampu mendegradasi 94,6% dan 87,3% karbaril (150 mg/kg). Sedangkan Bakteri *Coryne* hanya mampu mendegradasi karbaril sebesar 48,8%. Selain bakteri, fungi juga memiliki kemampuan untuk mendegradasi cemaran pestisida. Beberapa kajian telah membuktikan bahwa fungi efektif mendegradasi residu pestisida seperti methamidophos, endosulfan, klorpirifos, atrazine,

sipermetrin, dieldrin, methyl parathion, heptaklor, dll. Tetapi kelemahan dari metode remediasi dengan fungi adalah kecepatan degradasi fungi terhadap pestisida tergantung kepada temperatur, pH, ketersediaan nutrisi, kadar air tanah, kadar oksigen, dll (Marican dan Duran-Lara, 2018)

Selain penggunaan mikroorganisme, kemajuan teknologi memungkinkan penggunaan enzim yang diekstrak dari mikroorganisme. Teknologi enzim ini memungkinkan proses remediasi residu pestisida menjadi lebih spesifik, *reuse*, dan berbiaya rendah (Gao *et al.*, 2014). Tetapi faktor lain yang perlu diperhatikan dalam penggunaannya adalah enzim sangat sensitif terhadap pH, pelarut organik, perbedaan suhu, dan sangat tergantung pada kondisi lingkungan. Faktor tersebut dapat menyebabkan enzim kehilangan kemampuan untuk mendegradasi polutan organik (Xie *et al.*, 2010).

b) Fitoremediasi

Phytoremediasi adalah teknologi remediasi yang menggunakan tanaman untuk menghilangkan polutan organik. Metode phytoremediasi dapat dikombinasikan dengan mikroorganisme agar lebih efektif mendegradasi polutan organik dari lingkungan. Beberapa tanaman yang menunjukkan potensi sebagai fitoremediasi pestisida yaitu *Typha latifolia*, *Leersia oryzoides* Sw., dan *sparganium Americanum* Nutt yang dapat meremediasi tanah yang tercemar atrazine, diazinon, dan permethrin (Morre *et al.*, 2013)

c) Bioremediasi menggunakan cacing tanah

Cacing tanah dapat berperan meremediasi cemaran residu pestisida. Akan tetapi, adanya cemaran herbisida, insektisida, dan fungisida di tanah memberikan dampak negative terhadap keberlangsungan hidup dan reproduksi cacing tanah, terutama pada konsentrasi tinggi ($> 25 \text{ mg kg}^{-1}$). Kondisi tanah harus diperhatikan seperti kadar air dan nutrisi. Selain itu, remediasi dengan metode ini memerlukan biaya tinggi untuk aplikasi pada area yang luas (Rodriguez-Campos *et al.*, 2014)

8.1.4. Nanotoeknologi

Teknologi remediasi konvensional yang banyak digunakan masih dianggap kurang efektif dan efisien karena metode tersebut menargetkan jenis kontaminan yang beragam di lingkungan yang secara signifikan mempengaruhi efisiensi remediasi pestisida. Perkembangan teknologi telah memunculkan inovasi teknologi yang bekerja pada tingkat molekuler dan atomik untuk mendeteksi dan mendegradasi pestisida. Nanoteknologi adalah teknologi yang memanipulasi atom dan molekul sehingga material memiliki dimensi dalam kisaran nanometer (Khatri *et al.*, 2017). Berbagai jenis nanomaterial seperti nanopartikel, nanokomposit, dan nanotube telah banyak digunakan untuk keperluan remediasi pestisida (Tabel 16 dan Tabel 17).

Tabel 16. Nanomaterial untuk degradasi pestisida

Nano-material	Jenis nano-material	Modifikasi	Pestisida	Matrik	Mekanisme degradasi	Efisiensi degradasi (%)
Metal nano-partikel	FENPs	Immobilisasi on dengan laccase	Klorpirifos	Spiked pesticides solution	Katalisis berbasis enzim	99
		Coating dengan carboxy-methyl cellulose	Lindan	Air	Dichloroelimination and dehydrohalogenation	95
Bimetal nano-partikel	Fe/Ni NPs	-	Profenofos	Spiked pesticides solution	Catalytic reduction	94,5
		-	Sulfentrazone	Spiked pesticides solution	Dechlorination	100
	Ag/Cu NPs	-	Klorpirifos	Air	Catalytic reduction	-
Metal oxide nanopartikel	TiO ₂ NPs	-	Klorpirifos dan monochlorophos	Kolam dan air sumbu bor	Photocatalysis	>95
		Doping dengan ion Fe dan Si	Carbendazim	Spiked pesticides solution	Photocatalysis	98
	ZnO NPs	-	Methyl parathion dan parathion klorpirifos	Air	Photocatalysis	93
Nano-komposit	Graphene oxide dan	-	Klorpirifos, endosulfan, dan DDE	Air	Catalytic dehalogenation	95

Nano-material	Jenis nano-material	Modifikasi	Pestisida	Matrik	Mekanisme degradasi	Efisiensi degradasi (%)
	AgNPs					
Nano-tube	Halloysite nanotubes	Immobilization rose bengal	4-n-nonyl-phenol	Spiked pesticides solution	Photocatalysis	> 90
		Doping dengan Fe ₃ O ₄ NPs	Phenachlorophenol	Spiked pesticides solution	Catalytic oxydation	100
Metal Oxide nanopartikel	TiONPs	-	HCB, trans-chlordane, cis-chlordane, o,p-DDT, p,p-DDT, dan mirex	Air hujan dan danau	Adsorpsi	89.1% (air hujan) dan 81,2 (air danau)
	ZnO NPs	Fungsionalisasi dengan BMTF-IL dan CTAB Imobilisasi dalam kitosan	Napthalene	Air	Adsorpsi	100
			Permethrin	Air	Adsorpsi	99
	SiO ₂ NPs	Fungsionalisasi dengan N-methylimidazole	Bensulfuron-methyl, metsulfuron-methyl, pyrazosulfuron-methyl, thifensulfuron-methyl dan triasulfuron	Air	Adsorpsi	83,9
			Fenarimon	Air	Pemisahan Magnetik dan Adsorpsi	70
	Fe ₂ O ₃ -NPs	Imobilisasi pada palyorskite	Delta-methrin, Bifenthrin dan Cyhalothrin	Air keran, air kolam, air sungai, dan air danau	Pemisahan Magnetik	80,2
	Fe ₃ O ₄ -NPs	-				
Nanokomposit	Montmorillonite dengan hexadimethrin	-	2-methyl-4-chlorophenoxy	Air	Interaksi elektrostatik	94
	Graphene oxide dengan Fe ₃ O ₄ NPs	-	Atrazine, simazine, ametryn, simeton dan prometryn	Air	Interaksi elektrostatik dan magnetis	93,61

Nano-material	Jenis nano-material	Modifikasi	Pestisida	Matrik	Mekanisme degradasi	Efisiensi degradasi (%)
Nano-tube	Carbon nano-tubes	-	Buprofezin , cypermethrin, pyridaben and chlorpyrifos	Teh	Adsorpsi	70
		Doping dengan ZnO NPs	Carbofuran dan cabaryl	Buah dan sayuran	Adsorpsi	75,7
		-	Malathion	Air	Adsorpsi	100

Sumber : Rawtani *et al.*, 2018

Tabel 17. Nanomaterial untuk menghilangkan cemaran pestisida

Nano-material	Jenis nano-material	Modifikasi	Pestisida	Matrik	Mekanisme degradasi	Efisiensi degradasi (%)
Metal Oxide nano-partikel	TiONPs	-	HCB, trans-chlordane, cis-chlordane, o,p-DDT, p,p-DDT, dan mirex	Air hujan dan danau	Adsorpsi	89,1% (air hujan) dan 81,2 (air danau)
		Fungsionalisasi dengan BMTF-IL dan CTAB	Napthalene	Air	Adsorpsi	100
		Imobilisasi dalam kitosan	Permethrin	Air	Adsorpsi	99
	SiO ₂ NPs	Fungsionalisasi dengan N-methylimidazole	Ben-sulfuron-methyl, met-sulfuron-methyl, pyrazo-sulfuron-methyl, thifen-sulfuron-methyl dan tria-sulfuron	Air	Adsorpsi	83,9
			Fenarimon	Air	Pemisahan Magnetik dan Adsorpsi	70
	Fe ₃ O ₄ -NPs	-	Delta-methrin, Bifenthrin dan Cyha-	Air keran, air kolam,	Pemisahan Magnetik	80,2

Nano-material	Jenis nano-material	Modifikasi	Pestisida	Matrik	Mekanisme degradasi	Efisiensi degradasi (%)
			lothrin	air sungai, dan air danau		
Nano-komposit	Montmorillonite dengan hexadimethrin	-	2-methyl-4-chlorophenoxy	Air	Interaksi elektrostatik	94
	Graphene oxide dengan Fe ₃ O ₄ NPs	-	Atrazine, simazine, ametryn, simeton dan prometryn Buprofezin, cypermethrin, pyridaben and chlorpyrifos	Air	Interaksi elektrostatik dan magnetis	93,61
Nano-tube	Carbon nano-tubes	-	Carbofuran dan cabaryl Malathion	Teh	Adsorpsi	70
		Doping dengan ZnO NPs		Buah dan sayuran	Adsorpsi	75,7
		-		Air	Adsorpsi	100
	Hallosite nano-tubes	-	Prometryn	Air	Adsorpsi	100

Sumber: Rawtani *et al.*, 2018

8.2. Teknologi Remediasi Residu Pestisida Balingtan

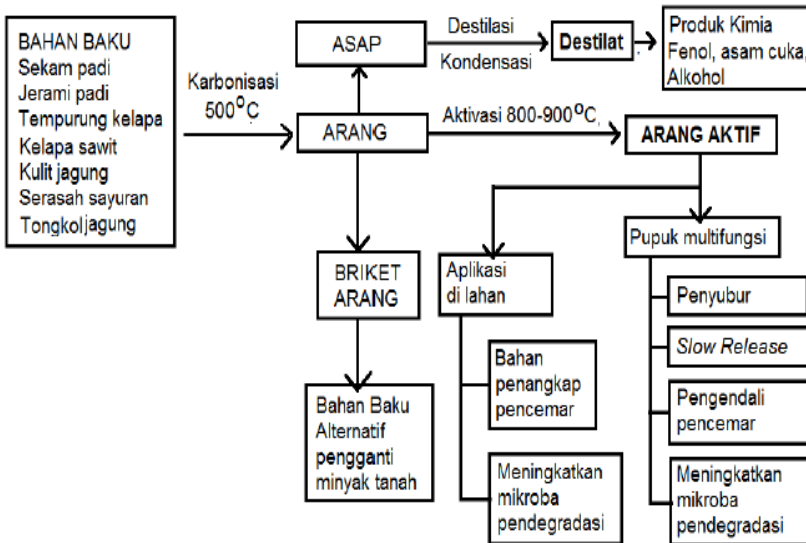
8.2.1. Arang Aktif dari limbah pertanian

Pemanfaatan arang aktif yang berasal dari limbah pertanian seperti sekam padi, tempurung kelapa, tongkol jagung, dan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan adsorben untuk menanggulangi masalah pencemaran oleh residu pestisida di lingkungan pertanian menunjukkan hasil yang cukup baik. Arang aktif dari limbah pertanian mampu menurunkan residu insektisida sebesar > 50% (Ardiwinata *et al.*, 2016). Hasil penelitian Balingtan (2009), arang aktif yang berasal dari sekam padi mampu menurunkan kandungan residu pestisida di dalam tanah hingga 70%. Pada tanah yang ditanami kubis, arang aktif tempurung kelapa dapat menurunkan residu insektisida klorpirifos di air hingga sekitar 50%, sedangkan arang aktif sekam padi, tempurung kelapa menurunkan residu lindan di air hingga

50%. Pemberian arang aktif ke dalam tanah dapat meningkatkan populasi bakteri yang berperan dalam degradasi residu pestisida baik pada tanah Inceptisol maupun Ultisol yaitu *Pseudomonas sp* (Ardiwinata, 2005).

Hasil pengujian lapang menunjukkan bahwa karbon aktif tempurung kelapa, tongkol jagung, sekam padi, dan tandan kosong kelapa sawit berpengaruh menurunkan residu lindan dan klorpirifos. Karbon aktif dapat meningkatkan degradasi insektisida oleh populasi mikroba *Citrobacter*, *Enterobacter*, and *Azotobacter*. Karbon aktif sebagai bioremediasi yang potensial dalam tanah karena membantu dekomposer residu insektisida (klorpirifos dan lindan).

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa aplikasi arang aktif di tanah dapat menurunkan residu pestisida organoklorin (lindan, aldrin, dieldrin, DDT, endosulfan dan heptaklor), organofosfat (klorpirifos, diazinon) dan karbamat (karbofuran) dengan kisaran 70-90%. Apabila konsentrasi residu ditanah dalam tanah dapat ditekan maka konsentrasi residu insektisida pada produk pertanian juga dapat diminimalkan (Ardiwinata, 2009).



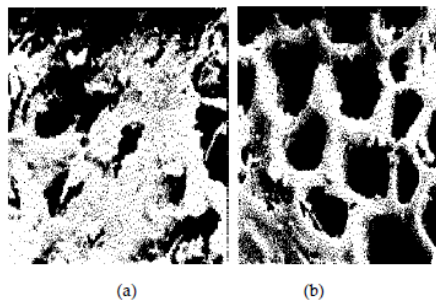
Gambar 19. Diagram Pembuatan Arang Aktif

Sumber: Harsanti *et al.*, 2012

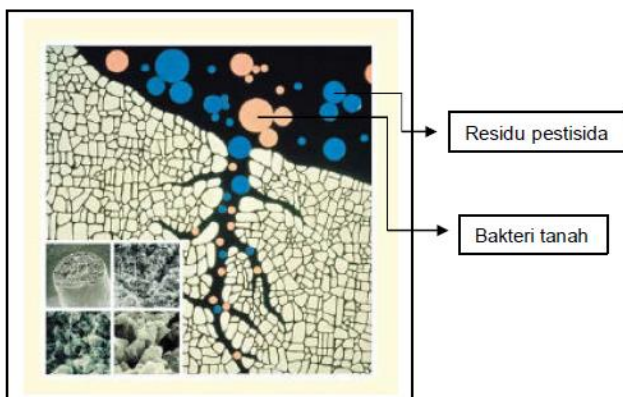


Gambar 20. Arang Aktif dari Berbagai Limbah Pertanian
Sumber: Ardiwinata, 2005

Arang aktif mampu mendegradasi residu pestisida dikarenakan arang aktif memiliki pori-pori aktif lebih besar dan bercabang serta zig-zag jika dibandingkan dengan arang (Gambar 21). Pori-pori arang aktif ini merupakan tempat tinggal ideal dan sangat disukai oleh berbagai macam mikroba termasuk mikroba pendegradasi residu pestisida. Keberadaan mikroba pendegradasi senyawa POPs ini yang dapat menurunkan konsentrasi POPs melalui proses detoksitas dan degradasi. Arang aktif dapat mendeaktivasi kontaminan pestisida yang terdapat di dalam tanah dengan dosis antara 100-400 kg ha⁻¹ (McCarty 2015).



Gambar 21. Struktur pori dari arang (a) dan arang aktif (b)
Sumber: Harsanti *et al.*, 2012



Gambar 22. Mekanisme terperangkapnya residu pestisida di dalam arang aktif

Sumber: Ardiwinata, 2009

Berikut ini beberapa inovasi teknologi ramah lingkungan yang telah dikembangkan oleh Balingtan dengan memanfaatkan arang aktif dalam pengaplikasiannya:

a. Urea Berlapis Arang Aktif

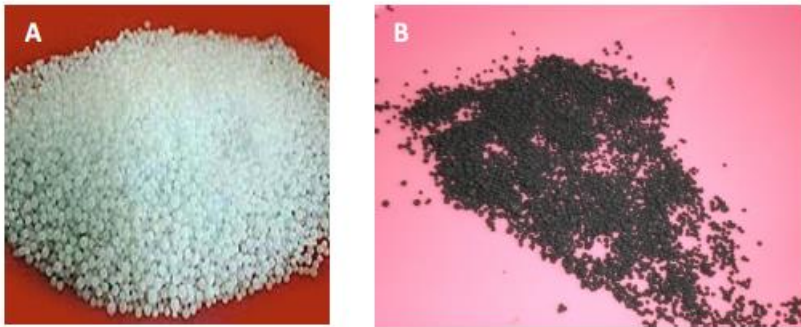
Produk Balingtan ini merupakan urea yang permukaannya dilapisi dengan arang aktif. Perbandingan antara penggunaan urea dan arang aktif adalah 80:20 serta menggunakan molase atau tepung tapioka sebanyak 2% sebagai perekat. Tahapan pembuatan urea berlapis arang aktif adalah sebagai berikut:

1. Larutan perekat dibuat dengan mencampurkan molase atau tepung tapioka sebanyak 2% dengan air
2. Urea dan arang aktif dengan komposisi 80:20 dimasukkan ke dalam rotary granulator kemudian semprotkan larutan perekat sedikit demi sedikit hingga habis
3. Apabila urea-arang aktif telah terbentuk sempurna, matikan rotary granulator kemudian kering anginkan untuk menurunkan kadar air
4. Produk kemudian dapat disimpan atau dikemas.

Menurut Ardiwinata *et al.* (2015), Keunggulan urea berlapis arang aktif bila diaplikasi di tanah yaitu:

- 1) tidak mudah menguap (kadar penguapan berkisar 0,03-0,13%), sedangkan penguapan urea biasa sebesar 0,22%,
- 2) tidak mudah tercuci, Urea berlapis arang aktif dapat menghemat pupuk hingga 50%,

- 3) dapat mengikat pencemar residu pestisida organoklorin di tanah dengan kisaran 0,0017-0,1600 ppm,
- 4) dapat meningkatkan populasi mikroba pendegradasi seperti *pseudomonas sp.*, *Serratia sp.*, *S. natans*, *Bacillus sp.*, *Azotobacter*, dan *Azospirillum* masing-masing sebesar $1,8 \times 10^8$, $5,6 \times 10^7$, $6,0 \times 10^6$, $4,7 \times 10^9$, $2,0 \times 10^8$ cfu/g (cfu = colony forming unit),
- 5) bersifat slow release (3 hari).



Gambar 23. A) urea, B) Urea berlapis arang aktif

Sumber: Harsanti *et al.*, 2013

Hasil Uji Lapang yang dilakukan menunjukkan bahwa urea berlapis arang aktif dan biochar tempurung kelapa mampu menurunkan residu heksaklorobenzen dan endrin sebesar 22,4%.

b. Urea Berlapis Arang Aktif dan Zeolit

Produk Balingtan ini merupakan urea yang permukaannya dilapisi dengan arang aktif dan zeolit. Pupuk urea lepas lambat ini berbentuk granul dimana 90-98% berat yang dilapisi dengan arang aktif 2-4% berat dan zeolit 0,3-1,0% berat. Urea yang dilapisi dengan arang aktif dan zeolit dapat menekan kehilangan pupuk di lapangan hanya 30%, pupuk urea tersebut tidak mudah menguap, tidak mudah tercuci/*slow release* (4-5 hari), dapat mengikat pencemar residu pestisida organoklorin berkisar 0,0023-0,2290 ppm (Ardiwinata *et al.*, 2016^a).

Penambahan zeolit pada urea berlapis arang aktif bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pengikatan residu pestisida di tanah. Zeolit mempunyai struktur kerangka tiga dimensi terbentuk dari tetrahedral (SiO_4)⁴⁻ dan (AlO_4)⁵⁻. Kedua tetrahedral di atas dihubungkan oleh atom-atom oksigen menghasilkan struktur tiga dimensi terbuka dan berongga.

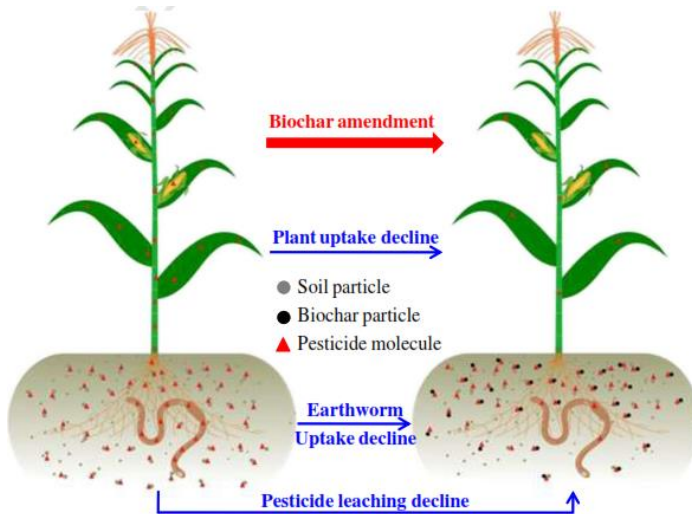
Struktur inilah yang menyebabkan zeolite mampu menyerap sejumlah besar molekul berukuran lebih kecil atau sesuai dengan rongganya (Khulsum *et al.*, 2018)

8.2.2. Biochar

Menurut Lehman *et al.* (2009), *biocharcoal* (biochar) merupakan karbon hitam yang diproduksi dari peruraian biomassa pada lingkungan yang tidak ada oksigennya seperti pirolisis atau gasifikasi. Biochar diperoleh dengan menggunakan alat pirolisis dan dibakar pada suhu 250 – 700°C. Biochar adalah salah satu sorben yang paling efisien untuk beberapa kelompok pestisida. Menurut Martin *et al.* (2012), tanah yang diaplikasikan biochar 10 ton ha⁻¹ menunjukkan peningkatan penyerapan residu herbisida ditanah dua hingga lima kali lipat dibandingkan dengan tanah yang tidak diaplikasikan biochar. Kapasitas adsorpsi biochar untuk pestisida bergantung pada sifat fisika-kimianya seperti kandungan karbon organik, luas permukaan spesifik (SSA), dan struktur berpori (Wang *et al.*, 2010; Cabrera *et al.*, 2014). Semakin tinggi kandungan karbon organik, luas permukaan spesifik, dan struktur berpori biochar, maka akan semakin tinggi kapasitas adsorpsinya. Spokes *et al.* (2009) melaporkan bahwa kapasitas adsorpsi yang tinggi dari 5% (W/W) biochar serbuk gergaji terhadap atrazin dan asetoklor dalam sampel tanah lempung berpasir dikaitkan dengan kandungan karbon dan SSA yang tinggi dari biochar yaitu masing-masing 69% dan 1,6 m²/g. Selain itu, Aplikasi campuran biochar kulit kapas dan jerami pada budidaya daun bawang, mampu menurunkan 58-60% konsentrasi pestisida klorpirifos dan fipronil didalam tanah setelah 35 hari inkubasi serta mampu mengurangi serapan tanaman terhadap residu pestisida (Yang *et al.*, 2010).

Biochar telah banyak digunakan untuk meremediasi tanah yang tercemar. Menurut Khorram *et al.* (2016), Biochar mampu memulihkan tanah yang terkontaminasi pestisida melalui: (1) Meningkatkan kapasitas adsorpsi pestisida; (2) Menurunkan desorpsi dan mobilitas pestisida di lapisan tanah; (3) Penurunan bioavailability pestisida dalam pori air tanah yang dianggap

sebagai fraksi ketersediaan hayati bagi organisme tanah; (4) Meningkatkan aktivitas mikroba tanah dengan menyediakan unsur hara esensial; dan (5) Memperbaiki sifat fisikokimia tanah seperti pH, KTK, dan daya simpan air. Pengaruh amandemen biochar terhadap perilaku lingkungan dari pestisida di tanah dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Pengaruh amandemen biochar terhadap perilaku lingkungan dari pestisida di tanah

Sumber: Khorram *et al.*, 2016

Biochar adalah material berpori yang memiliki kapasitas retensi air yang tinggi (Zhu *et al.*, 2017). Hal ini dapat meningkatkan kondisi aerasi dan memberikan kondisi yang sesuai untuk pertumbuhan mikroba, yang pada gilirannya mengurangi aktivitas metabolisme mikroorganisme dan meningkatkan degradasi pestisida (Agegnehu *et al.*, 2017). Biochar juga menyebabkan perubahan sifat tanah yang juga meningkatkan biomassa dan aktivitas mikroba, aktivitas enzim serta struktur komunitas mikroba (Zhu *et al.*, 2017). Kestabilan biochar dalam tanah berperan penting dalam aplikasinya untuk digunakan dalam remediasi pestisida. Selain kondisi pirolisis dan jenis bahan baku, rasio molar H/C dan O/C juga telah dilaporkan sebagai indikator

penting untuk mempelajari potensi aplikasi biochar aplikasi dalam bioremediasi pestisida (Manya *et al.*, 2014).

Jika dibandingkan dengan arang aktif, biochar lebih ekonomis dan mudah diproduksi terutama oleh petani, tetapi kemampuan menyerap kontaminan lebih rendah dibandingkan dengan arang aktif. Urea yang ditambahkan biochar, dapat meningkatkan efektivitas penyerapan oleh tanaman dan biochar dapat berperan dalam menurunkan konsentrasi pestisida di dalam tanah maupun air karena adanya mikroba tanah yang berperan aktif dalam memanfaatkan sumber karbon dari pestisida.

Di Balingtan, biochar diaplikasikan secara tunggal, dikombinasikan dengan pupuk kompos (biokompos), dan coating pupuk urea (urea berlapis biochar). Komposisi dan cara pembuatan urea berlapis biochar sama dengan tahapan pembuatan urea berlapis arang aktif yang telah dibahas sebelumnya.

8.2.3. Filter Inlet Outlet

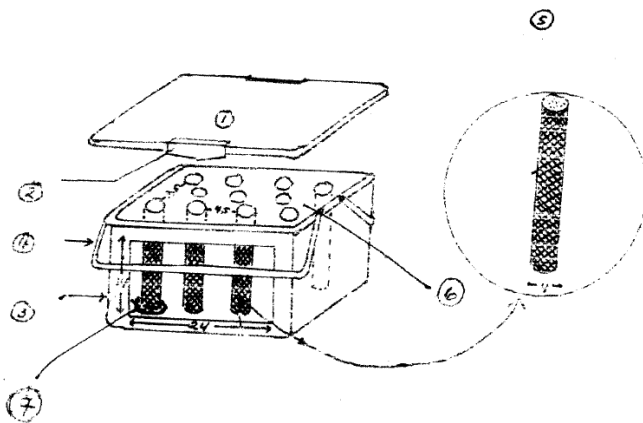
FIO merupakan suatu alat penyaring/filter air persawahan terhadap pencemar residu pestisida (Gambar 25). Alat ini ditempatkan pada saluran masuk dan keluar dari suatu petakan sawah. Filter pertama (inlet), berfungsi sebagai penyaring pertama kontaminan yang terbawa oleh air masuk ke persawahan, misalnya residu pestisida. Filter kedua (outlet) berfungsi untuk penyaringan outlet yang dipasang di outlet persawahan agar saat air keluar dari persawahan tidak mencemari di lingkungan perairan di bawahnya.

Teknik penangkapan pencemar residu pestisida pada alat ini adalah menggunakan bahan biochar atau arang aktif yang diisi pada silinder-silinder kawat yang terdapat pada alat FIO. Biochar/arang aktif yang digunakan dapat diganti atau diisi ulang bila sudah jenuh. Penggunaan alat FIO mampu menurunkan residu insektisida lindan, heptaklor, dan klorpirifos pada air di lahan sawah lebih dari 50% (Wahyuni *et al.*, 2017).



Gambar 25. Filter Inlet Outlet

Sumber: Foto koleksi Balingtan



Gambar 26. Komponen Alat Filter Inlet Outlet

Sumber: Foto koleksi Balingtan

Alat Filter Inlet Outlet terdiri dari beberapa komponen :
(Ardiwinata *et al.*, 2015^a) yaitu:

- (1) Tutup, tutup berbentuk segi empat, dapat terbuat dari besi, alumunium, plastic, atau bahan lainnya
- (2) Pegangan tutup, memudahkan dalam membuka atau menutup tutup alat FIO.
- (3) Boks/kerangka filter, memiliki bentuk kotak, pada sisi memanjang terdapat lubang keluaran dan pada sisi memanjang lainnya terdapat lubang masukan. Kerangka filter dapat terbuat dari plastic, fiber, aluminium atau besi.

- (4) Pegangan yang berbentuk U pada bagian ujung masing-masing terdapat engsel yang terpasang pada boks filter pada sisi melebar bagian atas dalam posisi tegak lurus.
- (5) Silinder filter terbuat dari kawat kasa aluminium yang dibentuk menjadi selongsong sehingga dapat diisi dengan biochar/arang aktif, dapat dibongkar pasang atau diisi ulang yang ditempatkan dalam boks filter dalam posisi tegak lurus dan disusun zigzag.
- (6) Penutup silinder, terbuat dari besi, plastik atau bahan lainnya berbentuk bulat yang ukurannya disesuaikan dengan diameter silinder
- (7) Dudukan filter bawah, terbuat dari besi berbentuk bulat yang ukurannya disesuaikan dengan diameter silinder

8.2.4. Bioremediasi

Inovasi teknologi remediasi secara biologis atau bioremediasi juga dikembangkan oleh Balingtan. Penelitian yang dilakukan oleh Harsanti *et al.* (2010), menemukan bahwa *Pseudomonas mallei* dan *Trichoderma* sp. Mempunyai kemampuan menurunkan residu dieldrin, endosulfan, DDT, dan heptaklor. Pada penelitian sebelumnya juga ditemukan *Bacillus* sp mampu mendegradasi residu pestisida POPs lebih dari 50%. Beberapa produk inovasi Balingtan yang menggunakan mikroba yaitu

- a. Urea berlapis arang aktif diperkaya mikroba konsorsia

Kemampuan arang aktif sebagai pendegradasi senyawa POPs dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan mikroba tertentu ke dalam arang aktif. Produk Balingtan ini merupakan pupuk urea yang permukaannya dilapisi dengan arang aktif dan diperkaya mikroba konsorsia. Mikroba konsorsia yang digunakan adalah mikroba pendegradasi pestisida, seperti: *Citrobacter* sp., *Sphaerotillus natans*, *Bacillus* sp., *Azotobacter* Sp., dan *Azospirillus* sp, dll.

Keunggulan urea berlapis arang aktif diperkaya mikroba konsorsia yaitu tidak mudah menguap, *slow release* sehingga efisiensi nitrogen meningkat 5-24%. Selain itu, pupuk urea berlapis arang aktif yang diperkaya mikroba konsorsia ini dapat mengikat pencemar residu pestisida organoklorin dengan kisaran

0,015-0,588 ppm dan mempercepat proses degradasi pestisida (Ardiwinata et al., 2016^b). Arang aktif yang diperkaya mikroba konsorsia cenderung menurunkan residu lindan dan aldrin lebih tinggi daripada arang aktif tanpa diperkaya mikroba konsorsia (Harsanti et al., 2012).

b. Urea berlapis arang aktif diperkaya *Bacillus aryabhatai*

Ardiwinata et al. (2015) melaporkan bahwa urea berlapis arang aktif dan diperkaya oleh mikroba *Bacillus aryabhatai* yang diaplikasikan ke dalam tanah dapat menurunkan konsentrasi residu insektisida aldrin (0,217 ppm menjadi 0,039 ppm), dieldrin (0,223 ppm menjadi 0,037 ppm), heptaklor (0,186 ppm menjadi 0,049 ppm) dan DDT (0,229 ppm menjadi 0,050 ppm).

Bakteri *Bacillus aryabhatai* merupakan bakteri gram positive yang dapat hidup pada suhu antara 4-37 °C dan tidak memproduksi antibiotik (Ray, 2012). Beberapa hasil kajian menunjukkan bahwa *Bacillus aryabhatai* memiliki kemampuan untuk mendegradasi pestisida. Wahyuni et al. (2011) melaporkan bahwa *Bacillus aryabhatai* yang diisolasi dari tanah karawang mempunyai kemampuan dalam mendegradasi cemaran pestisida. Selain mampu mendegradasi cemaran pestisida, pemberian *Bacillus aryabhatai* memberi pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman, pH tanah, panjang akar, berat akar, dan produksi bawang daun, serta memperbanyak populasi *Rhizobium* (Wahyuni et al., 2018). Sementara itu, Penelitian yang dilakukan oleh Pailan et al., (2015) melaporkan bahwa *Bacillus aryabhatai* mampu menurunkan hampir 56% parathion dalam kurun waktu 24 jam pada suhu 37 °C. *Bacillus aryabhatai* dapat digunakan sebagai bioremediasi pada lingkungan yang tercemar glifosat (Elarabi et al., 2020).

c. Kompos Balingtan

Kompos Balingtan merupakan pupuk kompos yang memiliki kemampuan untuk menyuburkan tanah dan mengikat pencemar residu insektisida organoklorin (lindan) di lahan pertanian padi sawah. Pupuk kompos Balingtan memiliki kemampuan mengikat konsentrasi residu insektisida (lindan) di

tanah sawah pada fase 1 hst, primordia, dan saat panen masing-masing 0,6908 ppm, 0,0293 ppm, dan 0,0230 ppm (Sarwoto *et al.*, 2017). Karakteristik Kimia Kompos Balingtan dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18. Karakteristik Kimia Kompos Balingtan

Pupuk	pH	Kadar Air	C-Organik	N-Total	N-NH ₄ ⁺	N-Organik	C/N
%							
Kompos Balingtan	7,06	56,26	17,36	1,66	0,97	0,69	25,16

Sumber: Sarwoto *et al.*, 2017

Adapun proses pembuatan kompos balingtan adalah sebagai berikut:

Bahan:

2 ton abu limbah pabrik gula (blotong)	10 kg Kapur
1 ton kotoran sapi	0,036 kg gula pasir
2 L EM4	0,03 kg urea
Dedak (secukupnya)	10 L Air

Cara Pembuatan:

- a) Pembuatan larutan biovektan
Dilarutkan EM4 kedalam air kemudian ditambahkan gula pasir, urea lalu aduk hingga tercampur rata. Diamkan selama 6-8 jam.
- b) Pembuatan pupuk kompos
Dicampur kotoran sapi, blotong, dedak, dan kapur hingga rata diatas plastik/terpal bersih.
- c) Dicampurkan larutan biovektan (langkah a) ke dalam pupuk kompos (langkah b) hingga rata dan diinkubasi dalam suhu ruangan tertutup selama 2-3 minggu.
- d) Dikemas/disimpan

Pengomposan merupakan salah satu teknologi bioremediasi tanah yang paling ekonomis. Ketika kompos dicampurkan ke dalam tanah, pestisida dapat mengalami mineralisasi dan proses fisikokimia dan biologis yang dapat

mengubah bentuk kimianya. Selama pengomposan, pestisida dapat terdegradasi pada proses pembusukan cepat. Panas yang dihasilkan oleh metabolisme mikroorganisme terperangkap dalam kompos, dan pembentukan biomassa terjadi selama tahap termofilik pengomposan. Pencampuran tanah yang diremediasi dengan tanah yang terkontaminasi dapat meningkatkan efektivitas pengomposan, karena tanah yang diremediasi oleh mikroorganisme yang terjadi secara signifikan mempengaruhi degradasi polutan dalam proses pengomposan (Megharaj, 2011).

Proses pengomposan yang sukses, membutuhkan konsorsium mikroorganisme yang cukup yang dapat menurunkan tingkat pestisida ke tingkat minimum (Geng *et al.*, 2015). Bakteri dan jamur, merupakan pengurai polutan utama dalam kompos dan menjadi faktor paling penting dalam pemulihan tanah yang terkontaminasi. Remediasi tanah yang terkontaminasi oleh kompos atau penambahan kompos bergantung pada dua mekanisme (Puglisi *et al.*, 2007) yakni adsorpsi oleh bahan organik dan degradasi oleh mikroorganisme, dimana penguraian polutan organik dalam campuran tanah sebagian besar bergantung pada aktivitas mikroorganisme.

d. Biokompos (Biochar-kompos)

Biokompos merupakan campuran pupuk kompos yang berasal dari seresah tanaman, limbah pertanian yang mempunyai kadar lignin rendah dan kotoran hewan dengan biochar. Biochar yang dipergunakan berasal dari limbah pertanian seperti sekam padi, tongkol jagung, tempurung kelapa, cangkang sawit, dll. Perbandingan biochar dan kompos yang dipergunakan yaitu 1 bagian biochar (20%) dan 4 bagian kompos (80%).

Tahapan pembuatan biokompos:

- a. Kompos dan biochar dikecilkan ukurannya ($\pm$ 0,5-2 mm) menggunakan mesin grinder
- b. Kompos dan biochar dicampur dan diaduk hingga rata menggunakan cangkul/sekop dengan perbandingan biochar dan kompos 1:4

- c. Campuran biochar-kompos kemudian diayak untuk memisahkan butiran kompos atau biochar yang masih berukuran besar
- d. Dikemas/disimpan dalam plastik atau karung

Biokompos merupakan salah satu metode remediasi yang mengkombinasikan remediasi fisik (biochar) dan bioremediasi (kompos) sehingga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengikatan residu pestisida, memperbaiki sifat tanah, dan hasil panen yang meningkat. Harsanti *et al.* (2019) melaporkan penggunaan biochar tongkol jagung yang dikombinasikan dengan kompos dapat menurunkan residu endosulfan dan meningkatkan kesuburan tanah serta hasil panen padi. Penggunaan kombinasi pupuk kandang dan biochar tongkol jagung signifikan mengurangi jumlah endosulfan dalam air perkolasi dan butir beras. Selain berfungsi sebagai remediasi, pembenah tanah organik yang terdiri dari pupuk kandang dan biochar tongkol jagung meningkatkan produktivitas padi signifikan sebanyak 8-26% (Harsanti *et al.*, 2018).

8.2.5. Biopestisida

Biopestisida yang dikembangkan Balingtan adalah pestisida nabati berbahan baku daun mimba, daun mahoni, kunyit, asap cair (produk samping proses pirolisis arang hayati dari limbah pertanian) dan urin kemudian ke dalam campuran pestisida nabati tersebut ditambahkan bakteri *Bacillus aryabhattai*. Mimba (*Azadirachta indica*) merupakan tanaman yang dapat berfungsi sebagai insektisida, fungisida, bakterisida, moluskisida, dan nematisida. Mimba dapat mengatasi serangan OPT untuk tanaman sayuran diantaranya *Agrotis ipsilon*, *Alternaria tenuis*, *Antigastra catauna*, *Culex fatigans*, *Ditylenchus cypei*, *Dysdercus conglutus*, *Epilachna varivestris*, *Fusarium oxysporum*, *Belalang*, *Lyzyomyza sativa*, *Meloidogyne arenaria*, *Nilaparvata lugens*, *Spodoptera frugiperda*, hama gudang, *Tribolium confusum* (Suryaningsih dan Hadisoeganda, 2004).

Pestisida yang diperkaya dengan bakteri dapat juga berfungsi sebagai pupuk organik selain sebagai pencegahan

serangan hama dan penyakit. Hasil kajian yang dilakukan Wahyuni *et al.* (2018) pada tanaman bawang menunjukkan bahwa *Bacillus aryabhatai* mampu meningkatkan populasi pengikat N simbiotik sehingga meningkatkan produksi bawang merah.

Biopestisida merupakan salah satu solusi ramah lingkungan dalam rangka menekan dampak negatif akibat penggunaan pestisida kimia yang berlebihan. Tahapan pembuatan Biopestisida:

Bahan:

Daun mahoni	Kunyit
Daun mimba	Asap cair
Urin sapi yang sudah diaerasi selama 21 hari	<i>Bacillus aryabhatai</i> air

Cara Pembuatan:

1. Daun mimba dirajang halus, kemudian direbus dengan perbandingan mimba dan air 1:2
2. Daun mahoni dirajang halus, kemudian direbus dengan perbandingan mimba dan air 1:2
3. Kunyit ditumbuk/blender, kemudian direbus dengan perbandingan kunyit dan air 1:1
4. Hasil rebusan mimba, mahoni, dan kunyit disaring
5. Ekstrak daun mimba dan daun mahoni dicampurkan masing-masing sebanyak 10 L
6. Sebanyak 2 L ekstrak kunyit, 10 L urin sapi, dan 1 L asap cair ditambahkan ke dalam campuran ekstrak mimba dan mahoni tadi, aduk hingga tercampur rata
7. Pestisida nabati kemudian disaring dan ditambahkan bakteri *Bacillus aryabhatai* sebanyak 100 ml
8. Biopestisida didiamkan selama 24 jam.
9. Dikemas dalam botol



Gambar 27. Biopestisida Balingtan
Sumber: Foto Koleksi Balingtan

Dosis penggunaan Biopestisida Balingtan ini adalah 10 cc/liter air, kebutuhan biopestisida per hektar $\pm$ 4 liter untuk satu kali semprot. Keuntungan Menggunakan Biopestisida yaitu:

- 1) Murah dan mudah diperoleh, jumlah bahan pestisida nabati melimpah di alam.
- 2) Penggunaannya dalam jumlah terbatas dan mudah terurai/busuk sehingga tidak
- 3) menimbulkan residu pada tanaman.
- 4) Aman bagi manusia, hewan, dan ramah lingkungan karena bahan aktif yang digunakan
- 5) mudah terurai di alam (biodegradable) tidak menyebabkan residu dan cemaran.
- 6) Pemakaian dengan dosis tinggi sekalipun masih relatif aman.
- 7) Produk pertanian yang dihasilkan lebih sehat.
- 8) Tidak mudah menyebabkan resistensi hama.
- 9) Kesehatan tanah lebih terjaga dan dapat meningkatkan bahan organik tanah.
- 10) Keberadaan musuh alami dapat dipertahankan.

Mekanisme pestisida nabati pada serangga hama dapat melalui mekanisme racun kontak oleh senyawa bioaktif acetogenin. Mekanisme acetogenin sebagai insektisida adalah dengan menghambat NADH ubikuinon reduktase (complex I) rantai pernapasan, dan secara langsung mempengaruhi transpor

elektron di mitokondria yang menyebabkan penurunan kadar ATP sehingga sel mengalami apoptosis (Tanaka *et al.*, 2014).

8.3. Manfaat Teknologi Pengendalian Cemaran yang Dianjurkan

Penggunaan pestisida oleh petani masih kurang bijaksana dalam hal pemberian dosis/jumlah yang berlebih serta jenis pestisida yang banyak. Petani menilai dengan penggunaan pestisida kimia akan menjaga jumlah produk hasil sehingga beranggapan pestisida yang digunakan selaras dengan jaminan hasil. Berbagai upaya pendekatan dan edukasi ke petani dilakukan untuk mengurangi penggunaan pestisida kimia seperti pengelolaan hama dan penyakit terpadu. Namun, masih banyak ditemukan petani yang secara intensif memberikan pestisida sintetik.

Permasalahan ini tidak boleh dibiarkan terus-menerus agar dampak yang ditimbulkan tidak semakin besar dan parah. Upaya yang dilakukan untuk mengurangi pencemaran residu pestisida yang tertinggal di tanah, tanaman, dan lingkungan yaitu dengan menggunakan teknologi pengendalian pencemaran residu pestisida. Teknologi yang telah dikembangkan antara lain: penggunaan arang aktif, biochar, FIO, Bioremediasi, Biochar-Kompos, Biopestisida, dll.

Teknologi pengendalian cemaran residu pestisida seyogyanya akan memberikan solusi yang sangat bermanfaat tidak hanya bagi petani tetapi juga bagi masyarakat, dan lingkungan alam di sekitarnya. Teknologi yang tepat guna dapat dikembangkan untuk mengatasi dampak negatif yang ditimbulkan serta dapat memecahkan permasalahan yang sebelumnya masih belum bisa terselesaikan dan menimbulkan kerugian. Pemanfaatan teknologi pengendalian cemaran residu pestisida akan memberikan perubahan positif pada sudut pandang kajian sosial, ekonomi, dan lingkungan.

a. Kajian sosial

Teknologi pengendalian cemaran residu pestisida akan membawa dampak positif terhadap kualitas produk pertanian. Menurut kajian sosial teknologi yang diintroduksi ke petani

akan membawa perubahan-perubahan ke arah yang lebih baik serta teknologi yang digunakan tidak akan menimbulkan pertentangan sosial di masyarakat. Oleh karena itu sebelum teknologi tersebut didiseminasikan ke petani, teknologi telah melalui proses penelitian dan pengkajian terlebih dahulu.

Beberapa teknologi yang telah melalui proses penelitian dan pengkajian selanjutnya dapat diadopsi oleh petani. Teknologi tersebut seperti penggunaan pupuk kompos dan biochar yang mampu menggantikan dan mengurangi dosis pupuk kimia serta aplikasi pestisida nabati untuk mengendalikan serangan OPT. Penggunaan pestisida nabati akan meminimalisir penggunaan pestisida sintesis.

Jika ditinjau dari aspek sosial pada suatu kelompok tani akan menjadi hubungan kerjasama dan keakraban yang baik antar petani. Sekumpulan petani akan bahu membahu menyiapkan bahan dan memproses pembuatan pestisida nabati. Beberapa petani akan mencari tanaman lokal yang ampuh digunakan sebagai bahan pestisida nabati. Hal ini akan menjadi mudah jika dapat dikerjakan bersama dan gotong-royong. Kemudian mereka secara serentak akan mengaplikasikan biopestisida tersebut ke lahan sehingga tujuan pengendalian serangan OPT dapat tercapai. Selanjutnya kelompok tani tersebut dapat melakukan pemantauan dan monitoring untuk keefektifan dari penggunaan pestisida nabati. Masing-masing individu petani juga bisa sharing pengetahuan dari pengalaman yang mereka miliki.

Saat ini konsumen dapat memilih dan memilah produk hasil pertanian yang sebaiknya dikonsumsi dan tidak mengakibatkan kesehatan yang buruk bagi tubuhnya. Konsep ini dikenal dengan *consumer value perception* (CVP), daya beli konsumen tidak hanya memperhatikan harga produk saja, tetapi juga hal-hal lain yang dihasilkan dari produk tersebut, seperti keamanan pangan dan bebas residu pestisida. Konsumen tentunya lebih waspada terhadap produk pertanian yang mengandung residu pestisida. Dampak kesehatan buruk yang akan terpengaruh pada tubuh konsumen tentunya akan di hindari. Teknologi pengendalian cemaran merupakan jawaban atas permasalahan pencemaran residu pestisida yang ada saat ini.

Dengan meminimalkan tingkat residu pertanian pada produk pertanian diharapkan nilai jual produk semakin tinggi dan membuka peluang ekspor serta keamanan produk pertanian terjamin sehingga konsumen merasa aman untuk mengkonsumsi.

Teknologi pengendalian dan pengelolaan budidaya pertanian diusahakan menggunakan teknologi ramah lingkungan, tapi juga tetap memperhatikan faktor ekologi dan ekonomi sehingga kesejahteraan petani dapat tercapai. Disamping itu teknologi yang digunakan tidak memunculkan permasalahan baru atau dampak sosial yang tidak baik. Kemunculan teknologi yang ada diupayakan sebagai pembawa perubahan demi kemaslahatan bersama antara alam dan lingkungannya.

b. Kajian Ekonomi

Secara finansial terjangkau, secara nyata dapat meningkatkan kesejahteraan petani. Teknologi yang telah diciptakan akan mengalami perkembangan dan modifikasi dari waktu ke waktu. Teknologi yang dihasilkan akan memudahkan manusia dalam menyelesaikan permasalahan yang terjadi. Teknologi yang telah di aplikasikan dapat digunakan sebagai solusi atas permasalahan yang selama ini tidak terpecahkan.

Permasalahan yang muncul selama ini, Indonesia tidak bisa mengekspor produk pertanian karena produk pertaniannya masih mengandung residu pestisida yang nilainya masih di atas BMR (Batas Maksimum Residu) untuk negara yang dituju. Sudah sering terjadi klaim/penolakan atas produk ekspor pertanian dari Indonesia yang dikirim ke banyak negara. Produk sayuran petani Sumatera Utara ditolak pasar Singapura karena mengandung residu pestisida yang melebihi BMR yang berlaku di negara tersebut. Begitu juga sayuran paprika pernah ditolak masuk Taiwan dikarenakan mengandung hama lalat buah. Oleh karena itu, hal ini akan menyebabkan kerugian yang besar bagi negara, eksportir maupun petani (Hasyim, *et al.*, 2015).

Dengan digunakannya teknologi pengendalian residu pestisida yang tepat guna diharapkan residu pestisida yang masih terkandung di dalam produk pertanian akan berkurang sehingga akan membuka peluang ekspor produk pertanian ke

mancanegara. Disamping itu juga akan membuka pasar ekspor produk pertanian secara lebih luas ke banyak negara, sehingga pendapatan negara akan meningkat, petani semakin sejahtera, dan membuka peluang tenaga kerja baru.

Teknologi yang dikembangkan untuk pengendalian cemaran residu pestisida termasuk *low external input technology* (LEIT), dengan menggunakan bahan agro kimia secara benar, tepat waktu, dosis dan cara sehingga tidak menimbulkan pencemaran lingkungan, baik pencemaran tanah, air dan udara, produksi tetap tinggi, secara ekonomi menguntungkan dan aman untuk dikonsumsi. Hasil penelitian Setiawati *et al.* (2018) pada budidaya cabai merah dengan penerapan LEIT (pengurangan penggunaan pupuk dan pestisida sintetis), diganti dengan kompos dan biopestisida pada saat berbunga memberikan hasil terbaik untuk budidaya cabai merah ramah lingkungan. Penerapan teknologi LEIT mampu mengurangi penggunaan pupuk NPK sebesar 37,5%, penggunaan pestisida 50 – 60%, produksi tetap tinggi (9,49 ton/ha), meningkatkan pendapatan 27,71%, aman terhadap predator *M. sexmaculatus* dan ramah lingkungan.

Selain itu juga terdapat konsep pertanian berkelanjutan yaitu LEISA (*Low External Input Sustainable Agriculture*). LEISA dapat dijadikan suatu acuan pertanian untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumberdaya lokal dengan kombinasi komponen usaha tani yang sinergistik serta pemanfaatan input luar sebagai pelengkap untuk meningkatkan efektivitas sumberdaya dan meminimalkan kerusakan lingkungan. Teknik budidaya LEISA merupakan teknik budidaya dimana penggunaan input anorganik diimbangi dengan penggunaan input organik. Konsep LEISA ini berusaha mengamankan kondisi tanah yang sesuai dengan pertumbuhan tanaman. Kondisi tanah yang baik harus mampu menyediakan air, udara dan hara yang tepat waktu dalam jumlah yang seimbang dan tersedia. Pengawetan kondisi tanah dapat dilakukan melalui pengelolaan bahan organik, pengelolaan tanah dan pengelolaan kesehatan tanah (Mustikarini *et al.*, 2020).

c. Kajian Lingkungan

Teknologi penanggulangan cemaran residu pestisida pada lingkungan pertanian harus mempertimbangkan faktor ekologis. Konsep lingkungan yang terintegrasi akan menciptakan sebuah agroekosistem yang berwawasan lingkungan. Teknologi pengendalian cemaran residu pestisida yang dikembangkan memiliki konsep *zero waste*, dengan memanfaatkan bahan-bahan limbah pertanian kemudian mengolah dan menjadikannya sebagai bahan teknologi pengendalian cemaran. Dengan menggunakan bahan sisa/limbah pertanian akan mengurangi jumlah limbah pertanian sehingga semua bahan akan termanfaatkan. Sifat dari bahan itu sendiri mudah didapat, bahan yang sudah tidak termanfaatkan/bahan yang tidak di gunakan lagi.

Sistem integrasi yang bisa diterapkan yaitu sistem integrasi tanaman dan ternak. Adapun keuntungan sistem integrasi tanaman dengan ternak, yaitu: (1) diversifikasi penggunaan sumberdaya produksi; (2) mengurangi risiko; (3) efisiensi penggunaan tenaga kerja; (4) efisiensi penggunaan komponen produksi; (5) mengurangi ketergantungan energi kimia dan energi biologi serta masukan sumberdaya lainnya dari luar; (6) sistem ekologi lebih lestari dan tidak menimbulkan polusi sehingga melindungi lingkungan hidup; (7) meningkatkan output; dan (8) mengembangkan rumah tangga petani yang lebih stabil (Risditiono, 2010).

Teknologi penanggulangan residu pestisida yang cermat dengan bahan-bahan limbah hasil pertanian akan membentuk suatu pola pertanian yang ramah lingkungan. Dalam acuan pencapaian kinerja teknologi sebaiknya menerapkan konsep *reduce, reuse, recycle, refine, retrieve energy*. *Reduce* berarti pengurangan penggunaan pestisida kimia, dan menggantinya dengan pestisida nabati. *Reuse* berarti pemanfaatan kembali bahan komponen teknologi seperti arang yang diaktivasi menjadi arang aktif. *Recycle* berarti pendaurulangan kembali seperti kotoran ternak yang dimanfaatkan sebagai pupuk. *Refine* berarti bahan yang digunakan lebih aman dan ramah lingkungan. *Retrieve energy* diartikan sebagai penghematan energi dalam proses

produksi seperti penggunaan biogas dari instalasi biogas dari kotoran sapi yang digunakan untuk membuat biochar.

Pengendalian OPT dengan mempertimbangkan kelestarian lingkungan memiliki risiko yang kecil, tidak mengakibatkan hama menjadi kebal ataupun resurgensi, serta aman bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Penggunaan pestisida selain berdampak positif juga dapat menimbulkan dampak negatif bila penggunaannya kurang bijaksana karena dapat menyebabkan resurgensi, resistensi, matinya musuh alami, dan pencemaran lingkungan melalui residu yang ditinggalkan serta menyebabkan keracunan pada manusia yang dampak jangka panjangnya lebih merugikan dibandingkan dengan manfaat yang diperoleh.

Penggunaan pestisida kimia juga akan menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem perairan. Kontaminasi insektisida profenofos terbukti mengganggu aktivitas fisiologis ikan nila merah. Pemanfaatan insektisida ramah lingkungan serta monitoring kesehatan lingkungan perairan secara menyeluruh dan berkelanjutan akan dapat mengurangi dampak dari penggunaan insektisida kimia (Adharini, *et al.*, 2016). Pemanfaatan pestisida nabati dan biopestisida merupakan solusi untuk mengurangi penggunaan pestisida sintetis/kimia sehingga keamanan dan kesehatan makhluk hidup di sekitar akan terjaga.

Penerapan pengendalian residu pestisida akan memberikan manfaat bagi lingkungan yaitu: (1) peningkatan produktivitas tanaman dengan memperhatikan keseimbangan lingkungan; (2) kelestarian lingkungan; (3) keamanan dan keselamatan petani; dan (4) keamanan konsumen.

Indikator kesuksesan penerapan pengendalian residu pestisida yaitu: (1) parasitoid dan predator dalam suatu ekosistem keseimbangan ekosistem tetap terjaga; (2) keanekaragaman hayati tetap lestari; (3) minimal dalam penggunaan residu pestisida; (4) biaya produksi dapat diturunkan; dan (5) dampak negatif terhadap OPT target dan ekosistem berkurang.

Teknologi pengendalian pencemaran residu pestisida merupakan upaya dan strategi yang perlu ditempuh dalam meminimalisasi tingkat residu pestisida saat ini. Teknologi

tersebut harus memperhatikan sumberdaya alam dan lingkungan termasuk faktor ekologis, nilai ekonomis, dan efisiensi. Tujuan dari pengendalian ini terciptanya produk pertanian yang aman dikonsumsi, tidak menimbulkan kerugian, dan kesejahteraan petani meningkat.

BAB IX

TEKNOLOGI REMEDIASI TERDAMPAK LOGAM BERAT PADA LINGKUNGAN PERTANIAN

*Triyani Dewi, Wahyu Purbalisa, Hidayatuz Zu'amah,
Dolty Mellyga Wangga Paputri*

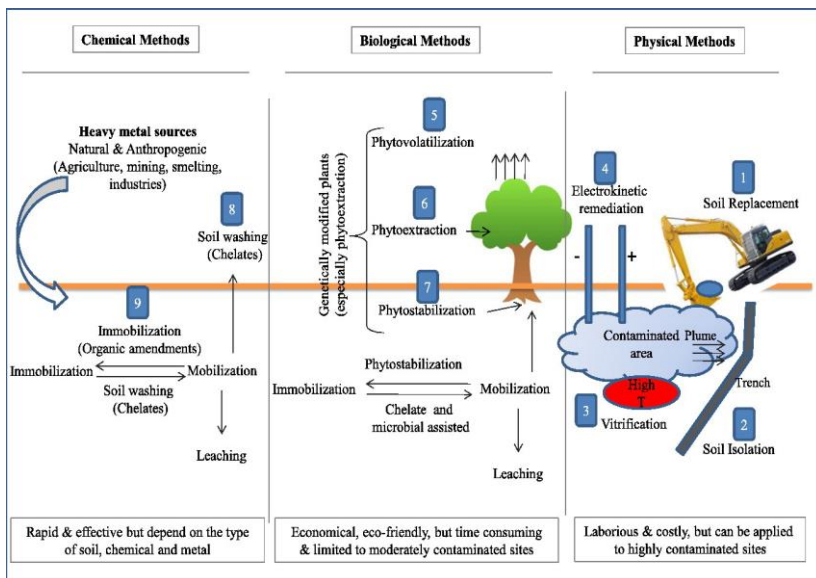
Pencemaran tanah merupakan faktor penting yang mengancam pembangunan pertanian berkelanjutan dan keamanan pangan. Kontaminasi logam berat di lahan pertanian disebabkan oleh aktivitas manusia seperti penggunaan irigasi dari air limbah dalam waktu yang lama, penggunaan pupuk dan pestisida yang masif, dan kegiatan industri dan pertambangan. Dampak kontaminasi logam berat di lahan pertanian dapat mempengaruhi pertumbuhan, biomassa, dan produksi tanaman, serta akumulasi logam berat pada produk pertanian yang akhirnya akan berpengaruh terhadap kesehatan manusia (Huang *et al.*, 2016).

9.1. Teknologi remediasi lahan terdampak logam berat

Logam berat tidak dapat didegradasi oleh mikroorganisme seperti kontaminan organik. Salah satu upaya mengurangi logam berat di lahan pertanian dapat dilakukan dengan cara remediasi. Remediasi pada lahan yang terkontaminasi logam berat bisa dilakukan secara fisik, kimia, dan biologi (Gambar 28) maupun kombinasi dari masing-masing metode. Remediasi secara fisik meliputi pemindahan tanah (*soil replacement*), isolasi tanah (*isolation soil*), vitrifikasi (*vitrification*), dan elektrokinetik (*electrokinetic remediation*). Metode remediasi secara biologi atau bioremediasi dalam aplikasinya dapat menggunakan tanaman (fitoremediasi) dan mikroba. Istilah fitoremediasi merupakan

teknik dimana tanaman dalam prosesnya mampu menyerap, menghilangkan, atau mengimobilisasi logam berat, melalui mekanisme fitovolatilisasi, fitostabilisasi, dan fitoekstraksi. Sedangkan remediasi secara kimia bisa dilakukan dengan teknik imobilisasi (*immobilization techniques*) dan pencucian tanah (*soil washing*) (Yao *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2016; Khalid *et al.*, 2017).

Remediasi secara fisik membutuhkan biaya yang besar untuk alat dan tenaga kerja, karena harus memindahkan atau membuang tanah dari lahan terkontaminasi logam berat ke lokasi lain. Remediasi secara kimia merupakan metode yang biayanya lebih rendah dibandingkan dengan metode fisik. Bahan kimia yang diperlukan dalam proses imobilisasi logam berat atau pencucian tanah umumnya sedikit karena dosis ekstrak kimia yang digunakan seperti EDTA relatif rendah. Bioremediasi atau metode secara biologi lebih ekonomis dibandingkan metode lainnya. Metode ini lebih ramah lingkungan karena memanfaatkan proses alami dan tetap menjaga lahan yang terkontaminasi logam tanpa merusak dengan tidak melibatkan aktivitas manusia (Shahid *et al.*, 2012; Khalid *et al.*, 2017).



Gambar 28. Metode remediasi lahan terkontaminasi logam berat
Sumber: Khalid *et al.*, 2017

9.1.1. Teknologi Remediasi dengan biochar, kompos, dan agen khelat

Aplikasi biochar dan kompos dianggap sebagai eco-remediasi yang potensial untuk mengurangi kontaminasi logam berat di tanah. Biochar berasal dari limbah pertanian efektif dalam menyerap logam berat dengan mengubah fisikokimia tanah dan menurunkan ketersediaan unsur-unsur berbahaya (Rai *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2018). Pengomposan dan biochar dapat dijadikan solusi ekologis dalam meningkatkan siklus nutrisi tanah, kapasitas tukar kation, humifikasi, dan secara efektif menurunkan konsentrasi logam berat. Li *et al.* (2018) menemukan bahwa biochar yang dikombinasikan dengan bakteri yang tahan logam seperti *Pseudomonas chendunsis* sangat mengurangi bioavailabilitas Cd pada lahan padi yang terkontaminasi logam berat.

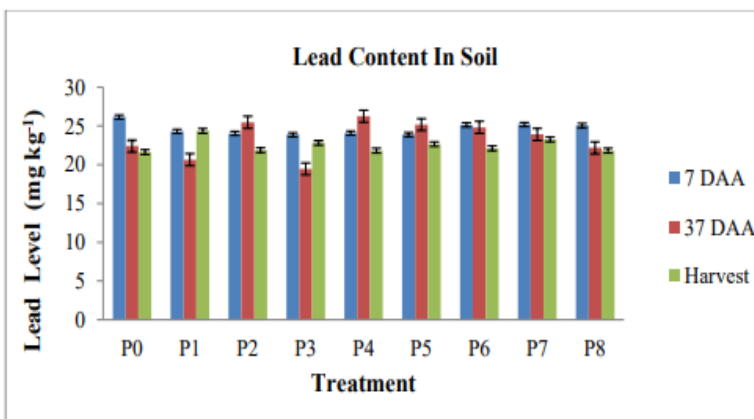
Biochar atau arang hayati adalah hasil proses pirolisis limbah pertanian terutama yang berkadar lignin tinggi seperti tempurung kelapa, cangkang sawit, kayu, tongkol jagung, dan sekam padi. Biochar tidak mengalami pelapukan lanjut sehingga mampu bertahan dalam jangka waktu yang lama sampai berjuta-juta tahun. Manfaat biochar menurut Nurida *et al.* (2015) antara lain: 1) Meningkatkan infiltrasi dan daya menahan air, 2) Memperbaiki struktur dan agregat tanah, 3) Meningkatkan kapasitas retensi hara esensial, seperti ion ammonium, fosfat dan kalsium, 4) Memperbaiki perkembangan akar, 5) Meningkatkan daya sanggah dan pH tanah, 6) Meningkatkan kapasitas pertukaran kation dan anion, 7) Meningkatkan aktivitas dan biodiversitas biologi tanah dengan menciptakan kondisi '*microba reef*', 8) Menghemat kebutuhan pupuk, 9) Mengurangi kehilangan hara dari pupuk akibat proses pencucian, terutama nitrat dan fosfat, dan 10) Memitigasi dampak perubahan iklim dengan menyimpan karbon (sekuistrasi C), dan penurunan emisi gas rumah kaca (CH₄, N₂O, dan CO₂).

Penelitian remediasi menggunakan biochar telah dilakukan oleh Purbalisa *et al.* (2021) dimana perlakuan nanobiochar + kompos (P3) berpotensi meningkatkan produktivitas tanaman sedangkan nanobiochar + kompos + bakteri konsorsium (P4) mampu mereduksi Pb dalam tanah lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya (Gambar 30). Penelitian lain yang dilakukan

Purbalisa dan Dewi (2019) menggunakan biokompos, kompos dan arang aktif untuk menurunkan kadar Co dalam tanah. Hasil terbaik pada perlakuan bioremediator dengan dosis 20 kg/ha dan arang aktif + kompos yang mampu menurunkan konsentrasi Co dalam tanah hingga 76%, kadar Co terendah dalam beras yaitu sebesar 3,06 mg/kg diperoleh dari perlakuan bioremediator 50 kg/ha + arang aktif + kompos.



Gambar 29. Biochar tongkol jagung
Sumber: Foto koleksi Balingtan



Gambar 30. Pengaruh perlakuan terhadap kadar Pb dalam tanah
Sumber: Purbalisa, 2021

Adsorpsi berperan penting dalam imobilisasi logam berat di dalam tanah. Kompos memiliki peran sebagai biosorben yang dapat mempengaruhi sifat fisika kimia tanah (misalnya pH, potensial redoks, dan bahan organik), sehingga secara tidak langsung meningkatkan penyerapan logam berat oleh tanah (Soares *et al.*, 2016; Kargar *et al.*, 2015).

Pengendapan merupakan proses imobilisasi logam berat karena menyebabkan kelarutan yang rendah dalam tanah. Bahan humat merupakan komponen yang penting dari kompos, setelah aplikasi kompos ke tanah, bahan humat bereaksi dengan logam berat untuk menghasilkan kompleks asam humat yang tidak larut atau terlalu stabil untuk dihidrolisis, dan akhirnya diendapkan. Aplikasi kompos pada lahan pertanian yang terkontaminasi logam berat dapat mengurangi bioavailabilitas logam berat, sehingga tidak membahayakan bagi tanah, tanaman, mikroorganisme, dan hewan tanah (Huang *et al.*, 2016).

Beberapa logam berat yang valensinya bisa berubah seperti As dan Cr memiliki fitotoksitas, bioavailabilitas, dan mobilitas yang berbeda tergantung valensinya. Reaksi yang terjadi antara logam berat dengan bahan organik dalam kompos dapat mengubah keadaan toksik logam berat menjadi tidak toksik. Bahan organik terlarut (*dissolved organic matter*) yang terkandung dalam kompos mendorong reaksi logam berat, seperti reduksi Cr^{6+} menjadi Cr^{3+} (Chiu *et al.*, 2009).

Zu'amah *et al.* (2021) melaporkan bahwa remediasi lahan terkontaminasi arsen (As) menggunakan biochar-kompos, kitosan, EDTA, amonium tiosulfat, dan zeolite mampu mereduksi As dalam tanah hingga 70% dibandingkan dengan kontrol. Biochar-kompos dan zeolit direkomendasikan karena kemampuannya dalam menurunkan konsentrasi arsen dalam tanah. Penelitian serupa dilakukan oleh Purbalisa *et al.* (2019) di daerah Brebes, Jawa Tengah menunjukkan persentase penurunan konsentrasi Pb dalam tanah setelah perlakuan bahan pengkelat (*chelating agent*) mengalami penurunan lebih dari 50%, namun perlakuan EDTA kurang mendukung pertumbuhan dan produksi tanaman (Tabel 19).

Tabel 19. Pengaruh perlakuan terhadap persentase pengurangan Pb dalam tanah dan hasil bawang merah di Kab. Brebes

Perlakuan	Persentase penurunan Pb dalam tanah	Hasil bawang merah (g/m ²)	
	(%)		
	7 hari setelah perlakuan	Setelah panen	
Kontrol	4,0	12,2	5971 a
Kitosan	56,6	62,0	5096 a
EDTA	51,8	64,5	1488 c
Biokompos	50,5	60,2	5843 a
Zeolit	53,3	63,3	5663 a
Ammonium thiosulphate	56,4	61,9	3460 b

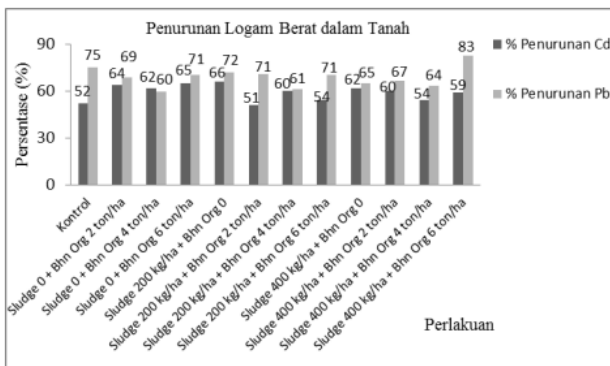
Sumber: Purbalisa *et al.*, 2019

Penambahan EDTA sebagai khelator ke dalam tanah tercemar Pb (Pb total 2500 mg/kg) meningkatkan konsentrasi Pb pada tajuk tanaman jagung (*Zea mays*, L) dan *Pisum sativum* dari <500 mg/kg hingga > 10.000 mg/kg. Pengujian agen khelat, urutan keefektifannya dalam meningkatkan desorpsi Pb pada tanah adalah EDTA > HEDTA > DTPA > EDDHA (Huang *et al.*, 1997). Pemberian agen khelat menunjukkan efek positif dalam meningkatkan kelarutan logam dalam tanah dan meningkatkan fitoekstraksi. Namun, efektivitas agen khelat yang berbeda ini bervariasi tergantung jenis tanaman yang digunakan, jumlah khelator yang ditambahkan, sifat-sifat tanah dan jenis logam beratnya. (Evangelou *et al.*, 2007).

Salah satu usaha untuk mengurangi pencemaran tanah dengan menggunakan *sludge* karena dalam *sludge* terkandung kebutuhan hara yang dibutuhkan tanaman dan juga mengandung bakteri yang dapat mengurai unsur dalam tanah sehingga mudah diserap tanaman ataupun mengurai logam berat. *Sludge* kaya akan unsur-unsur tertentu seperti protein, lignin, selulose yang tidak dapat digantikan oleh pupuk kimia (Rahayu *et al.*, 2009). Hasil yang diharapkan dari pupuk organik *bio-slurry (sludge)* dapat mengurangi ketergantungan masyarakat terhadap penggunaan pupuk kimia, karena pupuk organik yang dihasilkan sudah mencukupi nutrisi yang dibutuhkan oleh tanaman dan

dapat memperbaiki kondisi tanah secara perlahan serta dapat menekan biaya produksi (Muanah, 2019).

Remediasi tanah tercemar logam berat Pb dan Cd menggunakan *sludge* plus, fungi mikoriza arbuskular (FMA) dan tanaman rami mampu menurunkan konsentrasi logam berat Pb dan Cd dalam tanah > 50% serta pemberian kombinasi antara *sludge* plus dosis 400 kg/ha dan bahan organik yang berasal dari kotoran ayam dosis 6 t/ha mampu menurunkan konsentrasi logam berat Pb dan Cd tanah masing-masing sebesar 83% dan 59% (Purbalisa *et al.*, 2013).



Gambar 31. Persentase penurunan Pb dan Cd setelah aplikasi *sludge* plus

Sumber: Purbalisa *et al.*, 2013

9.1.2. Fitoremediasi terhadap logam berat

Teknik fitoremediasi banyak dibahas dalam beberapa artikel. Beberapa definisi fitoremediasi dijelaskan oleh beberapa peneliti yang disajikan dalam Tabel 20. Teknologi ini ramah lingkungan dan biaya yang rendah. Tanaman dengan kemampuan dapat menyerap kontaminan disebut tanaman hiperakumulator. Beberapa spesies tanaman dilaporkan mampu menyerap kontaminan seperti timbal, kadmium, kromium, arsen, dan bahan radionuklida dari tanah (Cho-Ruk *et al.*, 2006).

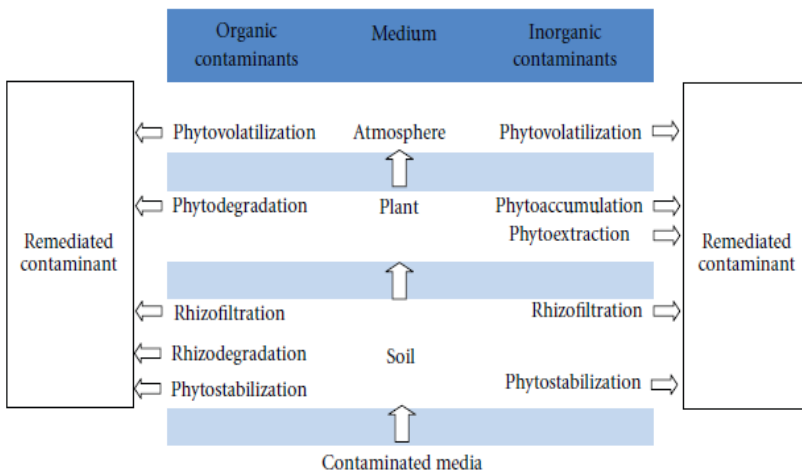
Tabel 20. Beberapa definisi fitoremediasi

No	Definisi fitoremediasi	Sumber
1.	Penggunaan tanaman untuk memperbaiki lingkungan yang mengalami degradasi	Moreno <i>et al.</i> (2008)
2.	Penggunaan tanaman, termasuk pohon-pohonan dan rumput-rumputan untuk mengurangi, menghilangkan, atau menyerap kontaminan berbahaya dari air, udara, dan tanah	Prasad <i>et al.</i> (2003)
3.	Penggunaan tanaman untuk meremediasi bahan toksik yang ditemukan dalam lahan terkontaminasi, limbah, sedimen, air tanah, air permukaan, dan limbah cair.	Rodriguez <i>et al.</i> (2005)
4.	Teknologi yang menggunakan tanaman penyerap logam yang dipilih dan direayasa secara khusus untuk membersihkan lingkungan	Liu <i>et al.</i> (2000)
5.	Penggunaan tanaman yang mempunyai pembuluh untuk menghilangkan polutan dari lingkungan atau menjadikan tidak berbahaya	Bhattacharya <i>et al.</i> (2006)
6.	Penggunaan tanaman yang direayasa untuk menghilangkan, menahan, atau membuat bahan kontaminan (seperti logam berat, senyawa organik, senyawa radioaktif) menjadi tidak berbahaya dalam lingkungan baik dalam tanah maupun air.	Hinchman <i>et al.</i> (1995)
7.	Fitoremediasi adalah nama yang diberikan untuk teknologi yang menggunakan tanaman yang berbeda sebagai penahan, penghancuran, atau teknik ekstraksi dari tanah dan air yang terkontaminasi.	USEPA (2000)
8.	Fitoremediasi secara umum merupakan cara untuk menghilangkan, menurunkan, atau menstabilkan kontaminan menggunakan tanaman dan asosiasinya dengan mikroorganisme.	Roy <i>et al.</i> (2005)

Mekanisme penyerapan kontaminan organik dan anorganik melalui teknologi fitoremediasi disajikan dalam Gambar 32. Pada kontaminan organik melibatkan fitostabilisasi, rhizodegradasi, rhizofiltrasi, fitodegradasi, dan fitovolatilisasi. Mekanisme ini berhubungan dengan kontaminan organik yang tidak dapat diserap ke dalam jaringan tanaman. Mekanisme yang terjadi pada kontaminan anorganik proses yang terlibat adalah fitostabilisasi,

rhizofiltrasi, fitoakumulasi, dan fitovolatilisasi (Tangahu *et al.*, 2011). Proses-proses tersebut antara lain (Erakhrumen *et al.*, 2007; Erdei *et al.*, 2005; USEPA, 2005):

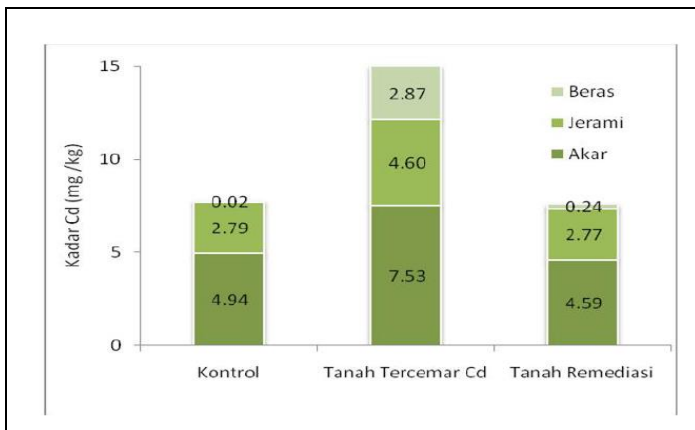
- Fitoekstraksi adalah serapan dan tranlokasi kontaminan oleh akar tanaman ke bagian atas tanaman yang dipanen dan dibakar untuk mendapatkan energi dan daur ulang logam dari abu
- Fitostabilisasi adalah penggunaan tanaman tertentu untuk mengimobilisasi kontaminan dalam tanah dan air tanah melalui penyerapan dan akumulasi dalam jaringan tanaman, penyerapan oleh akar, atau pengendapan dalam zona akar untuk mencegah perpindahan kontaminan dalam tanah oleh erosi dan deflasi
- Rizofiltrasi merupakan penyerapan atau pengendapan kontaminan oleh akar tanaman atau penyerapan dan sekuestrasi di sekitar akar tanaman untuk membersihkan air limbah melalui "*constructed wetland*".
- Fitovolatilisasi adalah penyerapan dan transpirasi kontaminan oleh tanaman dengan pelepasan kontaminan dalam bentuk modifikasi ke atmosfer. Proses fitovolatilisasi terjadi saat kontaminan melewati tanaman ke daun dan menguap ke atmosfer dalam konsentrasi yang lebih rendah.



Gambar 32. Mekanisme serapan dalam teknologi fitoremediasi

Sumber: ITRC, 2009; Tangahu *et al.*, 2011

Remediasi pada lahan padi biasa ataupun organik menggunakan teknologi yang dapat diterapkan dalam minimalisasi logam berat dengan menambahkan bahan organik dan biochar ke dalam tanah dan melakukan fitoremediasi menggunakan tanaman air pada pintu masuk air (*inlet*) di lokasi pengembangan padi organik (Hindarwati *et al.*, 2020). Purbalisa *et al.* (2017) melaporkan bahwa kadmium terdeteksi pada tanaman padi (akar, Jerami, dan beras), dan akumulasi Cd paling tinggi di akar. Konsentrasi Cd pada tanaman padi yang ditanam pada tanah yang sudah dilakukan remediasi tidak berbeda jauh dengan tanaman padi pada tanah yang tidak terkontaminasi (kontrol), sehingga beras yang dihasilkan aman untuk dikonsumsi.



Gambar 33. Konsentrasi Cd pada tiap bagian tanaman padi
Sumber: Purbalisa *et al.*, 2017

Fitoremediasi menggunakan *Caladium bicolor* mampu menurunkan kadar arsenik dalam tanah hingga 19,43%. Tanaman ini juga dapat mengakumulasi arsenik dalam jaringan tanaman yaitu akar dan daun (Purbalisa dan Handayani, 2017). Zhou *et al.* (2020) menjelaskan bahwa tanaman rami (*Boehmeria nivea*, Gaud) mampu menyerap Cd sebesar 0,17 t/ha. Tanaman mempunyai kemampuan untuk menahan logam berat dalam tanah dan tetap berada di sekitar perakaran. Akar tanaman merupakan tempat pertama terjadi kontak dengan logam berat,

sehingga banyak terakumulasi dalam akar. Penambahan fungi mikoriza arbuskula (FMA) meningkatkan kemampuan akar dalam menyerap logam dan mengurangi translokasinya ke bagian tajuk tanaman.

9.2. Upaya remediasi dalam mitigasi cemaran logam berat ke depan

Latar belakang pengetahuan tentang sumber, sifat kimia, dan potensi risiko logam berat di lahan terkontaminasi diperlukan dalam menentukan pilihan remediasi yang sesuai. Upaya remediasi diperlukan untuk mengurangi risiko, menjaga sumberdaya lahan tersedia untuk produksi pertanian, dan meningkatkan ketahanan dan keamanan pangan (Wuana dan Okieimen, 2011).

Aplikasi kompos secara tunggal menimbulkan kontaminan logam berat pada tanah. Tingkat kematangan kompos yang masih rendah, tidak hanya membahayakan pertumbuhan tanaman dan mikroba tetapi juga mengurangi efektivitasnya sebagai pembenah tanah. Penambahan kompos saja kemungkinan kurang sesuai dalam remediasi lahan pertanian terkontaminasi beberapa logam berat karena perbedaan sifat-sifat tanah, kompos, dan logam berat. Kompos hanya mampu mengimobilisasi logam berat dalam tanah dan mengurangi availabilitas dan serapan oleh tanaman, sedangkan logam beratnya masih tertahan dalam tanah.

Untuk itu diperlukan upaya remediasi kontaminan logam berat di lahan pertanian seperti kombinasi penambahan kompos dan pembenah tanah lainnya. Pemberian kompos dengan fitoremediasi, dapat direkomendasikan untuk memperbaiki dan mengurangi kontaminan logam berat di lahan pertanian karena mampu meningkatkan efektivitas dan mengurangi risiko jangka panjang pemberian kompos. Dari aspek lain dalam kegiatan pertanian, pengelolaan air dan pola penggunaan lahan merupakan hal yang perlu diperhatikan dalam proses remediasi.

BAB X

STRATEGI PENGELOLAAN LINGKUNGAN PERTANIAN

*Anicetus Wihardjaka, Wahida Annisa Helena Lina Susilawati,
Elisabeth Srihayu Harsanti*

Undang-Undang No. 18 Tahun 2012 tentang Pangan mengamatkan bahwa sasaran pembangunan pertanian adalah tercapainya kemandirian, kedaulatan, ketahanan, dan keamanan pangan. Pencapaian sasaran pembangunan pertanian tersebut dilakukan dengan pendekatan sistem pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan. Sistem pertanian ramah lingkungan diarahkan untuk meningkatkan dan memantapkan produksi dan produktivitas tanaman pertanian baik tanaman pangan, hortikultura, perkebunan dan peternakan, dengan memperhatikan kelestarian lingkungan. Peningkatan produktivitas tanaman pangan hendaknya juga diimbangi dengan peningkatan kualitas tanah dan produk pertanian. Dalam mencapai sasaran tersebut, budidaya tanaman pertanian, khususnya tanaman pangan dilakukan dengan pendekatan budidaya pertanian yang baik (*good agricultural practices/GAP*) yang tidak lain adalah sistem pertanian ramah lingkungan (Wihardjaka, 2018).

Keberhasilan mewujudkan ketahanan dan kemandirian pangan diiringi dengan kelestarian lingkungan dan sumberdaya alam. Pemanfaatan sumberdaya alam dilakukan secara bijaksana. Mempertimbangkan daya dukung, dan menghindari penggunaan yang eksploitatif dan berlebihan. Lingkungan merupakan interaksi komponen ekologi baik biotik maupun abiotik dan komponen sosial-budaya-ekonomi, maka sistem pertanian dan pemanfaatan sumberdaya alam dipengaruhi oleh hukum-hukum alam yang berlaku seperti hukum termodinamika 1 (hukum

kekekalan energi) dan hukum termodinamika 2 (hukum entropi). Hukum termodinamika 1 menekankan bahwa energi tidak dapat diciptakan, tetapi energi dapat berubah bentuk, misal limbah pertanian diubah menjadi energi terbarukan atau produk kompos, sedang hukum termodinamika 2 menekankan bahwa setiap penggunaan suatu bentuk atau unit energi tidak pernah mencapai efisiensi 100%, yang berarti terdapat sisa energi yang tidak terpakai (entropi) misal limbah pertanian dimanfaatkan untuk bahan baku kompos atau arang hayati/biochar (Tandjung, 2003).

9.1. Sistem pertanian ramah lingkungan

Sistem pertanian ramah lingkungan merupakan sistem pertanian berkelanjutan, yang penyelenggaraan berdasar Undang-Undang No 22 tahun 2019 meliputi asas kebermanfaatan, keberlanjutan, berkedaulatan, keterpaduan, kebersamaan, kemandirian, keterbukaan, efisiensi berkeadilan, kearifan lokal, kelestarian fungsi lingkungan hidup, dan perlindungan negara. Pertanian berkelanjutan didefinisikan sebagai pengelolaan dan konservasi berbasis sumberdaya alam, dan berorientasi pada perubahan teknologi dan kelembagaan yang sedemikian rupa untuk memastikan pencapaian dan melanjutkan pemenuhan kebutuhan manusia di masa kini dan generasi masa depan, dengan melestarikan tanah, air, sumberdaya genetik tumbuhan dan hewan, tidak merusak lingkungan, layak secara teknis, layak secara ekonomi dan dapat diterima secara sosial (Oberc dan Schnell, 2020).

Tuntutan ketersediaan hasil pertanian yang higienis, aman dikonsumsi, bebas kontaminan mendorong penerapan sistem pertanian ramah lingkungan. Beberapa alasan mendorong penerapan sistem berkelanjutan tersebut, antara lain: (i) Negara-negara dalam KTT Bumi sepakat untuk berperan aktif dalam upaya pelestarian lingkungan hidup melalui pengurangan limbah industri dan eksploitasi sumberdaya alam secara bertanggung jawab; (ii) Peningkatan kesejahteraan ekonomi masyarakat dan kesadaran pentingnya kualitas hidup yang didukung kualitas lingkungan sehat dan bersih; dan (iii) Kesadaran masyarakat tentang berharganya kesehatan dengan memperhatikan kualitas produk pangan yang aman dikonsumsi dan bergizi (Lagiman,

2020). Sebagai sistem pertanian berkelanjutan, pertanian ramah lingkungan bertujuan untuk (a) meningkatkan dan memperluas penganeekaragaman hasilPertanian, guna memenuhi kebutuhan pangan, sandang,papan, kesehatan, industri dalam negeri, danmemperbesar ekspor; (b) meningkatkan pendapatan dan taraf hidup petani; dan (c) mendorong perluasan dan pemerataan kesempatanberusaha dan kesempatan kerja (UU No. 22, tahun 2019).

Pertanian ramah lingkungan diarahkan sebagai upaya utuk meningkatkan produksi dan produktivitas tanaman pertanian dengan memperhatikan kelestarian lingkungan sebagai upaya dalam meningkatkan kesejahteraan masyarakat secara berkelanjutan. Sebagai sistem yang berkelanjutan, kegiatan pertanian memenuhi pendekatan ekologi, sosial, budaya, dan ekonomi, yang antara lain mencakup (i) Peningkatan produktivitas, (ii) Rendah emisi gasrumah kaca, (iii) Adaptif terhadap perubahan iklim, (iv) Penerapan pengendalian organisme pengganggu tanaman secara terpadu, (v) Rendah cemaran logam berat, (vi) Bebas limbah (Zero Waste), (vii) Pemanfaatan sumberdaya lokal, (viii) Terjaganya keanekaragaman hayati, (ix) Penerapan inovasi berbasis integrasi, dan (x) Konservasi tanah dan air (Wihardjaka dan Setyanto, 2014).

Pertanian ramah lingkungan adalah solusi perbaikan dari dampak revolusi hijau yang mampu mengungkit produktivitas dan produksi tanaman pangan, namun revolusi hijau berdampak negative terhadap penurunan kualitas lingkungan pertanian. Dampak penerapan teknologi revolusi hijau terlihat pada Tabel 21. Menurut Kassam dan Friedrich (2012), dampak yang diakibatkan dari revolusi hijau antara lain:

- Hilangnya bahan organik tanah, porositas, aerasi, biota yang berperan dalam kesehatan tanah, penurunan struktur tanah, peningkatan pemadatan tanah, penurunan infiltrasi tanah;
- Hilangnya air sebagai limpasan dan tanah sebagai sedimen;
- Hilangnya waktu, benih, pupuk, pestisida (erosi, pencucian);
- Penurunan kapasitas tanah dalam menangkap dan melepaskan air secara perlahan dan nutrisi;

- Kurang efisiensi penggunaan pupuk mineral: “Tanaman menjadi 'kecanduan' pupuk”;
- Hilangnya keanekaragaman hayati dalam ekosistem, di bawah dan di atas permukaan tanah;
- Permasalahan hama lebih banyak masalah hama (penguraian jaring makanan untuk mikroorganisme dan pengendalian hama alami);
- Penurunan efisiensi input dan produktivitas faktor, penurunan hasil;
- Berkurangnya ketahanan, berkurangnya keberlanjutan;
- Kemampuan beradaptasi yang buruk terhadap perubahan iklim dan mitigasinya;
- Biaya produksi yang lebih tinggi, produktivitas pertanian yang lebih rendah dan keuntungan, jasa ekosistem yang terdegradasi.

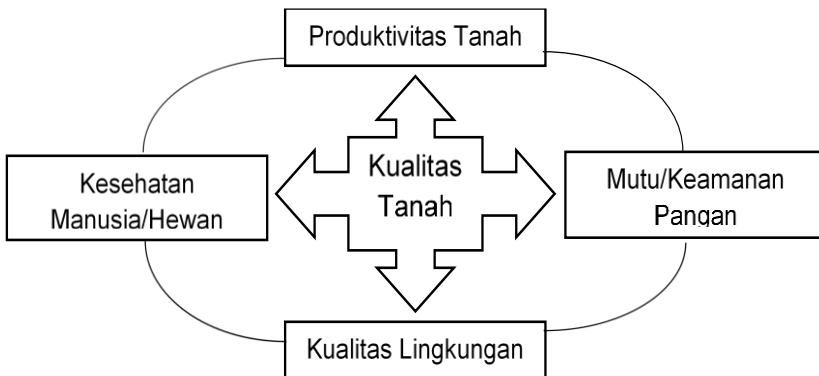
Tabel 21. Dampak teknologi produksi pada revolusi hijau

Kegiatan produksi	Teknologi pertanian revolusi hijau	Dampak teknologi
Olah tanah	Bajak, garu intensif	Erosi, boros energi fosil
Tanam	Tanam monokultur dg bibit	Rentan serangan OPT
Pelihara	Pupuk kimia, pestisida kimia	Sifat fisik tanah rusak, polusi air tanah dan udara
Panen	Pemotongan produk panen, sisa bahan organik bersih dari permukaan tanah	Produk tercemar pestisida kimia, BOT turun, pemadatan tanah

Sumber: Hidayat *et al.*, 2020

Pengelolaan pertanian tidak berkelanjutan dapat menurunkan kandungan bahan organik yang mengakibatkan penurunan kualitas tanah (Wihardjaka, 2021). Kualitas tanah menentukan produktivitas tanah, kualitas lingkungan, mutu atau

keamanan pangan, dan kesehatan manusia/hewan yang saling berinteraksi satu sama lain (Gambar 34). Penurunan kandungan C organik dalam tanah dipercepat dengan praktik budidaya secara terus menerus, olah tanah secara intensif, dan tanpa pengembalian sisa tanaman/biomassa setelah panen. Degradasi lingkungan akibat kegiatan pertanian selalu menjadi permasalahan serius baik skala lokal, regional, maupun global mendorong petani konvensional beralih pada budidaya pertanian berwawasan lingkungan yang dalam jangka panjang berkontribusi terhadap pertanian berkelanjutan. Pertanian berkelanjutan menghasilkan produksi tanaman yang baik dengan mengurangi dampak dari faktor ekologis seperti kesuburan tanah dan masukan sumberdaya secara minimal (Komatsuzaki, 2011).



Gambar 34. Hubungan Kualitas Tanah, Produktivitas dan Kualitas Lingkungan.

Sumber: Wihardjaka dan Harsanti, 2021

9.2. Pendekatan agro-ekologi

Pengelolaan lingkungan pertanian diarahkan pada pengelolaan pertanian dengan memperhatikan pendekatan agro-ekologi yang berkelanjutan. Lingkungan pertanian, dikenal pula dengan istilah agro-ekologi yang merupakan suatu pendekatan yang secara simultan menerapkan konsep ekologi dan sosial untuk merancang dan mengelola sistem pangan dan pertanian secara berkelanjutan (Lescourret et al., 2015), dengan

mengoptimalkan interaksi berkelanjutan antara tanaman, hewan, manusia dan lingkungannya (Komatsuzaki, 2011). Menurut FAO (2018) dan Oberc dan Schnell (2020), pendekatan agro-ekologi sebagai pedoman dalam mencapai sistem pertanian dan pangan berkelanjutan yang meliputi 10 anasir, yaitu diversitas, sinergitas, pendauran, efisiensi, kelenturan/ketahanan, kreasi dan berbagi pengetahuan, nilai kemanusiaan dan sosial, budaya dan tradisi pangan, pemerintahan yang bertanggung jawab, dan ekonomi sirkular dan solidaritas, yang interaksinya terlihat pada Gambar 2.

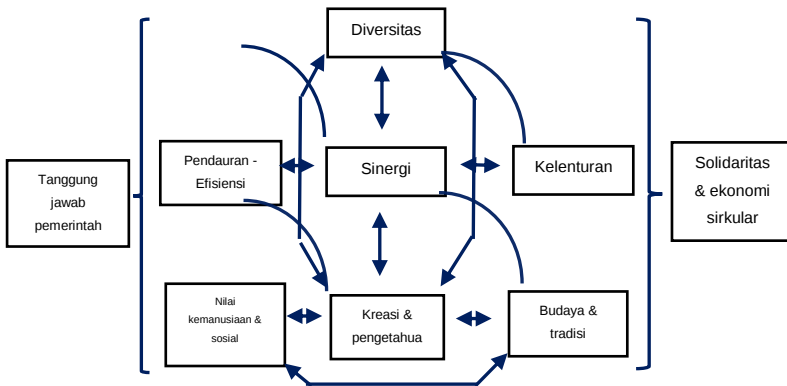
Sistem agro-ekologi sangat beragam yang berkontribusi terhadap produksi, sosial-ekonomi, nutrisi dan manfaat lingkungan. Agro-ekologi bergantung pada alih pengetahuan dimana kreasi dan pengetahuan berperan penting dalam proses pengembangan dan implementasi inovasi agro-ekologi dalam menghadapi berbagai tantangan termasuk perubahan iklim dan degradasi sumberdaya lahan pertanian.

Membangun sinergitas memberi manfaat ganda dalam meningkatkan fungsi ekologi, efisiensi dan kelenturan pemanfaatan sumberdaya. Agro-ekologi memperbaiki penggunaan sumberdaya alam seperti sinar matahari, kelimpahan kandungan C dan N di atmosfer, dan sumberdaya lokal. Pendauran dalam agro-ekologi berarti capaian produksi pertanian menggunakan biaya ekonomi dan lingkungan rendah, misal sistem integrasi tanaman-ternak yang mengenalkan pendauran bahan organik dari kotoran ternak untuk pengomposan atau digunakan secara langsung sebagai ameliorasi tanah, dan sisa tanaman dan produk samping SITT sebagai pakan ternak. Sistem agro-ekologi lebih lentur dalam mempertahankan keseimbangan fungsi dimana sistem tersebut relatif lebih tahan terhadap serangan organisme pengganggu tanaman (OPT). Memperbaiki perikehidupan dan sosial adalah esensial bagi sistem pertanian berkelanjutan, yang menjadi salah satu tujuan dari *sustainable development goals* (SDG).

Agro-ekologi berkontribusi terhadap ketahanan pangan dan nutrisi selain mempertahankan kesehatan ekosistem. Keberlanjutan sistem pertanian dan pangan perlu didukung secara efektif oleh pemerintahan yang bertanggung jawab baik melalui program-program dan regulasi, sehingga terwujud efisiensi usahatani/ekonomi sirkular (FAO, 2018). Perwujudan

ekonomi sirkular akan membantu berbagai upaya dalam melestarikan lingkungan, meningkatkan kualitas sumberdaya lahan pertanian dan mitigasi perubahan iklim.

Menurut Lagiman (2020), agro-ekologi juga bertumpu pada tiga pilar yaitu sosial, ekonomi, ekologi yang saling berinteraksi satu sama lain. Pilar ekonomi (*profit*) mengedepankan efisiensi, daya saing, nilai tambah dan laba, pertumbuhan, dan stabilitas; pilar sosial (*people*) memperhatikan kemiskinan, pemerataan, partisipasi, stabilitas sosial, preservasi budaya; sedang pilar ekologi (*planet*) memperhatikan keragaman hayati, daya luntur ekosistem, konservasi alam, dan kesehatan lingkungan. Kriteria dalam mengelola sistem pertanian menjadisistem berkelanjutan yaitu (1) kelayakan ekonomi (*economic viability*), (2) bernuansa dan bersahabat dengan ekologi (*ecologically sound and friendly*), (3) diterima secara sosial (*socially just*), (4) kepuasan secara budaya (*culturally appropriate*), dan (5) pendekatan sistem dan holistik (*systems and holistic approach*) (Lagiman, 2020).



Gambar 35. Komponen pendekatan agro-ekologi mendukung sistem pertanian berkelanjutan

Sumber: FAO, 2018

10.3. Strategi pengelolaan pertanian ramah lingkungan

Strategi pengelolaan pertanian ramah lingkungan diperlukan untuk mewujudkan produksi pertanian yang mantap dan berkelanjutan dengan kualitas lingkungan yang lestari. Strategi diarahkan pada berbagai aspek, antara lain: (i) Penguatan inovasi teknologi dan informasi lingkungan pertanian yang

berorientasi ke depan, yang dihasilkan dalam waktu yang relatif singkat, cepat, efisien dan berdampak luas; (ii) Peningkatan jejaring kerjasama antar lembaga internasional/nasional dalam rangka memacu peningkatan produktivitas produk pertanian dan stabilitas kualitas lingkungan dalam memenuhi peningkatan kebutuhan pengguna dan pasar; (iii) Optimalisasi sumberdaya lingkungan pertanian untuk memacu peningkatan produktivitas pertanian dan kualitas lingkungan; (iv) Peningkatan produksi dan produktivitas pertanian ramah lingkungan yang keberlanjutan dalam waktu singkat, efisien dan berdampak luas; dan (v) Peningkatan efektivitas rekomendasi kebijakan antisipatif dan responsif pengelolaan lingkungan pertanian ramah lingkungan dalam mendukung pembangunan pertanian berkelanjutan, (vi) Pengelolaan sumberdaya alam secara berkelanjutan dalam sistem pertanian ramah lingkungan diarahkan pada efisiensi usahatani/ekonomi sirkular, (vii) Penguatan kegiatan penelitian dan pengembangan komponen budidaya pertanian ramah lingkungan pada berbagai komoditas lintas agroekosistem, (viii) Peningkatan edukasi dan pendampingan kepada stakeholder khususnya petani dan penyuluh dalam menghirilkan hasil penelitian, pengkajian, dan pengembangan sistem pertanian ramah lingkungan, (ix) Penerapan pertanian terpadu, dan (x) Perintisan penerapan sistem sertifikasi perlu dilakukan untuk proses produksi komoditas pertanian, misal *Good Agriculture Practices (GAP)* dan *GreenAgriculture* untuk keberlanjutan produksi baik kualitas maupun kuantitas dan keuntungan ekonomi.

Sistem pertanian terpadu yang ramah lingkungan dan berkelanjutan sebenarnya telah banyak diterapkan oleh masyarakat tani, antara lain pertanian konservasi dengan tanpa olah atau olah tanah minimum, pengelolaan tanaman terpadu, penerapan jajar legowo super, pengelolaan organisme pengganggu tanaman secara terpadu, sistem integrasi tanaman-ternak bebas limbah, pertanian ramah iklim, sistem padi intensifikasi, dan pertanian organik (Wihardjaka, 2018). Penerapan pertanian ramah lingkungan diharapkan dapat diadopsi pengguna/*stakeholder*, yang telah terbukti memberikan produksi dan produktivitas tinggi, layak secara ekonomi meningkatkan kesejahteraan dan pendapatan masyarakat, sesuai

kebutuhan pengguna, dan menjaga kelestarian lingkungan dan sumberdaya.

Pengelolaan tanaman terpadu (PTT) merupakan salah satu model pertanian ramah lingkungan yang mengintegrasikan berbagai komponen teknologi untuk meningkatkan produktivitas tanaman tanpa merusak lingkungan (Wihardjaka, 2018). Penerapan PTT berprinsipkan pada (i) pendekatan pengelolaan sumberdaya tanaman, lahan, dan air; (ii) Pemanfaatan teknologi pertanian yang telah berkembang dan diterapkan dengan memperhatikan sinergi antarteknologi; (iii) kesesuaian teknologi dengan lingkungan fisik, social ekonomi petani; dan (iv) partisipasi yang melibatkan peran aktif petani dalam memilih teknologi spesifik lokasi (Wihardjaka, 2018).

Jajar legowo super merupakan sistem pertanian ramah lingkungan yang menerapkan teknologi budidaya tanaman pangan terutama padi secara terpadu berbasis jarak tanam jajar legowo (Wihardjaka, 2018). Dalam implementasinya, komponen teknologi jarwo super terdiri atas : (i) benih bermutu varietas unggul baru adaptif (VUB) dengan potensi hasil tinggi; (ii) biodekomposer pada saat pengolahan tanah; (iii) pupuk hayati sebagai *seed treatment* dan pemupukan berimbang; (iv) teknik pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) secara terpadu yang menggunakan pestisida nabati atau agensi hayati atau pestisida anorganik berdasarkan ambang kendali; dan (v) alat mesin pertanian terutama untuk tanam dan panen (Wihardjaka, 2018)

Pemanfaatan sumberdaya lokal dengan mengoptimalkan peran organisme dekomposer dalam pengolahan limbah organik misal *maggot* atau larva dari lalat laskar hitam (*black soldier fly/BSF*). BSF dengan cepat mengurai limbah organik hingga habis selama 18-21 hari dan hanya menyisakan kompos yang kaya akan hara dimana proses ini tidak membutuhkan energi dan tidak mengeluarkan jejak karbon. BSF bermanfaat meningkatkan populasi bakteri dan fungi penyubur tanah, menurunkan kemasaman tanah, dan meningkatkan unsur hara makro 2-4 kali lipat, menghilangkan bau limbah karena BSF mampu merombak senyawa organik sebelum terjadi pembusukan, pupuk hayati BSF menghasilkan senyawa anti mikroba sehingga aman dari bakteri *Salmonella* dan *E. coli*, BSF tidak berperan sebagai vektor

penyakit, limbah organik terurai larva BSFsampai habis (Brodjonegoro, 2021). Aplikasi pupuk hayati BSF 6 liter menghemat kebutuhan pupuk anorganik separonya (Brodjonegoro, 2021).



Gambar 36. Maggot aktif merombak kotoran unggas itik
Sumber: Koleksi Foto Poniman, 2021

Pendekatan pengendalian OPT terpadudiarahkan sebagai upaya pengendalianyang ramah lingkungan. Konsep HPT awal adalah pengendalian hama yang memadukan pengendalian hayati dengan pengendalian kimiawi untuk membatasi penggunaan pestisida (Untung, 2000). Pendekatan PHT menekankan pada pemilihan, perpaduan, dan penerapan pengendalian hama yang didasarkan pada perhitungan dan penaksiran konsekuensi ekonomi, ekologi, dan sosiologi (Untung, 2000)

Penerapan sistem integrasi tanaman-ternak merupakan sistem pertanian ramah iklim sebagai antisipasi dampak perubahan iklim yang mensinergiskan teknologi adaptasidan teknologi mitigasi emisi gas rumah kaca. Komponen utama dalam sistem ini adalah budidaya tanaman pangan ramah lingkungan, pengelolaan ternak, perbaikan kualitas tanahdan lingkungan (Wihardjaka, 2018). Penerapan SITT bebas limbah dapat dijadikan model untuk pertanian berkelanjutan, berbasis sumberdaya lokal, ramah lingkungan dan rendah emisi GRK. SITT

bebas limbah diharapkan mampu meningkatkan pendapatan dan kesejahteraan petani, menyediakan energi terbarukan skala rumah tangga, mengurangi dampak perubahan iklim, dan berperan dalam membentuk kemandirian pangan. SITT selain meningkatkan produksi tanaman dan ternak, juga memperbaiki penyediaan jasa ekosistem misal konservasi tanah dan air, pasokan karbon dan nitrogen dalam tanah, dan penurunan kontaminan atau bahan pencemar dalam tanah (Lescourret *et al.*, 2015).

Pertanian ramah iklim / *climate smart agriculture* adalah sistem pertanian yang dapat mengurangi pengaruh dan dampak perubahan iklim dan meningkatkan produktivitas tanaman melalui upaya adaptasi dan mitigasi dengan dukungan inovasi teknologi pertanian. Penerapan pertanian ramah iklim bertujuan (1) meningkatkan produktivitas pertanian berkelanjutan, untuk mendukung peningkatan pemerataan pendapatan pertanian dan ketahanan pangan, (2) meningkatkan peran adaptasi dan membangun sistem ketahanan dan keamanan pangan dari dampak perubahan iklim, (3) mengurangi emisi gas rumah kaca di sektor pertanian, dan (4) meningkatkan pencapaian pangan nasional dan keamanan pangan (Setyanto *et al.*, 2018).

Sistem produksi pertanian rentan dan terdampak perubahan iklim yang dapat menurunkan produktivitas tanaman. Strategi adaptasi dan mitigasi diupayakan sebagai solusiantisipasi dampak perubahan iklim. Mendukung *nationally determined contribution* (NDC), Kesepakatan Paris, Peraturan Presiden No. 61 tahun 2011 tentang penurunan emisi gas rumah kaca nasional dan Peraturan Presiden No. 71 tahun 2011 tentang inventarisasi GRK, strategi mitigasi emisi gas rumah kaca dapat merupakan bagian dari sistem pertanian terpadu pada agroekosistem tertentu. Strategi penurunan emisi gas rumah kaca nasional diupayakan melalui beberapa program, yaitu (1) pembukaan lahan tanpa bakar dan optimalisasi pemanfaatan lahan, (2) Penerapan teknologi budidaya tanaman, (3) Pemanfaatan pupuk organik dan biopestisida, (4) pengembangan areal perkebunan di lahan tidak berhutan, terlantar, dan terdegradasi atau areal penggunaan lain, (5) Pemanfaatan kotoran/urine ternak/limbah pertanian untuk bio-energi dan pupuk organik, (6) Penelitian dan pengembangan

teknologi rendah emisi dan metodologi MRV sektor pertanian baik pada tanah mineral maupun tanah gambut, (7) Pengelolaan lahan gambut melalui pertanian berkelanjutan, (8) Rehabilitasi, reklamasi, dan revitalisasi lahan gambut terlantar/terdegradasi pada areal pertanian (Balitbangtan, 2011).

Pertanian konservasi yang dikenal sebagai sistem pertanian tanpa olah tanah adalah solusi efektif untuk menghentikan laju degradasi sumberdaya, upaya rehabilitasi, dan intensifikasi produksi tanaman berkelanjutan (Kassam dan Friedrich, 2012). Pertanian konservasi memadukan tiga prinsip, yaitu (i) minimalisasi gangguan mekanis tanah dimana benih/bibit ditanam secara langsung pada tanah yang tidak terusik untuk memelihara atau memperbaiki kandungan bahan organik tanah, struktur tanah, dan kesehatan tanah secara keseluruhan; (ii) Penggunaan penutup permukaan tanah dengan mulsa organik baik yang berupa tanaman, tanaman penutup, dan sisa/limbah tanaman. Mulsa organik bertujuan untuk melindungi permukaan tanah, mempertahankan kelengasan tanah, mengawetkan kandungan hara, menggiatkan aktivitas biologis tanah, dan berkontribusi pada pengendalian gulma dan hama terpadu; (iii) Diversifikasi spesies – baik tanaman semusim maupun tanaman keras yang berkontribusi untuk meningkatkan nutrisi tanaman dan ternak serta meningkatkan ketahanan/kelenturan sistem (Friedrich et al., 2009).

Pertanian organik adalah sistem produksi yang menopang kesehatan tanah, ekosistem dan manusia. Ini bergantung pada proses ekologi, keanekaragaman hayati, dan siklus yang disesuaikan dengan kondisi lokal daripada penggunaan input dengan dampak merugikan. Pertanian organik menggabungkan tradisi, inovasi dan ilmu pengetahuan yang bermanfaat bagi lingkungan dan memperbaiki kualitas hidup bagi yang terlibat (Oberc dan Schnell, 2020). Pertanian organik merupakan metode pertanian yang bertujuan untuk menghasilkan bahan pangan dengan menggunakan bahan alami dan proses ramah lingkungan. Prinsip dari pertanian organik adalah penggunaan energi dan sumberdaya alam secara bertanggung jawab, pemeliharaan keanekaragaman hayati, pelestarian keseimbangan ekologi, peningkatan kesuburan tanah, dan pemeliharaan kualitas air (Oberc dan Schnell, 2020). Teknologi yang diterapkan dalam

pertanian organik bersifat berkelanjutan yang menekankan pada pelestarian dan konservasi sumberdaya alam untuk menciptakan keseimbangan ekosistem dan memberikan kontribusi bagi peningkatan produktivitas pertanian dalam jangka panjang (Lagiman, 2020).

10.4. Tantangan pengembangan sistem pertanian ramah lingkungan

Di Indonesia, pengembangan sistem pertanian berkelanjutan tidak mudah dilakukan. Banyak faktor yang menjadi tantangan dalam mengembangkan sistem pertanian berkelanjutan yang diimplementasikan dengan menerapkan pertanian ramah lingkungan antara lain (Rachmawatie et al., 2020 dalam Lagiman, 2020):

- Kendala sumberdaya manusia. Petani memiliki tingkat pendidikan yang relatif rendah dengan berbagai permasalahan kondisi kesehatan yang kurang, produktivitas kerja masih rendah, dan kurang memiliki motivasi untuk maju.
- Kendala sumberdaya alam. Sumberdaya alam menjadi salah satu faktor yang sangat menentukan usaha tani. Ketersediaan volume air yang tidak menentu, kualitas air yang makin menurun, kesuburan tanah yang makin menurun dan kondisi agroklimat yang berubah-ubah menjadi kendala dalam usaha tani.
- Kendala aplikasi teknologi. Pengadaan sarana dan prasarana pertanian mulai dari kegiatan produksi sampai pascapanen masih menjadi kendala.
- Ketersediaan biomassa. Petani mengalami kendala memenuhi kebutuhan biomassa untuk praktik pertanian berkelanjutan terbatas karena pemilikan lahan, ternak, dan tenaga kerja.
- Akses informasi. Kesadaran petani masih kurang mengenai pentingnya usaha tani yang berdampak positif untuk kesehatan dan kualitas lingkungan karena informasi pertanian berkelanjutan yang masih terbatas.

- Kendala kelembagaan. Peran kelembagaan (penyuluh) masih kurang, sehingga adopsi dari praktik pertanian berkelanjutan masih kurang.
- Kendala politik. Dukungan pengambil kebijakan yang menentukan arah pembangunan pertanian sangat dibutuhkan untuk meningkatkan praktik pertanian berkelanjutan.

Pengelolaan pertanian ramah lingkungan sebagai sistem berkelanjutan harus memperhatikan (i) aspek keberlanjutan sosial yang mencakup komponen sisi manusia sebagai individu dan mahluk sosial yang bertumpu pada modal manusia dan modal sosial, (ii) aspek keberlanjutan ekonomi mencakup sisi ekonomi mikro dan makro yang bertumpu pada modal kreativitas manusia, dan (iii) aspek keberlanjutan lingkungan mencakup sisi sumberdaya alam dan ekosistem yang bertumpu pada modal alam (Sugandhy, 2009). Sebagai sistem pertanian berkelanjutan, aspek ekonomi meliputi memastikan pendapatan yang adil bagi petani, meningkatkan daya saing, menyeimbangkan kekuatan dalam rantai makanan; aspek lingkungan meliputi aksi perubahan iklim, kepedulian lingkungan, melestarikan bentang lahan dan keanekaragaman hayati; dan aspek sosial meliputi dukungan terhadap pembaruan generasi, daerah pedesaan yang dinamis, melindungi makanan dan kualitas kesehatan masyarakat (Oberc dan Schnell, 2020).

Pengelolaan sistem pertanian yang bijaksana dan ramah lingkungan bermuara sebagai jaminan pemenuhan kebutuhan manusia baik kuantitas maupun kualitas, jaminan pemantapan ketahanan pangan, dan kelestarian lingkungan terjaga. Marilah kita jaga bumi titipan generasi mendatang secara baik dan bijaksana, agar interaksi manusia dan lingkungan tetap dalam keseimbangan alam yang selaras, serasi, dan lestari.

DAFTAR PUSTAKA

- [Balitbangtan] Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pertanian. 2011. Pedoman Umum Adaptasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian. Jakarta: Badan Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pertanian. ISBN 978-602-9462-04-3.
- [Balitbangtan] Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pertanian. 2011. Pedomanan Umum Mitigasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- [Balingtang] Balai Penelitian Lingkungan Pertanian. 2013. Penelitian Delineasi Sebaran Residu Senyawa POPs dan Logam Berat di Lahan Sawah DAS Brantas. Laporan Akhir Tahun 2013.
- [Balingtang] Balai Penelitian Lingkungan Pertanian. 2014. Penelitian Delineasi Sebaran Residu Senyawa POPs dan Logam Berat di Lahan Pertanian DAS Brantas Jawa Timur. Laporan Akhir Tahun 2014.
- [Balingtang] Balai Penelitian Lingkungan Pertanian. 2015^a. Penelitian Delineasi Sebaran Residu Senyawa POPs dan Logam Berat di Lahan Pertanian di DAS Serayu, Jawa Tengah. Laporan Akhir Tahun 2015.
- [Balingtang] Balai Penelitian Lingkungan Pertanian. 2015^b. Identifikasi Status Pencemaran Residu Pestisida pada Lahan Pertanian di Indonesia. Laporan Akhir Tahun 2015.
- [Balingtang] Balai Penelitian Lingkungan Pertanian. 2018. Delineasi Pencemaran Residu Bahan Agrokimia Pada Lahan Sawah Dan Hortikultura di Das Citarum. Laporan Akhir Tahun 2018.
- [Balingtang] Balai Penelitian Lingkungan Pertanian. 2021. Perhitungan Inventarisasi Gas Rumah Kaca. (Unpublished).

- [Bappenas] Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. 2014. Perkembangan Penanganan Perubahan Iklim di Indonesia 2010 – 2014. Jakarta: Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. hal 9-11.
- [BB Padi] Balai Besar Penelitian Padi. 2016. Varietas Padi Toleran Perubahan Iklim. <https://bbpadi.litbang.pertanian.go.id/-index.php/info-berita/info-teknologi/varietas-padi-toleran-perubahan-iklim> (Diakses Tanggal 26 Oktober 2021).
- [BPOM] Peraturan Badan Pengawas Obat Dan Makanan. 2018. Batas Maksimum Cemaran Kimia dalam Pangan Olahan. Nomor 8 Tahun 2018.
- [Ditjen SDA] Direktorat Jenderal Pengelolaan Lahan dan Air. 2010. Upaya Departemen Pertanian dalam Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim di Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil. Departemen Pertanian RI. Jakarta. 15 hal
- [Ditjen SDA] Direktorat Jenderal Pengelolaan Lahan dan Air. 2020. Laporan kinerja Direktorat Jenderal Sumbe Daya Air. Direktorat Jenderal Sumberdaya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
- [Ditjen PSP] Direktorat Jendral Prasarana dan Sarana Pertanian, 2021. Sistem Informasi Pestisida, Direktorat Pupuk dan Pestisida. Kementerian Pertanian. http://pestisida.id/simpes_app/index.php.
- [EPA] Environment Protection Authority. 2005. Guidelines for Responsible Pesticide Use. ISBN 1 921125 05 5 December 2005 Updated April 2017.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2011. "Proven technologies for smallholders." Retrieved January 2011, from <http://www.fao.org/teca/>.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2012. Climate change adaptation and mitigation. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i2855e/i2855e.pdf>
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2017. The Future of Food and Agriculture - Trends and Challenges Rome
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2020. The State of Agricultural Commodity Markets 2020, The State of Agricultural Commodity Markets 2020. FAO, Rome, Italy <https://doi.org/10.4060/cb0665en>

- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2021. Crop Prospects and Food Situation No.1, 03 Rome, Italy.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2018. The 10 elements of agroecology: Guiding the transition to sustainable food and agricultural systems. Food and Agriculture, Organization of the United Nations.
- [IFAD] International Fund for Agricultural Development. 2011. Rural poverty report. New realities, new challenges: new opportunities for tomorrow's generation. Rome.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use, Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds). IGES, Hayama, Japan.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouses Gases Inventories: Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use, Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds). IGES, Hayama, Japan.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom.

- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [Internet] Amongguru. com. 21 Agustus 2018. Efek Rumah Kaca : Pengertian, Contoh, dan Dampaknya Terhadap Bumi, diakses pada 10 November 2021, <https://www.amongguru.com/efek-rumah-kaca-pengertian-contoh-dan-dampaknya-terhadap-bumi>
- [Internet] Iberdrola.com. Climate negotiations: 25 years of searching for consensus on the fight against climate change., diakses pada 10 November 2021. <https://www.iberdrola.com/sustainability/international-agreements-on-climate-change>
- [Kementan] Kementerian Pertanian. 2021. Mitigasi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian Tahun 2020. Biro Perencanaan Kementerian Pertanian. Jakarta.
- [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. 2017. Third National Communication Indonesia.
- [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan

- Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV) Tahun 2019. Direktorat Inventarisasi GRK dan MPV. Direktorat jenderal Pengendalian Perubahan Iklim.
- [Permentan] Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia. 2019. Pendaftaran Pestisida. Nomor 43 Tahun 2019.
- [Permentan] Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia. 2011. Peraturan Menteri Pertanian Nomor 70/Permentan/SR.140/10/2011 Tentang Pupuk Organik, Pupuk Hayati Dan Pembenah Tanah. Jakarta
- [PermenLH] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup. 2006. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2006 Tentang Tata Cara Pengukuran Kriteria Baku Kerusakan Tanah Untuk Produksi Biomassa. Jakarta
- [Perpres] Peraturan Presiden Republik Indonesia. 2001. Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Jakarta.
- [Perpres] Peraturan Presiden Republik Indonesia. 2001. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 150 Tahun 2000 tentang pengendalian Kerusakan Tanah Untuk Produksi Biomassa. Jakarta.
- [Perpres] Peraturan Presiden Republik Indonesia. 2001. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2001 Tentang Pupuk Budidaya Tanaman. Jakarta.
- [UU] Undang-Undang Nomor.32 tahun 2009 Tentang Pengelolaan dan Perlindungan Lingkungan Hidup.
- [UNPFA] United Nations Population Fund. 2011. State of the world population 2011.
- [WHO] World Health Organization. 2014. The International Code of Conduct on Pesticide Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations 2014. ISBN 978-92-5-108548-6 (print). E-ISBN 978-92-5-108549-3 (PDF).
- Aamer, M., Hassan, M. U., Shaaban, M., Rasul, F., Haiying, T., Ma Qiaoying, Batool, M., Rasheed, A., Chuan, Z., SuQitao, dan Guoqin, H. 2021. Rice straw biochar mitigates N2O emissions under alternate wetting and drying conditions in paddy soil. Journal of Saudi Chemical Society. 25. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.11.005>

- Abrol, D.B. 2013. Integrated Pest Management: Current Concepts and Ecological Process. Academic Press.
- Adharini, R. I., Suharno, S., dan Hartiko, H. Pengaruh Kontaminasi Insektisida Profenofos Terhadap Fisiologis Ikan Nila Merah (*Oreochromis SP.*) (Contamination Effect of Profenofos Insecticide on Physiology of Red Nila (*Oreochromis SP.*)). *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 23(3), 365-373.
- Aghamolki, M.T.K., Yusop, M.K., Oad, F.C., Zakikhani, H., Jaafar, H.Z., Kharidah, S., Musa, M.H. 2014. Heat stress effects on yield parameters of selected rice cultivars at reproductive growth stages. *J. Food Agric. Environ.* **12**: 741 - 746.
- Agung, D.K. dan Gunawan, G., 2020. KEMRUNGSUNG: Intensifikasi Pertanian oleh Petani di Desa Kenalan Kecamatan Pakis Kabupaten Magelang. *Solidarity: Journal of Education, Society and Culture*, 9(2), pp.1042-1052.
- Agus, F (Ed.). 2019. Metode Penilaian Adaptasi dan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta. 154 hal.
- Agus, F. dan Subiksa, I.G.M. 2008. Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan. Balai Penelitian Tanah. World Agroforestry Centre. Bogor.
- Agus, C.D.K. 2014. Agribisnis berbasis pertanian terpadu. Dalam: Sunarminto, B.H. (Ed.). *Pertanian Terpadu untuk Mendukung Kedaulatan Pangan Nasional*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta. pp. 83-98.
- Agus, F (Ed.). 2019. Metode Penilaian Adaptasi dan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta.
- Agustina, Y., Amin, B., dan Thamria. 2012. Analisis beban dan indeks pencemaran parameter logam berat di Sungai Siak Kota Pekanbaru. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 6(2), 162-172.
- Ahmad, F. 2012. Kandungan Senyawa Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (PAH) di Teluk Jakarta. *Ilmu Kelautan*, 17(4), 199-208.
- Aisyahlika, S.Z., Firdaus, M.L., dan Elvia, R. 2018. Kapasitas adsorpsi arang aktif cangkang bintaro (*Cerbera odollam*) terhadap zat warna sintesis reactive red-120 dan reactive blue 198, *Alotrop* 2(2):148-155.

- Aktar, W., Sengupta, D., dan Chowdhury, A. 2009. Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2 (1), 1–12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- Alberta, E dan Parks, A.E.P. 2019. Alberta Tier 1 Soil and Groundwater Remediation Guidelines. Land Policy Branch, Policy and Planning Division. 198 pp.
- Alen, Y., Zulhidayati, Z., dan Suharti, N. 2015. Pemeriksaan Residu Pestisida Profenofos pada Selada (*Lactuca sativa* L.) dengan Metode Kromatografi Gas. *Jurnal Sains Farmasi & Klinis*, 1(2), 140. <https://doi.org/10.29208/jsfk.2015.1.2.30>
- Alexander, M. 1977. Introduction to soil microbiology. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York. 467p. DOI: 10.1177/003072707901000208
- Alloway, B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. Chapman & Hall, London
- Ardiwinata, A. N., Sulaeman, E., Priyatna, N., Harsanti, E.S., dan Wahyuni, S. 2015b. Urea Berlapis Arang Aktif. Uraian Paten. Nomor Paten IDP000038786
- Ardiwinata, A. N., Sulaeman, E., Priyatna, N., Harsanti, E.S., Wahyuni, S. 2015a. Alat Filter Residu Pestisida pada Petakan Sawah dengan Media Filter yang Dapat Diisi Ulang. Uraian Paten. Nomor Paten IDS000001383
- Ardiwinata, A. N., Sulaeman, E., Marany, J. 2016a. Urea Berlapis Arang Aktif dan Zeolit. Uraian Paten. Nomor Paten IDP000042952
- Ardiwinata, A. N., dan Nursyamsi, D. 2012. Residu pestisida di sentra produksi padi di Jawa Tengah. *Pangan*, 21(1), 39–58.
- Ardiwinata, A.N., 2005. Pengaruh Penambahan Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Sekam Padi di Tanah Terhadap Residu Karbofuran (2,3-dihidro-dimetil-7-benzofuranil-N-metil karbamat) di Dalam Tanah, Air, dan Tanaman Padi. Disertasi Doktor Universitas Indonesia. Jakarta.
- Ardiwinata, A.N. 2020. Pemanfaatan Arang AKtif dalam Pengendalian Residu Pestisida di Tanah: Prospek dan Masalahnya. *Jurnal Sumberdaya Lahan* 14(1): 49-62.
- Ardiwinata, A.N., Harsanti, E.S., Wahyuni, S., Sulaeman, E, Tohir, A., Priyatna, N., dan Cahyadi. 2016b. Arang Katif yang berasal

dari Limbah Pertanian yang Mampu Mengendalikan Residu Pestisida di Lahan Pertanian. Uraian Paten. Nomor IDS000001436

- Ariani, M., Pramono, A., Purnariyanto, F., dan Haryono, E. 2019. Soil chemical properties affecting GHG emission from paddy rice field due to water regime and organic matter amendment. The 4th International Conference on Climate Change 2019 (The 4th ICCC 2019) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 423 (2020) 012066 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/423/1/012066
- Arif, A. 2017. Pengaruh bahan kimia terhadap penggunaan pestisida lingkungan. JF FIK UINAM. 3 (4):134-143.
- Athennia, A., dan Suparman, R. 2019. Cemaran Bakteri Dan Residu Pestisida Pada Buah Anggur. *Jurnal Ilmiah Kesehatan*, 11 (2), 147–152. <https://doi.org/10.37012/jik.v11i2.91> .
- Atmojo, S. W. 2008. Peran agroforestri dalamantisipasi dampak pemanasan global di DAS. *Bunga Rampai INAFE 08*, 122–141.
- Aulakh, M.S., Wassmann, R., Bueno, C., Kreuzwieser, J., dan Rennenberg, H. 2001. Characterization of root exudates at different growth stages of ten rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Plant Biol.*3:139–148. doi:10.1055/s-2001-12905
- Aulakh, M.S., Wassmann, R., dan Rennenberg, H., 2002. Methane transport capacity of twenty-two rice cultivars from five major Asian rice-growing countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 91, 59–71
- Bagheri, A., Emami, N. dan Damalas, C.A., 2021. Farmers' behavior towards safe pesticide handling: An analysis with the theory of planned behavior. *Science of the Total Environment*, 751, p.141709.
- Barber, S.A. 1984. Liming Materials and Practise. *Soil Acidity and Liming* 12(4): 171-209.
- Barbusiński, K. 2009. Fenton reaction-controversy concerning the chemistry. *Ecol Chem Eng S* 16:347–358
- Bhattacharya, T., Banerjee, D.K., dan Gopal, B. 2006. Heavy metal uptake by *Scirpus littoralis* Schrad. from fly ash dosed and metal spiked soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 121 (1-3): pp. 363–380.

- Bhattacharyya, P., Roy, K.S., Das, M., Ray, S., Balachandar, D., Karthikeyan, S., Nayak, A. K., dan Mohapatra, T. 2016. Elucidation of rice rhizosphere metagenome in relation to methane and nitrogen metabolism under elevated carbon dioxide and temperature using whole genome metagenomic approach. *Sci. Total Environ.* **542**: 886-898.
- Biala, J. 2011. Short report: The benefits of using compost for mitigating climate change. Department of Environment, Climate Change and Water NSW. ISBN 978 1 742232 964 2.
- Boyer, J. S. 1985. Water transport. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 36:473-516.
- Brodjonegoro, B. P. S. 2021. Ekonomi sirkular dan subsidi pupuk. Kompas edisi Rabu, 6 Oktober 2021. Hal.7.
- Chandradewi, N. A. 2014. Pengaruh Iradiasi dan Suhu Terhadap Perubahan Kesegaran Cabai Merah (*Capsicum Annum L.*) Selama Penyimpanan. Skripsi Fakultas Pertanian Institute Pertanian Bogor.
- Charlena. 2004. Pencemaran Logam Berat Timbal (Pb) dan Cadmium (Cd) pada Sayur-sayuran. *Falsafah Sains*. Program Pascasarjana S3 IPB. Posted tgl 30 Desember 2004. <http://www.google.co.id>. Diakses tanggal 13 Juni 2006.
- Chen, Y., Li, S., Zhang, Y., Li, T., Ge, H., Xia, S., Gu, J., Zhang, H., Lü, B., Wu, X., Wang, Z., Yang, J., Zhang J., dan Liu, L. 2019. Rice root morphological and physiological traits interaction with rhizosphere soil and its effect on methane emissions in paddy fields. *Soil Biology and Biochemistry*. 129:191-200. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.015>
- Chen, Y., Zhang, Y., Li, S., Liu, K., Li, G., Zhang, D., Lv, Z., Gu, J., Zhang, H., Yang, J., Liu, L. 2021. OsRGA1 optimizes photosynthate allocation for roots to reduce methane emissions and improve yield in paddy ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*. 160. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108344>
- Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Xu, P., Zhang, C., Liu, Y. 2016. Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review. *Chem Eng J* 284:582-598.

- Chiu, C. C., Cheng, C. J., Lin, T. H., Juang, K. W., dan Lee, D.Y. 2009. The effectiveness of four organic matter amendments for decreasing resin-extractable Cr (VI) in Cr (VI)-contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 1239-1244.
- Cho-Ruk, K., Kurukote, J., Supprung, P., dan Vetayasuporn, S. 2006. Perennial plants in the phytoremediation of leadcontaminated soils. *Biotechnology*, 5 (1): pp. 1-4.
- Chu, H., Hosen, Y., dan Yagi, K. 2007. NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes in winter barley field of Japanese Andisol as affected by N fertilizer management. *Soil Biology & Biochemistry* 39 : 330-339
- Cobb, A., Warms, M., Maurer, E. P., dan Chiesa, S. 2012. Low-tech coconut shell activated charcoal production. *International Journal for Service Learning in Engineering* 7(1): 93-104.
- Colmer, T.D. 2003. Long-distance transport of gases in plants: A perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant Cell Environ.* 26:17-36.
- Conrad, R. 2007. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Adv. Agron.* 96, 1-63.
- Coscolla, C., Lopez, A., Yahyaoui, A., Colin, P., Robin, C., Poinsignon, Q., Yusa, V. 2017. Human exposure and risk assessment to airborne pesticides in a rural French community. *Sci. Total Environ.* 584: 856-868
- Dahuri, R. 1998. Pembangunan Pertanian Berkelanjutan : Dalam Perspektif Ekonomi, Sosial dan Ekologi. *Agrimedia Volume 4 Nomor 1*; Februari 1998.
- DAI. 2012. Climate change vulnerability assessment and adaptation planning for water supply. *Inception Report*, 4, 1-67.
- Damalas, C. A., dan Eleftherohorinos, I. G. 2011. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International journal of environmental research and public health*, 8(5), 1402-1419.
- Dariah, A., Sutono, S., Nurida, N.L., Hartatik, W., dan Pratiwi, E. 2015. Pembenah Tanah Untuk Meningkatkan Produktivitas Lahan Pertanian. *Jurnal Sumberdaya Lahan* 9 (2), 67-84

- Dayani, C. M., Arthana, L. W. dan Merit, I. N. 2011. Identifikasi sumber pencemar dan tingkat pencemaran air di Danau Batur Kabupaten Bangli.
- Dewi, T. and Purbalisa, W., 2017. Pengaruh Kadar Arsen Tinggi Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Padi Sawah. In Prosiding Seminar Nasional Fakultas Pertanian UNS (Vol. 1, No. 1, pp. 148-152).
- Djaafar, T.F. and Rahayu, S., 2007. Cemarkan mikroba pada produk pertanian, penyakit yang ditimbulkan dan pencegahannya. Jurnal Litbang Pertanian, 26(2), p.2007.
- Doran, J.W., dan T.B. Parkin. 1999. *Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set*. Soil Science Society of America Inc. Winconsin.
- Eck TF, Holben BN, Reid JS, O'Neill NT, Schafer JS, Dubovik O, Smirnov A, Yamasoe MA, Artaxo P. 2003. High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. Geophys. Res. Lett., 30, 2035. <https://doi:10.1029/2003GL017861>
- Eglin, T., P. Ciais., SL. Piao., P. Barre, Bellassen V, Cadule P, Chenu C, Gasser T, Koven C., M. Reichstein and P. Smith. 2010. Historical and future perspectives of global soil carbon response to climate and land-use changes. Tellus-B 62:700–718. doi:10.1111/j.1600-0889.2010. 00499.x
- Ekowati, D.V., 2012. Pertanian Berkelanjutan untuk mengoptimalkan Sumberdaya Pertanian Indonesia.
- Elarabi, N. I., Abdelhadi, A. A., Ahmed, R. H., Saleh, I., Arif, I. A., Osman, G., & Ahmed, D. S. (2020). *Bacillus aryabhatai* FACU: A promising bacterial strain capable of manipulate the glyphosate herbicide residues. Saudi Journal of Biological Sciences, 27(9), 2207-2214.
- Eller, G and Frenzel P. 2001. Changes in activity and community structure of methane-oxidizing bacteria over the growth period of rice. Appl. Environ. Microbiol. 67:2395–2403. doi:10.1128/AEM.67.6.2395-2403.2001
- Erakhrumen, A and Agbontalor, A. 2007. Review phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in

- developing countries. *Educational Research and Review*, 2.(7): pp. 151–156.
- Erdei, L., Mez[^]osi, G., M[^]ecs, I., Vass, I., Foglein, F and Bulik, L. 2005. Phytoremediation as a program for decontamination of heavy-metal polluted environment. *Acta Biologica Szegediensis* 49 (1-2): pp. 75–76.
- Ericksen, P.J., 2008. Conceptualizing food systems for global environmental change research. *Glob. Environ. Chang.* 18, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.09.002>.
- Essono, G., Ayodele, M., Akoa, A., Foko, J., Olembo, S. and Gockowski, J. 2007. Aspergillus Species On Cassava Chips In Storage In Rural Areas Of Southern Cameroon/ :Their Relationship With Storage Duration, Moisture Content And Processing Methods. *Afr.J.Microbiol.Res.* 5:1–8
- Evangelou, M.W.H., Ebel, M., and Schaeffer, A. 2007. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere* 68: pp 989-1003.
- Fang, B. and X. Zhu. 2014. High content of five heavy metals in four fruits: Evidence from a case study of Pujiang County, Zhejiang Province, China. *Food Control.* 39:62–67.
- Faqih, A., & Boer, R. (2013). Fenomena perubahan iklim Indonesia. In *Fenomena Perubahan Iklim Indonesia* (pp. 11–28).
- Fernandez-Baca, Cristina P., Adam R. Rivers, Woojae Kim, Ryo Iwata, Anna M. McClung, Daniel P. Roberts, Vangimalla R. Reddy, and Jinyoung Y. Barnaby. 2021. Soil Biology and Biochemistry. 156. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108233>
- Ferreira L, Rosales E, Danko AS, Sanromán MA, and Pazos MM. 2016. *Bacillus thuringiensis* a promising bacterium for degrading emerging pollutants. *Process Saf Environ* 101:19–26.
- Fitra, S. J., S. Prijono dan Maswar. 2019. Pengaruh Pemupukan Pada Lahan Gambut Terhadap Karakteristik Tanah, Emisi CO₂, Dan Produktivitas Tanaman Karet. *J. Tanah dan Sumberdaya Lahan.* 6 (1).

- Fitriadi, B. R., & Putri, A. C. (2019). Dampak Aplikasi Pestisida Sipermetrin, Deltametrin, Klorpirifos, Dan Sihalotrin Terhadap Kandungan Residu Pestisida Pada Biji Kakao. In *Jurnal Agrosains dan Teknologi* (Vol. 4, Issue 1, pp. 10–19).
- Francis, C.A., and G. Youngberg. 1990. Sustainable Agriculture--an overview. In C. A. Francis, C.B. Flora, and L. D. King (eds.), *Sustainable Agriculture in Temperate Zones*. John Wiley and Sons, New York, pp.1-23.
- Friedrich, T., A. Kassam, and F. Shaxson. 2009. Conservation Agriculture. In: Agriculture for Developing Countries. Science and Technology Options Assessment (STOA) Project. European Parliament. European Technology Assessment Group, Karlsruhe, Germany.
- Fujisaki, K., Perrin, A.S., Desjardins, T., Bernoux, M., Balbino, L.C., Brossard, M., 2015. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Glob. Change Biol.* 21, 2773–2786. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12906>.
- Gao Y, Truong YB, Cacioli P, Butler P, Kyratzis IL. 2014. Bioremediation of pesticide contaminated water using an organophosphate degrading enzyme immobilized on nonwoven polyester textiles. *Enzym Microb Technol* 54:38–44.
- Geng C, Haudin CS, Zhang Y, Lashermes G, Houot S, Garnier P. Modeling the release of organic contaminants during compost decomposition in soil. *Chemosphere*. 2015; 119: 423–431.
- Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. 2013. Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, ISBN 978-92-5-107920-1.
- Ghulam, A., Qin Q, Teyip T and ZL. Li. 2007. Modified perpendicular drought index (MPDA): a real-time drought monitoring method. *J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 62:150-164
- Gliessman, SR. 2007. Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems. CRC Press. 384 p

- Grung, M., Lin, Y., Zhang, H., Steen, A. O., Huang, J., Zhang, G., & Larssen, T. (2015). Pesticide levels and environmental risk in aquatic environments in China - A review. *Environment International*, 81, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.013>
- Guo, X., Wei, Z., Wu, Q., Li, C., Qian, T., Zheng, W., 2016. Effect of soil washing with only chelators or combining with ferric chloride on soil heavy metal removal and phytoavailability: field experiments. *Chemosphere* 147, 412-419.
- Hamim, 2004. Underlying drought stress effects on plant: Inhibition of photosynthesis. *Hayati*. 11:164-169.
- Handayani, T., Basundan, P., Murti, R. H. dan Sofiali, E. 2013. Perubahan morfologi dan Toleransi Tanaman Kentang Terhadap Suhu Tinggi. *J. Hort.* 23:318-328
- Handoko, I., Sugiarto, Y., Syaikat, Y. 2008. Keterkaitan Perubahan Iklim dan Produksi Pangan Strategis. Telaah kebijakan independen bidang perdagangan pembangunan oleh Kemitraan/Partnership Indonesia. SEAMEO BIOTROP. Bogor
- Haque, A.N.A.; Uddin, M.K.; Sulaiman, M.F.; Amin, A.M.; Hossain, M.; Aziz, A.A.; Mosharrof, M. Impact of Organic Amendment with Alternate Wetting and Drying Irrigation on Rice Yield, Water Use Efficiency and Physicochemical Properties of Soil. *Agronomy* 2021, 11, 1529. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081529>
- Hardjasoemantri, K. 2002. *Hukum Tata Lingkungan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Harsanti, E. S., Ardiwinata, A. N., & Wahyuni, S. .2018. Remediation of paddy soil contaminated by endosulfan residues by applying a combination of farmyard manures and corn cob biochar. Proceeding of International Workshop And Seminar "Innovation of environment friendly agricultural technology in supporting sustainable food self-sufficiency: 234-250
- Harsanti, ES., Ardiwinata, AN., Mulyadi, dan Wihardjaka, A. 2013. Peranan Arang Aktif dalam Mitigasi Residu Pestisida pada Tanaman Komoditas Strategis. *Jurnal Sumberdaya Lahan* 7(2): 57-65

- Harsanti, ES., Indratin, Wahyuni, S., Sulaeman, E., dan Ardiwinata, AN. 2012. Efektivitas arang aktif diperkaya mikroba konsorsia terhadap residu insektisida lindan dan aldrin di lahan sayuran
- Harsanti, ES., Kusnoputranto, H., Suparmoko, M., Ardiwinata, AN., and Kurnia, A. 2019. The usage of corn cob to remediate paddy soil contaminated by endosulfan. AIP Conference Preceedings 2120 (1), 04
- Hartini, E., 2011. Kadar plumbum (pb) dalam umbi bawang merah di kecamatan kersana kabupaten brebes. VISIKES: Jurnal Kesehatan Masyarakat, 10(1).
- Haryanto B, Thalib A. 2009. Emisi metana dari fermentasi enterik: kontribusinya secara nasional dan faktor-faktor yang mempengaruhinya pada ternak. Wartazoa 19(4): 157-162.
- Hasyim, A., Setiawati, W., & Lukman, L. (2015). Inovasi teknologi pengendalian OPT ramah lingkungan pada cabai: upaya alternatif menuju ekosistem harmonis. *Pengembangan Inovasi Pertanian*, 8(1), 1-10.
- Hegarty RS. 1999. Mechanism for competitively reducing rumInal methanogenesis. Australian Journal of Agricultural Research 50(8):1299-1306.
- Hendrickson J, Sassenrath GF, Archer D, Hanson J, Halloran J. 2008. Renewable Agric. *Food Syst.* 23:314–324.
- Herlambang, A., 2006. Pencemaran air dan strategi penggulungannya. *Jurnal Air Indonesia*, 2(1).
- Hervani A, Helena Lina Susilawati, Hesti Yulianingrum, Ali Pramono, Mas Teddy Sutriadi. 2019. Emisi CH₄ Dari Lahan Sawah *dalam* Agus F (Ed.). 2019. Metode Penilaian Adaptasi dan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta. 154 hal.
- Hidayat, R.A., J. Iskandar, B. Gunawan, dan R. Partasasmita. 2020. Impact of green revolution on rice cultivation practices and production sistem: A case study in Sindang Hamlet, Rancakalong Village, Sumedang District, West Java, Indonesia *Biodiversitas* 21(3): 1258-1265.
- Hidayati IN, Suryanto. 2015. Pengaruh perubahan iklim terhadap produksi pertanian dan strategi adaptasi pada lahan rawan

kekeringan. *Jurnal Ekonomi & Studi Pembangunan*.<https://doi.org/10.18196/jesp.16.1.1217>.

- Hinchman, R.R., Negri, M.C., and Gatliff, E.G. 1995. Phytoremediation: using green plants to clean up contaminated soil, groundwater, and wastewater. Argonne National Laboratory Hinchman, *Applied Natural Sciences*, Inc.
- Hou Y, Velthof GL, Oenema O. 2015. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from kotoran management chains: A meta-analysis and integrated assessment. *Global Change Biology* 21:1293-1312.
- Hou, Q., Yang, Z., Ji, J., Yu, T., Chen, G., Li, J., Xia, X., Zhang, M., Yuan, X., 2014. Annual Net Input Fluxes of Heavy Metals of The Agroecosystem in The Yangtze River Delta, China. *J. Geochem. Explor.* 139 (1), 68–84.
- Huang Y, Sass RL Fisher JrFM. 1997. Methane emission from Texas rice paddy soil: 1. Quantitative multi-year dependence of CH₄ emission on soil, cultivar and grain yield. *Glob. Change Biol.* 3:479–489. doi:10.1046/j.1365-2486.1997.00083.x
- Huang, J.W., Chen, J., Berti, W.R. and Cunningham, S.D. 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of syntetic chelates in lead phytoextraction. *Environmental Science and Technology* 31 (3): pp 800-805.
- Huang, M., Zhu, Y., Li, Z., Huang, B., Luo, N., Liu, C., dan Zeng, G. 2016. Compost as a soil amendment to remediate heavy metal-contaminated agricultural soil: mechanisms, efficacy, problems, and strategies. *Water Air Soil Pollut* 227: 359. DOI 10.1007/s11270-016-3068-8.
- Huong, P. T., Lee, B. K., Kim, J., Lee, C. H. 2016. Nitrophenols removal from aqueous medium using Fe-nano mesoporous zeolite. *Mater Des* 101:210–217
- Husnain, H., Nursyamsi, D. and Purnomo, J., 2015. Penggunaan Bahan Agrokimia dan Dampaknya terhadap Pertanian Ramah Lingkungan. *Pengelolaan Lahan Pada Berbagai Ekosistem Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan*, Hal, pp.7-46.

- Imam Supardi. 2003. *Lingkungan Hidup dan Kelestariannya*. Bandung: PT. Alumnii.
- Istiantoro, Bambang, A.N., Soeprobowati, T.R. 2013. Tingkat Penerapan Sistem Pertanian Berkelanjutan Pada Budidaya Padi Sawah (Studi Kasus di Kecamatan Ambal Kabupaten Kebumen). Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan 2013. ISBN 978-602-17001-1-2. 19-25p
- Iqbal, J., Hu, Lin, S., Hatano, R., Feng, M., Lu, L., Ahamadou, B., Du, L. 2009. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China. *Agric. Ecosyst. Environ.* **131**: 292-302.
- Jalil, M., Sakdiah, H., Deviana, E., Akbar, I. 2016. Pertumbuhan dan produksi beberapa varietas padi (*Oryza sativa* L) pada berbagai tingkat salinitas. *Jurnal Agrotek Lestari*. 2(2):63-74.
- Jamil, A., Satoto, P., Sasmita, A., Guswara, dan Suharna. 2016. Deskripsi varietas unggul baru padi. Jakarta: Badan Penelitiandan Pengembangan Pertanian. KementerianPertanian. Hal 84.
- Jayaraman, T. 2011. Climate change and agriculture: A review article with special reference to India. *Review of Agrarian Studies*, 1(2), 17–78. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.308563>
- Jiang, Y., Tian, Y. T., Sun, Y. N., Zhang, Y., Hang, X. N., Deng, A. X., Zhang, W. J. 2016. Effect of rice panicle size on paddy field CH₄ emissions. *Biology and Fertility of Soils* 52, 389–399. doi:10.1007/s00374-015-1084-2
- Jiang, R., Gan, T. Y., Xie, J., Wang, N., & Kuo, C. C. (2015). Historical and potential changes of precipitation and temperature of Alberta subjected to climate change impact: 1900–2100. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3–4), 725–739. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1664-y>
- Johnson, K. A., H.H Westberg, J.J Michal, dan M.W. Cossalman, M. 2007. The SF₆ Tracer Technique: Methane Measurement From Ruminants. Measuring Methane Production From Ruminants, 33–67. doi:10.1007/978-1-4020-6133-2_3

- Joko, T., Anggoro, S., Sunoko, H.R. and Rachmawati, S., 2018. Identification of soil properties and organophosphate residues from agricultural land in Wanasari sub-District, Brebes, Indonesia. In E3S Web of Conferences (Vol. 31, p. 06010). EDP Sciences.
- Juroszek P, Tiedemann A von, 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathol* 60: 100-112.
- Karalexi, M. A., Tagkas, C. F., Markozannes, G., Tseretopoulou, X., Hernández, A. F., Schüz, J., Halldorsson, T. I., Psaltopoulou, T., Petridou, E. T., Tzoulaki, I., & Ntzani, E. E. (2021). Exposure to pesticides and childhood leukemia risk: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 285 (May). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117376>.
- Karamina, H., Murti, A.T. and Mudjoko, T., 2018. Analisis kandungan logam berat aluminium (Al), dan timbal (Pb) pada buah jambu biji varietas kristal (*Psidium guajava* L.) dan tanah di desa Bumiaji, kota Batu. *Kultivasi*, 17(3), pp.744-749.
- Kargar, M., Clark, O. G., Hendershot, W. H., Jutras, P., & Prasher, S. O. 2015. Immobilization of trace metals in contaminated urban soil amended with compost and biochar. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(6), 1–12.
- Kartikawati, R, Yulianingsih, E., dan Wihardjaka, A. 2018. Methane emission from Indonesian high yielding rice cultivars. Proceeding of international workshop and seminar. ISBN 978-602-344-251-5, DOI: 10.5281/zenodo.3345275. 369-375
- Kartikawati, R, Yulianingsih E, Yunianti, I. F., dan Wihardjaka, A. 2019. A strategy for reducing methane emission using hybrid rice variety. The 5th International Seminar on Sciences. OP Conf. Series: Earth and Environmental Science 299. doi:10.1088/1755-1315/299/1/012043.
- Kartikawati, R, Yulianingrum, H., Wihardjaka, A., Setyanto, P., dan Ariani, M. 2017a. Pemilihan varietas padi rendah emisi CH₄ untuk mendukung penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) darilahan sawah. Prosiding Seminar Nasional Universitas Islam Riau (UIR). ISBN: 978-979-3793-70-2, 22-37

- Kartikawati, R., Susilawati, H. L., Ariani, M dan Setyanto, P. 2011. Teknologi Mitigasi Gas Rumah Kaca (GRK) Dari Lahan Sawah. Sinar Tani. Edisi 6-12 April 2011 No. 3400 Tahun XLI
- Kartikawati R., Ariani, M., Wihardjaka, A., dan Setyanto, P. 2017b. Characteristic of rice variety for low greenhouse gases (GHGs) emission in facing the challenges of climate change and national food security. Proceedings of PERIPI-2017 International Seminar. Bogor. Indonesia. 55-60
- Kasryno. F. 2006. Pemberdayaan petani dan kearifan lokal pada sistem budi daya perta-nian ekologis berbasis padi. Prosiding Seminar YAPADI: Membalik Arus Menuai Revitalisasi Pedesaan. 24 Mei 2006. Yayasan Padi Indonesia, Jakarta.
- Kassam, A. and T. Friedrich. 2012. An ecologically sustainable approach to agricultural production intensification: Globalperspectives and developments. Field Actions Science Reports. Special Issue 6.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Murtaza, B., Bibi, I., and Dumat, C. 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *J. of Geochemical Exploration* 182, 247-268.
- Khasanah, U., Mindari, W., & Suryaminarsih, P. (2021). Assessment Of Heavy Metals Pollution On Rice Field In Sidoarjo Regency Industrial Area. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(2), 73–81.
- Khoiriah, K., Wellia DV., dan Safni. 2019. Degradasi Pestisida diazinon dengan proses fotokatalisis sinar matahari menggunakan katalis C, N-Codoped TiO₂. *Jurnal kimia dan kemasan* 41(1): 17-25
- Khorram, M. S., Zhang, Q., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H., and Yu, Y. 2016. Biochar: a review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *Journal of environmental sciences*, 44, 269-279
- Kimura M, Y Miura, AWatanabe, T Katoh and H Haraguchi. 1991. *Methane emission from paddy field (Part 1) Effect of fertilization, growth stage and midsummer drainage: pot experiment*. *Environ. Sci.* 4, 265–271.

- Kogan, FN. 1997. Global Drought Watch from Space. Bull. Am. Meteorol. Soc., 78(4): 621-636
- Komarawidjaja, W. (2017). Paparan Limbah Cair Industri Mengandung Logam Berat pada Lahan Sawah di Desa Jelegong, Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(2), 173. <https://doi.org/10.29122/jtl.v18i2.2047>
- Komatsuzaki, M. 2011. Agro-ecological Approach for Developing a Sustainable Farming and Food Sistem. Journal of Developments in Sustainable Agriculture 6: 54-63.
- Konstantinou, I. K., Hela, D. G., & Albanis, T. A. (2006). The status of pesticide pollution in surface waters (rivers and lakes) of Greece. Part I. Review on occurrence and levels. *Environmental Pollution*, 141(3), 555-570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.07.024>
- Kurnia, U. and Sutrisno, N., 2008. Strategi pengelolaan lingkungan pertanian. Jurnal Sumberdaya Lahan Vol, 2(1).
- Kurnia, U. and Sutrisno, N., 2008. Strategi pengelolaan lingkungan pertanian. Jurnal Sumberdaya Lahan Vol, 2(1).
- Kusnanto, H. 2011. Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim. Edisi Pertama. Pusat Studi Lingkungan Hidup, UGM, Yogyakarta.
- Kusuma, Z. 2009. Dampak Pencemaran Pestisida di DAS brantas Hulu. Agrotek Vol.17, No.3. Mei 2009.
- Lagiman. 2020. Pertanian Berkelanjutan: Untuk Kedaulatan Pangan dan Kesejahteraan Petani. Prosiding Seminar Nasional Fakultas Pertanian UPN "VETERAN" YOGYAKARTA
- Lagiman. 2020. Pertanian berkelanjutan: Untuk kedaulatan pangan dan kesejahteraan petani. Prosiding Seminar Nasional Fakultas Pertanian UPN "Veteran" Yogyakarta. Hlm. 365-381.
- Lakshita, N., Poromarto, S. H., Hadiwiyono, H. 2019. Ketahanan Beberapa Varietas Padi terhadap *Cercospora oryzae*. *Agrotech Res J.* 3(2):75-79.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamic. p. 131-141 In Lal R., Kimble J.M., Levine E., Stewart B.A. (Eds.). Soil and Global Change. Florida. CRC. Lewis

- Las, Irsal., K. S. dan Setiyanto, A. 2006. Isu dan pengelolaan lingkungan dalam revitalisasi pertanian. *Jurnal Litbang Pertanian*, 25(3), p.107
- Las I. 2007. Menyiasati Fenomena Anomali Iklim bagi Pemantapan Produksi Padi Nasional pada Era Revolusi Hijau Lestari. *Jurnal Biotek-LIPI. Naskah Orasi Pengukuhan Profesor Riset Badan Litbang Pertanian*, Bogor, 6 Agustus 2004.
- Las, Irsal., K.S. and Setiyanto, A., 2006. Isu dan pengelolaan lingkungan dalam revitalisasi pertanian. *Jurnal Litbang Pertanian*, 25(3), p.107.
- Lee, H.J., Kim, K.Y., Hamm, S.Y., Kim, M., Kim, H.K. and Oh, J.E., 2019. Occurrence and distribution of pharmaceutical and personal care products, artificial sweeteners, and pesticides in groundwater from an agricultural area in Korea. *Science of the Total Environment*, 659, pp.168-176.
- Lehmann, J., and S. Joseph. 2009. *Biochar for environmental Management : Science and Technology*. London: Earthscan
- Lescourret, F., D. Magda, G. Richard, A.F. Adam-Blondon, M. Bardy, J. Baudry, I. Doussan, B. Dumont, F. Lefevre, I. Litrico, R. Martin-Clouaire, B. Montuelle, S. Sylvain Pellerin, M. Plantegenest, E. Tancoigne, A. Thomas, H. Guyomard, and J.F. Soussana. 2015. A sosial-ecological approach to managing multipleagro-ecosistemsservices. *CurrentOpinioninEnvironmentalSustainability*14:68–75.
- Li C, Hu Y, Zhang F, Chen J, Ma Z, Ye X, Yang X, Wang L, Tang X, Zhang R, Mu M, Wang G, Kan H, Wang X, Mellouki A. 2016. Multi-pollutants emissions from the burning of major agricultural residues in China and the related health-economic effect assessment. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* <http://dx.doi.org/10.5194/acp-2016-651>
- Lingjuan Li, Shoutong Wang, Xiangzhen Li, Tiezhu Li, Xiaohong He, and Yong Tao. 2018. Effects of *Pseudomonas chenduensis* and biochar on cadmium availability and microbial community in the paddy soil. *Science of The Total Environment*, Volumes 640–641,p1034-1043.
- Linguist B, Van Groenigen KJ, Adviento-Borbe MA, Pittelkow C Van Kessel C. 2012. An agronomic assessment of

- greenhouse gas emissions from major cereal crops. *Global Change Biology*, 18(1), 194-209
- Liu, D., Jiang, W., Liu, C., Xin, C., and Hou, W. 2000. Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard [*Brassica juncea* (L.)]. *Bioresource Technology*, 71 (3): pp. 273–277.
- Loewy, R.M., Monza, L.B., Kirs, V.E. and Savini, M.C., 2011. Pesticide distribution in an agricultural environment in Argentina. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 46(8), pp.662-670.
- Lu Y, Wassmann R, Neue HU Huang C. 2000. Dynamics of dissolved organic carbon and methane emissions in a flooded rice soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64**:2011–2017. doi:10.2136/sssaj2000.6462011x
- Lu Y, Watanabe A Kimura M. 2002. Contribution of plant-derived carbon to soil microbial biomass dynamics in a paddy rice microcosm. **Biol. Fertil. Soils** **36**:136–142. doi:10.1007/s00374-002-0504-2
- Maggi, F., & Tang, F. H. M. (2021). Estimated decline in global earthworm population size caused by pesticide residue in soil. *Soil Security*, 5(August), 100014. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100014>.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Malyan SK, A Bhatia, A Kumar, DK Gupta, R Singh, SS Kumar, R Tomer, O Kuma, N Jain. 2016. *Methane production, oxidation and mitigation: a mechanistic understanding and comprehensive evaluation of influencing factors*. *Sci Total Environ*. 572(2016): 874–896.
- Malyan, Sandeep K., Arti Bhatia, Smita S. Kumar, Ram Kishor Fagodiya, Arivalagan Pugazhendhi, Pham Anh Duc. 2019. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 20. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101266>
- Mandal, A., Sarkar, B., Mandal, S., Vithanage, M., Patra, A.K. and Manna, M.C., 2020. Impact of agrochemicals on soil health.

In Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation (pp. 161-187). Butterworth-Heinemann.

- Manurung, M., Setyo, Y. and Suandewi, N.P.N.R., 2018. Akumulasi logam berat krom (cr) pada tanaman kentang (*Solanum tuberosum* L.) akibat pemberian pestisida, pupuk organik dan kombinasinya. *Jurnal Kimia*, 12(2), pp.165-172.
- Manurung, M., Setyo, Y., & Repli Suandewi, N. P. N. (2018). Akumulasi Logam Berat Krom (Cr) Pada Tanaman Kentang (*Solanum tuberosum* L.) Akibat Pemberian Pestisida, Pupuk Organik dan Kombinasinya. *Jurnal Kimia*, 165. <https://doi.org/10.24843/jchem.2018.v12.i02.p12>
- Marican, A., and Durán-Lara, E. F. 2018. A review on pesticide removal through different processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(3): 2051-2064.
- McCarty, B. 2015. Activated Charcoal for Pesticide Deactivation. http://media.clemson.edu/public/turfgrass/2015%20Pest%20Management/2015_act_charcoal.pdf. Diakses tanggal 23 Mei 2020.
- Megharaj M, Ramakrishnan B, Venkateswarlu K, Sethunathan N, Naidu R. 2011. Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective. *Environ Int.* 37: 1362–1375.
- Megharaj M, Ramakrishnan B, Venkateswarlu K, Sethunathan N, Naidu R. Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective. *Environ Int.* 2011; 37: 1362–1375
- Mellyga, D., Sukarjo, Hidayah, A., & Setyanto, P. (2016). Identifikasi sebaran timbal (Pb) pada lahan sawah dataran tinggi di Kabupaten Wonosobo dan serapannya pada tanaman padi. *Balitbangtan*, 1, 614–620.
- Miyanto, A., 2009. Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Sektor Pertanian Produksi Tanaman Cabai Rawit (*Studi Kasus di Desa Bulupasar, Kecamatan Pagu, Kabupaten Kediri*)https://www.academia.edu/34049822/Pengaruh_Pengaruh_Perubahan_Iklim_Terhadap_Sektor_Pertanian diakses 14 oktober 2021.
- Monteny GJ, Bannink A, Chadwick D. 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandary. *Agriculture Ecosystems and Environment* 112(2):163-170.

- Moore MT, Tyler HL, Locke MA. 2013. Aqueous pesticide mitigation efficiency of *Typha latifolia* (L.), *Leersia oryzoides* (L.) Sw., and *Sparganium americanum* Nutt. *Chemosphere* 92(10):1307–1313.
- Moreno, F.N., Anderson, C.W.N., Stewart, R.B. , and Robinson, B.H. 2008. Phytofiltration of mercury-contaminated water: volatilisation and plant-accumulation aspects. *Environmental and Experimental Botany* 62. (1): pp. 78–85.
- Moretti, C.I., Mattos, L.M., Calbo, A.G. and Sargent, S.A. 2010. Climate changes and potential impacts on postharvest quality of fruit and vegetable crops: A review. *Food Research International* 43:1824–1832
- Morillo, E., and Villaverde, J. 2017. Advanced technologies for the remediation of pesticide-contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 586:576-597.
- Muanah, M., Karyanik, K., Muliatiningsih M., Suwati S., Dewi, E. S. 2019. Pembuatan pupuk organik padat dari ampas Biogas (Bio-Slurry) kotoran sapi di Desa Peresak Kabupaten Lombok Barat. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan* Vol 3 (1). DOI: <https://doi.org/10.31764/jpmb.v3i1.1295>
- Mueller J. *Volume of Pesticides Used in Indonesia 2009-2018*. Chemical & Resources; 2020. <https://www.statista.com/statistics/1101117/indonesia-pesticide-use-volume/>. Accessed November 19, 2021.
- Mulyadi, Poniman, dan Sukarjo. 2014. Aldrin and Endosulfan Residues in River Water and Agricultural Land of The Middle Citarum Watershed, Cianjur District. *Jurnal Lingkungan Tropis* Vol.8, No.2, September 2014: 115-123
- Munarso, S. J., Miskiyah, dan Wisnu, B. 2006. Studi kandungan residu pestisida pada kubis, tomat, dan wortel di Malang dan Cianjur. *Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian*, 2.
- Mustikarini, E. D., Ratna Santi, S. P., & Tri Lestari, S. P. (2020). Low External Input Sustainable Agriculture (LEISA) untuk Optimalisasi Lahan Pasca Tambang Timah dan Lahan Sawah Cetak Baru di Bangka. UBB Press Bangka.
- Naqvi SMK, Sejian V. 2011. Global climate change: role of livestock. *Asian J. Agric. Sci.* 3 (1): 19-25.

- Narwanti, Iin. 2008. Residu pertisida pada tanah, air dan bawang merah di Desa Srigading Kecamatan Sanden Kabupaten Bantul. Thesis. Sekolah Pascasarjana, UGM. Unpublish. 87p.
- Neue, H.U. dan P.A. Roger. 1993. *Rice agriculture: factors controlling emission*. pada M.A.K. Khalil and M. Shearer (Eds.). Global Atmospheric Methane.NATO ASI/ARW Series.
- Nopiantari, N.P., I.W. Arthana, dan I. A. Astarini. 2017. Dampak Kegiatan Pertanian terhadap Tingkat eutrofikasi dan Jenis-jenis Fitoplankton di Danau Buyan Kabupaten Buleleng Provinsi Bali.*Jurnal Eutrophic*.11(1): 47-54.
- Notohadiprawiro, T. 2006. Pertanian dan Lingkungan. Disampaikan pada Kursus Manajemen Perkebunan Dasar Gula Bidang Tanaman. LPP Yogyakarta. 23 Oktober -23 Desember 1989. Repro. Ilmu Tanah Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta
- Notohadiningrat, T. 2021. Melembagakan iptek dan sadar lingkungan pada masyarakat tani untuk membangun usahatani yang berkelanjutan. Dalam: Utami, S.N.H., dan N.W. Yuwono (Eds.). Tanah, Lingkungan dan Pertanian Berkelanjutan. Penerbit Deepublish. Yogyakarta. Hlm. 138-154.
- Nugroho, B. Y. H., Wulandari, S. Y., & Ridlo, A. (2015). ANALISIS RESIDU PESTISIDA ORGANOFOSFAT DI PERAIRAN MLONGGO KABUPATEN JEPARA Analysis of Organophosphate Pesticide Residue in Mlonggo Waters, Jepara. *Jurnal Oseanografi*, 4(3), 541–544. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Nurjannah, N., Yulianty, R., Marzuki, A., Kasim, S., & Djide, N. J. N. (2020). ANALISIS RESIDU PESTISIDA KLORPIRIFOS PADA BERAS (*Oryza sativa*) YANG BERASAL KECAMATAN BAEBUNTA KABUPATEN LUWU UTARA. *Majalah Farmasi Dan Farmakologi*, 23(3), 109–111. <https://doi.org/10.20956/mff.v23i3.9402>
- Nwankwegu AS, Onwosi CO (2017) Bioremediation of gasoline contaminated agricultural soil by bioaugmentation. *Environ Technol Innov* 7:1–11.
- Oberc, B.P. and A.A. Schnell. 2020. Approaches to sustainable agriculture: Exploring the pathways towards the future of farming. International Union for Conservation of Nature.

Ministry of Agriculture, Nature, and Food Quality of the Netherlands.

- Oerke EC. 2006. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144: 31-43.
- Oginawati, K., Susetyo, S.H., Rahmawati, S.I., Kurniawan, S.B. and Abdullah, S.R.S., 2021. Distribution of organochlorine pesticide pollution in water, sediment, mollusk, and fish at Saguling Dam, West Java, Indonesia. *Toxicological Research*, pp.1-9.
- Pailan, S., Gupta, D., Apte, S., Krishnamurthi, S., & Saha, P. (2015). Degradation of organophosphate insecticide by a novel *Bacillus aryabhatai* strain SanPS1, isolated from soil of agricultural field in Burdwan, West Bengal, India. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 191-195.
- Pamungkas, O.S., 2017. Bahaya paparan pestisida terhadap kesehatan manusia. *BIOEDUKASI: Jurnal Biologi dan Pembelajarannya*, 14(1).
- Peng, X., Deng, Y., Peng, Y., Yue, K., 2018. Effects of biochar addition on toxic element
- Pham TH, Lee BK, Kim J, Lee CH. 2016. Enhancement of CO₂ capture by using synthesized nano-zeolite. *J Taiwan Inst Chem Eng* 64:220– 226
- Pokharel, Prem; Kwak, Jin-Hyeob; Ok, Yong Sik; Chang, Scott X. 2018. Pine sawdust biochar reduces GHG emission by decreasing microbial and enzyme activities in forest and grassland soils in a laboratory experiment. *Science of The Total Environment*. 625: 1247–1256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.343>
- Polli, F. 2019. Pengaruh Suhu dan Lama Aktivasi terhadap Mutu Arang Aktif dari Kayu Kelapa. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan* 12 (2): 21-28
- Prabawardani, S., Gunawan, G., & Purnomo, W. (2020). Aplikasi pestisida dan analisis residunya pada produksi beras petani di kampung sidomulyo distrik oransbari kabupaten manokwari selatan. *Cassowary*, 3(1), 11–21. <https://doi.org/10.30862/cassowary.cs.v3.i1.34>

- Pramono A, Adriany TA, Susilawati HL. 2020. Mitigation Scenario for Reducing Greenhouse Gas Emission from Rice Field by Water Management and Rice Cultivars. *Journal of Tropical Soils*. 25(2): 53-60. DOI: 10.5400/jts.2019.v25i2.53-60.
- Pramono A, Helena Lina Susilawati, Anggri Hervani, Hesti Yulianingrum, dan Ika Ferry Yunianti. 2019. Emisi dari Pemupukan dan Pengapuran dalam Agus F (Ed.). 2019. Metode Penilaian Adaptasi dan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta. 154 hal.
- Pramono, A. (2008). *Kandungan Logam Berat pada Sistem Integrasi Tanaman ternak di DAS Serang. November*, 18–19.
- Prasad, M.N.V. and De Oliveira Freitas, H.M. 2003. Metal hyperaccumulation in plants-biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology* 6 (3): pp. 110–146.
- Pratama, D.D.A., Setiani, O. and Darundiati, Y.H., 2021. Studi Literatur: Pengaruh Paparan Pestisida Terhadap Gangguan Kesehatan Petani. *Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung*, 13(1), pp.160-171.
- Priyadi, S., Darmaji, P., Santoso, U. and Hastuti, P., 2013. Profil Plumbum (Pb) dan Cadmium (Cd) sebagai Kontaminan Dampak Penggunaan Agrokimia serta Remediasi Biji Kedelai Menggunakan Swelling Agent pada Khelasi dengan Asam Sitrat. *Jurnal Natur Indonesia*, 15(1), pp.45-51.
- Puglisi, E., Cappa, F., Fragoulis, G., Trevisan, M., Del Re, A.A., 2007. Bioavailability and degradation of phenanthrene in compost amended soils. *Chemosphere* 67, 548–556.
- Pulatov, B., Linderson, M., Hall, K. and Jönsson, A.M. 2015. Modeling Climate Change Impact on Potato Crop Phenology, and Risk of Frost Damage and Heat Stress In Northern Europe. *Agric For Meteorol*:281–292
- Purbalisa, W., Dewi. T. 2019. Remediasi Tanah Tercemar Kobalt (Co) Menggunakan Bioremediator Dan Amelioran. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan Vol 6 (2) : 1237-1242*. e-ISSN:2549-9793, doi: 10.21776/ub.jtsl.2019.006.2.4
- Purbalisa, W., Handayani, C. O. 2017. Remediation of arsenic polluted soil using ornamental plants *Caladium bicolor*.

- Purbalisa, W., Harsanti E.S., Hidayah, A., Setyanto, P. 2013. Pemanfaatan sludge plus untuk menurunkan Pb dan Cd pada lahan sawah. Prosiding Seminar Nasional : Pertanian Ramah Lingkungan. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian
- Purbalisa, W., Mulyadi, dan Purnariyanto, F. 2017. Kadar kadmium dan hasil produksi padi pada tanah tercemar kadmium yang telah diremediasi. Seminar Nasional Pendidikan Biologi dan Saintek : Isu-isu Strategis Sains, Lingkungan dan Inovasi Pembelajarannya. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Purbalisa, W., Zulaeha, I., Paputri, D. M. W., Wahyuni, S., Ardiwinata, A.N. 2019. AIP Conference Proceedings 2120, 040015 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5115653>
- Purwanto, I., Suryono, J., Sumantri, K. K., Somantri, E., Mulyadi, Suwandi, Jaenudin, Mindawati, Suhaeti, E., Hidayat, E., dan Hidayat, R. 2014. Petunjuk Teknis Pelaksanaan Penelitian Kesuburan Tanah. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. IAARD Press : Jakarta.
- Putra, A. Y., dan Mairizki, F. 2020. Penentuan Kandungan Logam Berat Pada Air Tanah Di Kecamatan Kubu Babussalam, Rokan Hilir, Riau. *Jurnal Katalisator*, 5(1), 47.
- Rahayu S., Purwaningsih D., dan Pujiyanto. 2009. Pemanfaatan kotoran ternak sapi sebagai sumber energi alternatif ramah lingkungan beserta aspek sosio kulturalnya. *Jurnal Inotek* 3 (2): 150-160.
- Ramadhan, N.I., 2018. Pengaturan Tindak Pidana Pencemaran Lingkungan di Indonesia: Studi Pencemaran Tanah di Brebes. *Logika: Jurnal Penelitian Universitas Kuningan*, 9(02), pp.96-102.
- Rasman dan Hasmayani, H. 2019. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kandungan Timbal (Pb) Pada Bawang Merah (*Allium Cepa*) Di Desa Pekalobean Kabupaten Enrekang. *Sulolipu: Media Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat*, 18(1), pp.47-52.

- Rasydy, L. O. A. dan Sylvia, D. 2021. Analisis logam berat pada beras (*oriza sativa l.*) Yang ditanam di daerah industri karet mekar jaya. VIII (1), 66–74
- Rawtani, D., Khatri, N., Tyagi, S., & Pandey, G. 2018. Nanotechnology-based recent approaches for sensing and remediation of pesticides. *Journal of environmental management*, 206, 749-762.
- Ray, S., Datta, R., Bhadra, P., Chaundhuri, B., Mitra, A. K. 2012. From Space to Earth: *Bacillus aryabhatai* Found in the Indian Sub Continent. *Bioscience Discovery*. 3(1):138- 145
- Richardson, K. J., Lewis, K. H., Krishnamurthy, P. K., Kent, C., Wiltshire, A. J., Hanlon, H. M. 2018. Food security outcomes under a changing climate: impacts of mitigation and adaptation on vulnerability to food insecurity. *Clim.Chang.* 147, 327–341. [https:// doi.org/10.1007/s10584-018-2137-y](https://doi.org/10.1007/s10584-018-2137-y)
- Ridwan dan Chazanah, N. 2013. Penanganan Dampak Perubahan Iklim Global pada Bidang Perkeretaapian Melalui Pendekatan Mitigasi dan Adaptasi. *Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*. 20(2):133-142.
- Rinardi, H., Masruroh, N. N., Maulany, N. N., dan Rochwulaningsih, Y., 2019. Dampak revolusi hijau dan modernisasi teknologi pertanian: studi kasus pada budi daya pertanian bawang merah di Kabupaten Brebes. *Jurnal Sejarah Citra Lekha*, 4(2), pp.125-136.
- Risdiono, B. 2010. Sistem Integrasi Tanaman dengan Ternak. *Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian*. Volume 32 Nomor 4.
- Rittl, Tatiana, F., Dener, M. S., Oliveira, Luiza, P., Canisares, Sagrilo, E., Bahl, K. B., Dannenmann, M., dan Carlos, E. P., Cerri. High Application Rates of Biochar to Mitigate N2O Emissions From a N-Fertilized Tropical Soil Under Warming Conditions. *Front. Environ. Sci.* 8:611873. doi: 10.3389/fenvs.2020.611873
- Robertson GP, Paul EA, Harwood RR. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 28: 1922-1925.

- Robertson GP, Paul EA, Harwood RR. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to radiative forcing of the atmosphere. *Science* 28:1922-1925.
- Rochaddi, B., Sabdono, A. and Zainuri, M., 2019, March. Preliminary study on the contamination of organophosphate pesticide (chlorpyrifos) in shallow coastal groundwater aquifer of Surabaya and Sidoarjo, East Java Indonesia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 246, No. 1, p. 012079). IOP Publishing.
- Rochaddi, B., Suryono, C.A., Atmodjo, W. and Satriadi, A., 2018, February. Preliminary Study Contamination of Organochlorine Pesticide (Heptachlor) and Heavy Metal (Arsenic) in Shallow Groundwater Aquifer of Semarang Coastal Areas. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 116, No. 1, p. 012099). IOP Publishing.
- Rodriguez, L., Lopez-Bellido, F.J., Carnicer, J., Recreo, F., Tallos, A. dan Monteagudo, J.M. 2005. Mercury recovery from soils by phytoremediation. in *Book of Environmental Chemistry*, Springer, Berlin, Germany: pp. 197–204.
- Rodriguez-Campos J, Dendooven L, Alvarez-Bernal D, ContrerasRamos SM. 2014. Potential of earthworms to accelerate removal of organic contaminants from soil: a review. *Appl Soil Ecol* 79:10– 25.
- Rokhwani, H.P dan YS. Ratnaningsih, 2010. Persistent Organic Pollutants (POPs) di Beberapa Lokasi Pertanian di Indonesia. *Ecolab Jurnal Pemantauan Kualitas Lingkungan* Vol.4 No. 2 2010
- Ruminta, Rosniawaty S, Wahyudin A. 2016. Pengujian sensitivias kekeringan dan daya adaptasi tujuh varieas padidi wilayah dataran medium Jatinangor. *Jurnal Kultivasi*. 15(2):114-120.
- Sander BO, R Wassmann LK Palao and A Nelson. 2017. Climate based suitability assessment for Alternate Wetting and Drying water management in the Philippines: A Novel Approach for Mapping Methane Mitigation Potential in Rice Production.” *Carbon Management* 8: 331-342.
- Sarie, H. 2019. Potensi Bahaya Kontaminasi Logam Berat di Lahan Bekas Tambang Batubara yang Digunakan Sebagai Lahan

- Pertanian Potential Dangers of Heavy Metal Contamination in the Coal Mine Used Land as Agricultural Land. *Buletin Loupe*, 15(02), 37–41.
- Sarker, S., Akbor, M. A., Nahar, A., Hasan, M., Islam, A. R. M. T., dan Siddique, M. A. B. 2021. Level of pesticides contamination in the major river systems: A review on South Asian countries perspective. *Heliyon*, 7(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07270>
- Sarwoto, Ardiwinata, A. N., Sulaeman, E., Harsanti, E. S., dan Wahyuni, S. 2017. Pembuatan Pupuk Kompos yang Mampu Menurunkan Kandungan Residu Insektisida di Lahan Pertanian. Uraian Paten. Nomor Paten IDP000044095
- Scavi, S. 2012. an Agriculture Pollutant: Chemical Fertilizer. *International Journal of Enviromental Science and Development*. 3(1):11-14.
- Schipper, L.A., G.P. Sparling, L.M. Fisk, M.B. Dodd, I.L. Power, and R.A. Litter. 2011. Rates of accumulation of cadmium and uranium in a New Zealand hill farm soil as a result of long-term use of phosphate fertilizer. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 144:95–101.
- Setiawati, W., Muharam, A., Susanto, A., Boes, E., dan Hudayya, A. 2018. Penerapan Teknologi Input Luar Rendah Pada Budidaya Cabai Merah untuk Mengurangi Penggunaan Pupuk dan Pestisida Sintetik (Implementation of Low External Input Technology for Chili Pepper Cultivation to Reduce Fertilizer and Synthetic Pesticide). Indonesian Agency for Agricultural Research and Development.
- Setyanto, P., Pramono, A., Adrian, T. A., Susilawati, H. L., Tokida, T., Padre, A. T., dan Minamikawa, K. 2018. Alternate wetting and drying reduces methane emission from a rice paddy in Central Java, Indonesia without yield loss, *JSSPN*, 64:1, 23-30.
- Setyanto, P., Rosenani, A.B., Boer, R., Fauziah, C.I., Khanif, M. J. 2004. *The effect of rice cultivars on methane emission from irrigated rice field*. Indonesian Journal of Agricultural Science. 5, 20-31. DOI: 10.21082/ijas.v5n1.2004.20-31
- Setyanto, P., A. Wihardjaka, H.L. Susilawati, A. Pramono, E. Yulianingsih, R. Kartikawati, M. Ariani, A. Hervani, T.A. Adrian, I.F. Yuniarti, dan H. Yulianingrum. 2018. Climate

Smart Agriculture (CSA) di Lahan Sawah Tadah Hujan.
IAARD Press. Jakarta.

- Setyorini, D., Soeparto, dan Sulaeman. 2003. Kadar logam berat dalam pupuk. Hlm. 219-229. Dalam Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Kualitas Lingkungan dan Produk Pertanian: Pertanian Produktif Ramah Lingkungan Mendukung Ketahanan dan Keamanan Pangan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Shah, Z. U., & Parveen, S. 2021. Pesticides pollution and risk assessment of river Ganga: A review. *Heliyon*, 7(8), e07726. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07726>
- Shahbandeh, M. 2021. *World Rice Acreage 2019 (in million hectare)*. Diakses melalui <https://www.statista.com/statistics/262620/global-cocoa-production/>
- Shahid, M., Pinelli, E., Dumat, C., 2012a. Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. *J. Hazard. Mater.* 219-220, 1–12.
- Shi, Y., Sasai, T., Yamaguchi, Y. 2014. *Spatio-temporal evaluation of carbon emissions from biomass burning in Southeast Asia during the period 2001–2010*. *Ecol. Model.* 272, 98–115.
- Sigren LK, Byrd GT, Fisher FM Sass RL. 1997. Comparison of soil acetate concentrations and methane production, transport, and emission in two rice cultivars. *Global Biogeochem. Cycles* 11:1–14. doi:10.1029/96GB03040
- Sihotang, B. 2010. Pembangunan Pertanian Berkelanjutan dengan Pertanian Organik. Kumpulan Artikel Budidaya Tanaman. block <http://www.Ideelok.com>
- Silva, N. S., Guidoa, M. L., Luqueno, F. F., Marscha, R., Dendoovena, L. 2011. Emission of greenhouse gases from an agricultural soil amended with urea: A laboratory study. *Applied Soil Ecology* 47: 92–97
- Simbolon, A. R. 2016. Pencemaran Bahan Organik Dan Eutrofikasi Di Perairan Cituis, Pesisir Tangerang. *Jurnal ProLife*.Vol. 3.No.2.
- Smith KA, Conen F. 2004. Impact of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use Management* 20: 255–263.

- Soares, M. A., Marto, S., Quina, M. J., Gando-Ferreira, L., & Quinta-Ferreira, R. 2016. Evaluation of eggshell-rich compost as biosorbent for removal of Pb(II) from aqueous solutions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(5): 1–16.
- Soemarno. 2001. Konsep usahatani lestari dan ramah lingkungan. *Prosiding Seminar Nasional Budidaya Tanaman Pangan Berwawasan Lingkungan*. Jakenan, 7 Maret 2000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor. Hlm. 1–3.
- Speight, J.G., 2017. Sources and Types of Organic Pollutants. In *Environmental Organic Chemistry for Engineers* (pp 153–201). Butterworth-Heinemann.
- Spence, N., Hill, L., Morries, J., 2020. How the global threat of pests and diseases impacts plants, people, and the planet. *Plants, People, Planet* 2, 5–13. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10088>
- Sudalmi E.S. 2010. Pembangunan Pertanian Berkelanjutan. *INNOFARM: Jurnal Inovasi Pertanian* Vol.9, No. 2, September 2010 (15 -28)
- Sudaryanto A., Monirith I., Kajiwaru N., Takahashi S., Hartono P., Muawanah, Tanabe S. 2007. Levels and Distribution of Organochlorine In Fish from Indonesia. *Environmental International*, 33(6) :750-758.
- Sugandhy, A. 2009. Instrumentasi dan Standardisasi Kebijakan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Penerbit Universitas Trisakti. Jakarta.
- Sukarjo, W. Purbalisa, O. Handayani, C., & S. Harsanti, E. (2019). Assessment of Heavy Metal Contamination Risk in Rice Field and Rice Plant in Brantas Watershed, Jombang Regency. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 06 (01), 1033–1042. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2019.006.1.2>
- Sumiati, A., & Dwi Julianto, R. P. (2019). Analisa Residu Pestisida Di Wilayah Malang Dan Penanggulangannya Untuk Keamanan Pangan Buah Jeruk. *Buana Sains*, 18(2), 125. <https://doi.org/10.33366/bs.v18i2.1185>
- Sun J, Peng H, Chen J, Wang X, Wei M, Li W, Yang L, Sun J, Peng H, Chen J, Wang X, Li W, Yang L, Zhang Q, Wang W, Mellouki A. 2016. An estimation of CO₂ emission via agricultural crop

- residue open field burning in China from 1996 – 2013. *J. Clean. Prod.* 112: 2625–2631. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.112>
- Sun, J., Peng, H., Chen, J., Wang, X., Wei, M., Li, W., ... Mellouki, A. (2016). *An estimation of CO₂ emission via agricultural crop residue open field burning in China from 1996 to 2013. Journal of Cleaner Production*, 112, 2625–2631. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.112
- K. Yagi and K. Minami. 2007. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 36, no. 4, pp. 599–610, Dec. 1990, doi: 10.1080/00380768
- Suprihatin A, Amirrullah J. 2018. Pengaruh Pola Rotasi Tanaman terhadap Perbaikan Sifat Tanah Sawah Irigasi. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 12(1):49-57.
- Suralta RR and A Yamauchi. 2008. Root growth, aerenchyma development, and oxygen transport in rice genotypes subjected to drought and waterlogging. *Environ. Exp. Bot.* 64:75–82. doi:10.1016/j.envexpbot.2008.01.004
- Surmaini E, Runtunuwu, E, Las, I. 2011. Upaya sektor pertanian dalam menghadapi perubahan iklim. *Jurnal Litbang Pertanian*. 30(1):1-7.
- Suryaningsih E, Hadisoeganda WW. 2004. Pestisida botani untuk mengendalikan hama dan penyakit pada tanaman sayuran. Monografi No. 26. Balai Penelitian Tanaman Sayuran Lembang, Jawa Barat
- Suryono, C.A., Rochaddi, B. and Irwani, I., 2016. Kajian Awal Kontaminasi Pestisida Organoklorin dalam Air Laut di Wilayah Perairan Paling Barat Semarang. *Buletin Oseanografi Marina*, 5(2), pp.101-106.
- Susilawati HL, Dariah A, Agus F (Eds). 2021. *Metode Perhitungan Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian (ed-2)*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Susilawati HL, P Setyanto, R Kartikawati, and M T Sutriadi. 2019. The opportunity of direct seeding to mitigate greenhouse gas emission from paddy rice field. *International Seminar and Congress of Indonesian Soil Science Society*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 393 (2019)

- Susilawati HL, Yulianingrum H, PramonoA. 2021. Integrated crop-livestock management system in rainfed lowland. The 7th International Conference on Sustainable Agriculture and Environment. 2020 Ags 25-27. Surakarta, Indonesia. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 637 (2021) 012022. doi:10.1088/1755-1315/637/1/012022.
- Sutrisno N, Hamdani A. 2020. Optimalisasi pemanfaatan sumberdaya air untuk meningkatkan produksi pertanian: Review. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 13(2):73-88.
- Sutrisno, S. and Kuntastyuti, H., 2015. Pengelolaan Cemaran Kadmium Pada Lahan Pertanian Di Indonesia. *Buletin Palawija*, 13(1), pp.83-91.
- Tamba, B. 2013. Respon Fungsional *Paederus fuscipes* terhadap *nilaparvata lugens*. Skripsi. Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. 30 pp.
- Tanaka K, Choi J, Cao Y, Stacey G. 2014. Extracellular ATP acts as a damage-associated molecular pattern (DAMP) signal in plants. *Front Plant Sci*. 5: 446; doi: 10.3389/fpls.2014.00446
- Tandjung, S.D. 2003. Ilmu Lingkungan. Cetakan ke-4. Fakultas Biologi UGM Yogyakarta.
- Tangahu, B.V., Abdullah, S.R.S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., and Mukhlisin, M. 2011. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *Int. Journal of Chemical Engineering*. Vol 2011, article ID 939161, 31 pages. Doi:10.1155/2011/939161.
- Taufik, I., 2011. Pencemaran pestisida pada perairan perikanan di Sukabumi-Jawa Barat. *Media Akuakultur*, 6(1), pp.69-75.
- Tauseef SM, Premalatha M, Abbasi T, Abbasi SA. 2013. Methane capture from livestock kotoran: Review. *Journal of Environmental Management* 117:187-207.
- Tian, Y., Zhilin H., dan Wenfa X. 2010. Reductions in non-point source pollution through different management practices for an agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Environmental Sciences*. 22(2): 184-191.

- Tjasyono Bayong HK. 2004. *Klimatologi*. Bandung: ITB
- Tokida T, Fumoto T, Cheng W, Matsunami T, Adachi M, Katayanagi N, Matsushima M, Okawara Y, Nakamura H, Okada M, Sameshima R, Hasegawa T. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) and soil warming on CH₄ emission from a rice paddy field: impact assessment and stoichiometric evaluation. *Biogeosciences*.2010; 7:2639-2653. Doi:10.5194/bg-7-2639-2010
- Triana, V. 2008. Pemanasan Global. *Jurnal Kesehatan Masyarakat II* (2): 159-163
- Triyono A, Purwanto dan Budiyono. 2013. Efisiensi Penggunaan Pupuk N Untuk Pengurangan Kehilangan Nitrat Pada Lahan Pertanian. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan 2013*.
- Tuhumury, G. N. ., J.A.Leatemia, R.Y.Rumthe, & J.V.Hasinu. (2012). Residu Pestisida Produk Sayuran Segar di Kota Ambon. *Agrologia*, 1(2), 99–105.
- U. S. Environmental Protection Agency, "Introduction to Phytoremediation," National Risk Management Research Laboratory, EPA/600/R-99/107, 2000, <http://www.clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf>.
- U. S. Environmental Protection Agency, Use of Field-Scale Phytotechnology, for Chlorinated Solvents, Metals, Explosives, and Propellants, and Pesticides Phytotechnology Mechanisms. Solid Waste and Emergency Response (5102G), EPA 542-R-05-002, 2005, <http://www.clu-in.org/download/remed/542-r-05-002.pdf>.
- Udiyani, P.M. and Setiawan, M.B., 2003, December. Kajian terhadap pencemaran lingkungan di daerah pertanian berdasarkan data radioaktivitas alam. In *Prosiding pada Seminar Tahunan Pengawasan Pemanfaatan Tenaga Nuklir*, Jakarta (pp. 172-182).
- Untung, K. 2000. Pelembagaan konsep pengendalian hama terpadu di Indonesia. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia* 6(1): 1–8.

- Untung, K. 2006. Penerapan Pertanian Berkelanjutan untuk Meningkatkan Ketahanan Pangan. <http://kasumbogo.staff.ugm.ac.id/index.php>
- Untung, K. 1993. Pengantar Pengendalian Hama Terpadu. Yogyakarta. Universitas Gajah Mada. 273 hal.
- Vlaming, J. B. 2008. Quantifying Variation in Estimated Methane Emission from Ruminants Using the SF6 Tracer Fechnique. A Thesis of Doctor of Phylosophy in Animal Science.Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- Wahyuni, S., Harsanti, E. S., Jatmiko, S. Y., Poniman, Indratin, Sulaeman, E, dan Kurnia, A. 2012.Teknologi arang aktif yang diperkaya dengan microba pendegradasi senyawa POPs di lahan padi dan sayuran. Laporan Akhir Penelitian, Balai Penelitian Lingkungan Pertanian 55 hal
- Wahyuni, S., Harsanti, E. S., Jatmiko, S. Y., Poniman, Indratin, Sulaeman, E., Kurnia, A. 2011. Teknologi Pengkayaan Arang Aktif dengan Mikroba Pendegradasi Senyawa Pops. Laporan Akhir. Balai penelitian Lingkungan Pertanian. Pati.
- Wahyuni, S., Paradifan, Kurnia, A. dan Indratin. 2018. Pengaruh Pemberian Bacillus aryabhattai Terhadap Peningkatan Populasi Bakteri Penambat N simbiotik dan Peningkatan Produksi Tanaman Bawang Daun. Jurnal Litbang Provinsi Jawa Tengah 16(2): 211-218.
- Wahyuni, S., Sulaeman E., HARSanti ES., dan Ardiwinata AN. 2017. Teknologi zfilter Inlet Outlet (FIO) untuk Menurunkan Cemaran INsektisida Lindan, Heptaklor, dan Klorpirifos. Semnas BAPPEDA Provinsi Jawa Tengah
- Wahyuni, S. 2010. Perilaku Petani Bawang Merah dalam Penggunaan dan Penanganan Pestisida serta Dampaknya Terhadap Lingkungan (Studi Kasus di Desa Kemukten, Kecamatan Kersana, Kabupaten Brebes). Universitas Diponegoro.2010.
- Wahyunto, K Nugroho, Y Sulaeman, M T Sutriadi, D Kuntjoro, D Nursyamsi. 2017. Peta Lahan Gambut Indonesia Skala 1:250.000. Edisi 2017. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Kementrian Pertanian, Jakarta.

- Wassmann, R., H.U. Neue, J.K. Ladha, & M.S. Aulakh. 2004. Mitigating greenhouse gas emissions from rice and wheat cropping system in Asia. *Environment, Development and Sustainability* 6: 65-90.
- West TO, McBride AC. 2005. The contribution of agriculture lime to carbon dioxide emissions in the United States: dissolution, transport, and net emissions. *Agriculture Ecosystems and Environment* 108(2): 145-154.
- Wihardjaka, A, Tandjung, S. D., Sunarminto, B. H., Sugiharto, E. 2013. Indonesian Journal of Agricultural Science, Vol. 14 (2) :45-54
- Wihardjaka, A. 2011. Pengaruh Jerami Padi dan Bahan Penghambat Nitrifikasi terhadap Emisi Gas Rumah Kaca (Metana dan Dinitrogen Oksida) pada Ekosistem Sawah Tadah Hujan di Kabupaten Pati, Jawa Tengah. Disertasi. Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Wihardjaka, A. 2018. Penerapan model pertanian ramah lingkungan sebagai jaminan perbaikan kuantitas dan kualitas hasil tanaman pangan. *Pangan* 27(2): 155-164.
- Wihardjaka, A. 2018. Penerapan model pertanian ramah lingkungan sebagai jaminan perbaikan kuantitas dan kualitas hasil tanaman pangan. *Pangan* 27(2): 155 – 164.
- Wihardjaka, A. dan E. S. Harsanti. 2021. Dukungan pupuk organik untuk memperbaiki kualitas tanah pada pengelolaan padi sawah ramah lingkungan. *Pangan* 30(1): 53 – 64.
- Wihardjaka, A. dan P. Setyanto. 2014. Pertanian ramah lingkungan pada tanaman pangan. *Sains Indonesia* Edisi 31, Juli 2014. Hlm. 92-94.
- Wijaya, H., Arina, F. and Ferdinand, P.F., 2013. Identifikasi Sumber Pencemaran Permukaan Air Sungai Cidurian Menggunakan Analisis Multivariat. *Jurnal Teknik Industri Untirta*, 1(1).
- Wołejko, E., Jabłońska-Trypuć, A., Wydro, U., Butarewicz, A., & Łozowicka, B. (2020). Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides – A review. *Applied Soil Ecology*, 147(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.006>

- Wood S, Cowie A. 2004. A review of greenhouse gas emission factors for fertilizer production. Research and Development Division, State Forests of New South Wales. Cooperative Research Centre for Greenhouse gas Accounting. For IEA Bioenergy Task 38.
- World-Bank. 2006. Sustainable Land Management: Challenges, Opportunities, and Trade-offs. Washington, DC 20433. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank
- Wuana, R. A., dan Okieimen, F. E. 2011. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks, and best available strategies for remediation. *Int. Scholarly Research Network (ISRN) Ecology*, Vol 2011, Article ID 402647, 20 pages.
- Xie, H., Zhu, L., Ma, T., Wang, J., Wang, J., Su, J., dan Shao, B. 2010. Immobilization of an enzyme from a *Fusarium* fungus WZ-I for chlorpyrifos degradation. *J Environ Sci* 22(12):1930–1935. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60341-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60341-7)
- Xu, X., He, C., Yuan, X., Zhang, Q., Wang, S., Wang, B., Guo X., , dan Zhang, L. 2020. Rice straw biochar mitigated more N₂O emissions from fertilized paddy soil with higher water content than that derived from ex situ biowaste. *Environmental Pollution*. 263. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114477>
- Xu, X., Zhang, Z., Kuang, Y., Li, C., Sun, M., Zhang, L. and Chang, D., 2021. Waste pesticide bottles disposal in rural China: Policy constraints and smallholder farmers' behavior. *Journal of Cleaner Production*, 316, p.128385.
- Yagi, K, Sriphirrom, P., Cha-un, N., Fusuwankaya, K., Chidthaisong, A., Damen, B., dan Towprayoon, S. 2020. Potential and promisingness of technical options for mitigating greenhouse gas emissions from rice cultivation in Southeast Asian countries, *Soil Science and Plant Nutrition*, 66:1, 37-49, DOI: 10.1080/00380768.2019.1683890
- Yang, H, Yang P, Liu X, Wang Y. 2016. Space-confined synthesis of zeolite Beta microspheres via steam-assisted crystallization. *Chem Eng J* 299:112–119

- Yao, Z., Li, J., Xie, H., Yu, C., 2012. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals. *Procedia Environ. Sci.* 16, 722–729.
- Yatu, W., Syahfitri, N., dan Damastuti, E. 2011. Penentuan Logam Berat Cr , Co , Zn , dan Hg Pada Beras Dan Kedelai Dari Wilayah Kota Bandung. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Nuklir PTNBR*, 213–219.
- Zeeman, G. 1991. Mesophilic and psychrophilic digestion of liquid manure. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 116 pp.
- Zhang, J. K., Cheng, M.T., Ji, D. S., Liu, Z.R., Hu, B., Sun, Y., Wang, Y.S. 2016. Characterization of submicron particles during biomass burning and coal combustion periods in Beijing, China. *Sci. Total Environ.* 812 – 82.
- Zhang L., Song, C., Zheng, X., Wang, D dan Wang, Y. 2007. *Effects of nitrogen on the ecosystem respiration, CH₄ and N₂O emissions to the atmosphere from the freshwater marshes in Northeast China*. *Environ Geol.* 52: 529–539.
- Zhang, L., Liu, Y., Hao, L., Zhang, L., Liu, Y., Hao, L., 2016. Contributions of open crop straw burning emissions to PM_{2.5} concentrations in China. *Environ. Res. Lett.* 11 (1). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014014>.
- Zhang, Q., Xiao, J., Xue, J dan Zhang, L. 2020. Quantifying the Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils: A Global Meta-Analysis. *Sustainability.* 12. 3436.
- Zhang, X., Sheng, Z., Bi, J., Sun, H., Wang, C., dan Zhang, J. 2021. Drought-resistance rice variety with water-saving management reduces greenhouse gas emissions from paddies while maintaining rice yields. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 320.
- Zhao, X., Pu, C., Ma, S. T., Liu, S. L., Xue, J. F., Wang, X., & H. L. Zhang, 2019: Management-induced greenhouse gases emission mitigation in global rice production. *Science of the Total Environment*, 649
- Zhao, Y. Y. dan Pei, Y. S. 2012. Risk evaluation of groundwater pollution by pesticides in China: a short review. *Procedia Environmental Sciences*, 13, pp.1739-1747.

- Zheng, H., Wang, X., Chen, L., Wang, Z., Xia, Y., Zhang, Y., Wang, H., Luo, X., dan Xing, B. 2018. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation. *J. Plant, cell & environment*. 41(3): 517-532
- Zhou, J., Yang, Q., Lan, C., dan Ye, Z. 2010. Heavy metal uptake and extraction potential of two *Beckmannia nivea* (L.) Gaud. (Ramie) varieties associated with chemical Reagents. *Water Air Soil Pollution* 211: 359–366.
- Zu'amah, H., Hidayah, A., Ardiwinata A. N., Paputri D. M. W., Purbalisa, W. 2021. Remediation of arsenic-contaminated soil by chelating agents in shallot plantation land in Bima, West Nusa Tenggara. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 648.

GLOSSARIUM

Adsorpsi	= proses atau kemampuan suatu bahan untuk memegang atau mengonsentrasikan gas, cairan, atau zat terlarut pada permukaannya secara adhesif; penjerapan
Aerasi	= penambahan oksigen ke dalam air dengan memancarkan air atau melewatkan gelembung udara ke dalam air
Agroekosistem	= pertanian yang bersifat hubungan timbal balik antara sekelompok manusia (masyarakat) dan lingkungan fisik dari lingkungan hidupnya guna memungkinkan kelangsungan hidup kelompok manusia (masyarakat) itu
Agrokimia	= bahan kimia untuk pertanian, misalnya insektisida
Ampak	= Pembibitan tahap ke dua, setelah bibit berumur sekitar 40 hari, bibit dipindah lagi ke pembibitan ke tiga.
Ampak	= Pembibitan tahap ke dua, setelah bibit berumur sekitar 40 hari, bibit dipindah lagi ke pembibitan ke tiga.
Biomassa	= jumlah keseluruhan benda hidup dalam suatu perairan
Bioremediasi	Upaya perbaikan dengan melibatkan proses biologi
BMR Pestisida	= maksimum residu pestisida yang dapat diterima atau secara hukum diijinkan, dinyatakan dalam miligram residu pestisida per kilogram hasil pertanian
Cemaran	= yang menjadi cemar (rusak, tidak baik lagi); ternoda
Degradasi	= kemunduran, kemerosotan, penurunan, dan sebagainya (tentang mutu, moral, pangkat, dan sebagainya)
Dekomposer	= organisme (termasuk bakteri dan jamur) yang memecah senyawa kompleks protoplasma mati, menyerap beberapa produk dekomposisi, dan melepaskan unsur-unsur yang dapat dimanfaatkan oleh pengguna atau pemakainya
Dekomposisi	= Proses perombakan bahan organik, yang

	dilakukan oleh sejumlah organisme
Difusi	= Proses berpindahnya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah
Diversifikasi	= kemampuan memodifikasi pola pergerakan sesuai dengan karakteristik konteks lingkungan
Dosis	= takaran obat untuk sekali pakai (dimakan, diminum, disuntikkan, dan sebagainya) dalam jangka waktu tertentu:
Ekologi	= ilmu tentang hubungan timbal balik antara makhluk hidup dan (kondisi) alam sekitarnya (lingkungannya)
Endokrin	= bersekresi ke dalam tubuh, ke dalam darah atau limfa
Erosi	= Merupakan proses penghanyutan tanah oleh kekuatan air ataupun angin.
Fitoremediasi	= Perbaikan lahan dengan menggunakan Tumbuhan
GEE	= <i>Google Earth Engine</i> . Merupakan sebuah platform berbasis cloud untuk analisa data geospasial terutama data raster
Hama	= hewan yang mengganggu produksi pertanian seperti babi hutan, tupai, tikus, dan terutama serangga:
Hortikultura	= Kelompok tanaman yang terdiri dari komoditas sayuran, buah-buahan dan bunga
Indikator Pendorong	= Parameter yang fokusnya pada kondisi dimana intervensi perbaikan mungkin diperlukan untuk mencegah kerusakan lahan
Indikator Respon	= Parameter yang dicirikan dengan Tindakan yang dilakukan untuk kegiatan perlindungan lahan
Inovasi	= penemuan baru yang berbeda dari yang sudah ada atau yang sudah dikenal sebelumnya (gagasan, metode, atau alat)
Insektisida	= senyawa kimia yang digunakan untuk membunuh serangga (biasanya dengan mengusapkan atau menyemprotkannya); obat pembunuh serangga
Jajar legowo	= sistem pertanian ramah lingkungan yang menerapkan teknologi budidaya tanaman

	pangan terutama padi secara terpadu berbasis jarak tanam jajar legowo
Karsinogenik	= bersifat menyebabkan penyakit kanker
Kebakaran lahan	= Merupakan api yang tidak terkendali di daerah memiliki vegetasi yang mudah terbakar dan terjadi di daerah pedesaan
Kekeringan	= Merupakan keadaan kekurangan pasokan air pada suatu daerah dalam masa yang berkepanjangan (beberapa
Khelating	= bulan hingga bertahun-tahun) Reaksi antara suatu atom dengan suatu ligan membentuk senyawa kompleks
Konsentrasi	= pemusatan perhatian atau pikiran pada suatu hal;
Kontaminasi	= pengotoran; pencemaran (khususnya karena termasuk unsur luar)
Kronis	= berjangkit terus dalam waktu yang lama; menahun (tentang penyakit yang melanda diri seseorang) yang tidak sembuh-sembuh
Lacak	= Pembibitan tahap ke tiga. Lamanya bibit dipertahankan pada pembibitan ke tiga ini (lacakan) ini tergantung pada kedalaman air di sawah
Lahan rawa bongkor	= lahan gambut atau lahan sulfat masam yang telah terdegradasi atau mengalami penurunan kesuburan drastis sebagai akibat kesalahan pengelolaan dan faktor alami, sehingga terjadi penurunan produktivitas dan tidak sesuai lagi untuk pertumbuhan tanaman
Lahan rawa terdegradasi	= lahan pertanian yang produktivitasnya telah menurun dan bahkan kurang sesuai lagi untuk pertanian sehingga menjadi tidak produktif dan tidak dimanfaatkan lagi atau menjadi terlantar.
Lahan sulfat masam	= lahan yang memiliki horizon sulfidik dan atau sulfurik di dalam kedalaman 120 cm dari permukaan tanah mineral.
Lingkungan pertanian/agro-ekologi	= suatu pendekatan yang secara simultan menerapkan konsep ekologi dan sosial untuk merancang dan mengelola sistem pangan dan pertanian secara berkelanjutan yang mengoptimalkan interaksi berkelanjutan

	antara tanaman, hewan, manusia dan lingkungannya
<i>Mixed farming</i>	= usahatani yang dilakukan lebih dari jenis komoditas pada waktu yang bersamaan
NDVI	= <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> . Indeks yang menunjukkan tingkat kebasahan suatu area
NDWI	= <i>Normalized Difference Water Index</i> . Indeks kerapatan vegetasi, atau tingkat kehijauan tanaman
Oksidasi	= Reaksi dalam tanah yang menghasilkan ion hidrogen dapat menyebabkan terjadinya pengasaman tanah
Organik	= berkaitan dengan zat yang berasal dari makhluk hidup (hewan atau tumbuhan)
Organisme	= segala jenis makhluk hidup (tumbuhan, hewan, dan sebagainya); susunan yang bersistem dari berbagai bagian jasad hidup untuk suatu tujuan tertentu:
Pencucian	= Teknik memulihkan tanah yang tercemar, kembali ke kondisi awal atau semula. Sehingga tidak menyebabkan terjadinya penghantaran polutan ke media lain.
Pendekatan pengelolaan adaptif (<i>adaptive management approach</i>)	= suatu cara pengelolaan lahan rawa bongkor yang melibatkan semua pihak yang berperan dan berkepentingan untuk mengambil langkah secara bertanggungjawab mengatasi perubahan dengan lebih baik.
Pengelolaan tanaman terpadu (PTT)	= salah satu model pertanian ramah lingkungan yang mengintegrasikan berbagai komponen teknologi untuk meningkatkan produktivitas tanaman tanpa merusak lingkungan
Perkolasi	= perembesan air tanah ke arah bawah, biasanya terjadi ketika tanah dalam keadaan jenuh
Pertanian berkelanjutan	= pengelolaan dan konservasi pertanian berbasis sumberdaya alam, dan berorientasi pada perubahan teknologi dan kelembagaan yang sedemikian rupa untuk memastikan pencapaian dan melanjutkan pemenuhan kebutuhan manusia di masa kini dan generasi masa depan, dengan melestarikan tanah, air, sumberdaya genetik tumbuhan dan hewan, tidak merusak lingkungan, layak secara teknis, layak secara ekonomi dan dapat diterima

	secara social
Pertanian ramah iklim / climate smart agriculture	= sistem pertanian yang dapat mengurangi pengaruh dan dampak perubahan iklim dan meningkatkan produktivitas tanaman melalui upaya adaptasi dan mitigasi dengan dukungan inovasi teknologi pertanian
Pertanian ramah lingkungan	= upaya peningkatan produksi dan produktivitas tanaman pertanian dengan memperhatikan kelestarian lingkungan sebagai upaya dalam meningkatkan kesejahteraan masyarakat secara berkelanjutan
Pestisida	= zat yang beracun untuk membunuh hama; racun pembasmi hama; racun hama.
Pupuk	= penyubur tanaman yang ditambahkan ke tanah untuk menyediakan senyawaan unsur yang diperlukan oleh tanaman
QGIS	= Quantum GIS. Merupakan salah satu perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG) berbasis <i>open-source</i> yang dapat dijalankan dalam berbagai sistem operasi
Reklamasi lahan rawa	= upaya meningkatkan fungsi dan pemanfaatan rawa untuk kepentingan masyarakat luas
Remediasi	= tindakan atau proses penyembuhan
Residu	= ampas; endapan
Resistensi	= bentuk ketahanan
Resurgensi	= kebangkitan; (hal) bangkit lagi; (hal) timbul kembali
Retakan	= Renggangan pada tanah yang terjadi karena tekanan (shear/compression joints), biasanya terlihat paralel dengan gejala sesar dan karena tarikan (tension joints), biasanya berbentuk tidak teratur dengan bidang-bidang tidak rata dan selalu terbuka
Retensi	= penahanan terus-menerus zat dalam tubuh yang secara normal seharusnya dikeluarkan
RGB	= Metode komposit Red Green Blue (RGB) atau dikenal dengan " <i>true colour</i> " Metode ini untuk melihat kenampakan warna secara visual sehingga interpretasi terhadap citra satelit dapat relatif lebih mudah dilakukan
Rhizobium	= Bakteri yang berfungsi untuk pembentukan

	bintil akar pada tanaman kacang kacangan
Salinisasi	= Merupakan proses peningkatan kadar garam mudah larut di dalam tanah
Senyawa	= zat murni dan homogen yang terdiri atas dua unsur atau lebih yang berbeda dengan perbandingan tertentu, biasanya sifatnya sangat berbeda dari sifat unsur-unsurnya
Sistem integrasi tanaman-ternak nir limbah	= sistem pertanian ramah iklim tanpa limbah sebagai upaya peningkatan produktivitas tanaman dan ternak danantisipasi dampak perubahan iklim yang mensinergiskan teknologi adaptasi dan teknologi mitigasi emisi gas rumah kaca.
Skema relasi (<i>causal loops</i>)	= pendekatan dalam pemecahan masalah dengan melihat kompleksitas dari sistem yang digambarkan dengan sebuah diagram berupa garis lengkung yang berujung panah yang menghubungkan satu faktor dengan faktor lainnya
SPOT	= Satellites Pour l'Observation de la Terre. Merupakan satelit konstelasi yang digunakan untuk observasi bumi, menggunakan pencitraan optik dengan hasil resolusi tinggi
Swasembada	= usaha mencukupi kebutuhan sendiri (beras dan sebagainya);
Tandan	= Tangkai dengan kumpulan buah buah
Taradak	= Semai pertama. Menyemai benih yang dilakukan pada awal musim hujan, setelah bibit berumur sekitar 40 hari, bibit dipindah kepembibitan tahap kedua.
Teknologi	= metode ilmiah untuk mencapai tujuan praktis; ilmu pengetahuan terapan
Zona agroekologi (AEZ)	= hasil pengelompokan tanah, bentuk wilayah dan iklim dari suatu wilayah yang sangat membantu dalam pembangunan sistem pertanian suatu daerah

INDEKS

A

Adsorpsi 22, 23, 24, 129,
130, 135, 136, 137,
142, 149, 164
Aerasi 143, 151, 173
Agroekosistem 5, 85, 157,
178, 181
Agrokimia 7, 8, 13, 15,
17, 18, 75, 76, 78, 79,
80, 82, 84, 86, 87, 88,
92, 93, 94, 96, 103,
128
Akumulasi 82, 84, 86, 95,
96, 97, 103, 105, 120,
124, 160, 167, 168,
169, 170
Amelioran 123, 124
Aplikasi 18, 21, 33, 36,
40, 67, 68, 78, 79, 81,
82, 84, 93, 97, 103,
105, 123, 125, 126,
127, 133, 138, 140,
142, 143, 144, 147,
154, 155, 162, 164,
166, 170, 180, 183
Arang aktif 129, 130,
131, 137, 138, 139,
140, 141, 144, 146,
147, 153, 157, 163

B

Bacillus 84, 126, 130,
138, 141, 146, 147,
150, 151
Bakteri 33, 34, 68, 70, 71,
77, 84, 118, 119,

Bakteri 120, 121, 123,
126, 127, 130, 132,
138, 147, 149, 150,
151, 162, 165, 179
Bawang merah 79, 82,
83, 116, 151, 165
Belukar 37, 41
Beras 105, 128, 150, 163,
169
Bioaugmentasi 132
Biochar 124, 129, 141,
Biodiversitas 162
Biogas 115, 116, 158
Biologis 3, 10, 14, 75, 76,
77, 97, 146, 149, 182
Biomassa 21, 37, 41, 64,
65, 85, 87, 88, 120,
122, 142,
Biopestisida 150, 151,
152, 153, 154, 156,
158, 181
Bioremediasi 146, 147,
149, 150, 153, 160,
161
Biostimulasi 132
BMR 84, 87, 89, 98, 99,
101, 102, 103, 155
Butiran 76, 15, 119, 120,
121, 123, 126, 127,
130, 132, 138, 147,
149, 150, 151, 162,
165
Bakterisida 150

C

Carsinogen 92, 93

Cemaran 75, 78, 80, 82,
84, 87, 88, 96, 99,
103, 128, 130, 131,
132, 133, 137, 147,
152, 158, 154, 156,
157, 170, 178

D

Degradasi 1, 3, 4, 5, 7, 13,
14, 58, 78, 98, 108,
127, 131, 132, 133,
134, 138, 139, 141,
143, 146, 147, 149,
160, 167, 174, 175,
176, 181, 182
Dekomposer 138, 179
Difusi 34
Dosis 14, 66, 67, 80, 93,
94, 124, 139, 152,
153, 154, 156, 161,
163, 166
Drainase 35, 41, 42, 61,
111

E

Ekologi 3, 11, 12, 31, 155,
157, 159, 162, 171,
173, 174, 175, 176,
177, 180, 182
Ekonomi 2, 6, 9, 10, 11,
13, 14, 16, 17, 19,
27, 46, 55, 56, 80,
87, 107, 108, 111,
153, 155, 156, 171,
172, 173, 176, 177,
178, 179, 180, 184
Ekosistem 2, 5, 6, 8, 12,
22, 31, 41, 55, 58,
85, 108, 109, 117,
119, 158, 174, 176,

Ekosistem 77, 181, 182,
183, 184
Ekotoksikologi 78
Erosi 3, 38, 51, 78, 109,
168, 173, 174

F

Fitoremediasi 3, 38, 51,
78, 109, 168, 173,
174
Fungisida 76, 96, 97, 99,
100, 133, 150

G

Gambut 32, 33, 36, 41,
42, 57, 67, 18
Gangguan 27, 28, 29, 32,
36, 38, 77, 85, 88,
182
GEE 220, 223

H

Hama 11, 17, 27, 29, 30,
66, 77, 78, 79, 80,
82, 86, 87, 92, 94,
97, 98, 100, 103,
111, 112, 114, 151,
152, 153, 155, 158,
174, 180, 182
Herbisida 8, 76, 94, 96,
97, 99, 100, 133,
142
Hortikultura 29, 30, 87,
101, 102, 111, 171

I

Inovasi 8, 14, 19, 134,
140, 146, 173,
176, 177, 181, 182

Insektisida 18, 76, 83, 94,
96, 97, 98, 99, 100,
133, 137, 138,
144, 147, 148,
150, 152, 158

J

Jagung 28, 29, 64, 112,
116, 125, 137, 138,
149, 150, 162,
163, 165

K

Kajian 7, 19, 45, 46, 47,
51, 57, 132, 147,
151, 153, 154,
155, 157, 178

Kanker 84, 224

Karbamat 97, 102, 138,
187, 230

Karbon 4, 22, 33, 38, 40,
41, 44, 45, 47, 48,
50, 54, 56, 66, 115,
117, 119, 123,
125, 126, 138,
142, 144, 162,
179, 181

Karsinogenik 37, 224

Kekeringan 21, 26, 27,
29, 31, 51, 78, 92,
110, 111, 112,
114, 119, 121, 122

Kemasaman 179

Keracunan 17, 80, 84, 85,
87, 97, 158

Kesehatan 2, 3, 5, 8, 11,
15, 16, 31, 37, 38,
75, 76, 77, 85, 86,
87, 93, 95, 96, 97,
152, 154, 156,

Kesehatan 158, 160, 172,
173, 174, 175,
176, 177, 182,
183, 184

Kesuburan 1, 3, 8, 14, 77,
80, 85, 111, 117,
119, 130, 150,
175, 182, 183

Kimia 8, 11, 14, 16, 17,
18, 30, 41, 44, 75,
76, 77, 78, 79, 82,
84, 86, 87, 95, 97,
108, 111, 116,
127, 29, 131, 132,
148, 151, 153,
154, 156, 157,
158, 160, 161,
164, 165, 170, 174

Kompos 62, 147, 148,
149, 150, 154,
156, 162, 163,
164, 170, 172, 179

Konsentrasi 3, 14, 20,
22, 23, 24, 33, 37,
39, 43, 44, 48, 76,
82, 98, 100, 102,
103, 104, 105,
129, 133, 138,
139, 142, 144,
147, 148, 162,
163, 164, 165,
166, 168, 169

Kontaminasi 3, 80, 82,
83, 158, 160, 168

L

Lempung 129, 142

Lestari 157, 158, 184

Limbah 32, 33, 35, 40, 55,
62, 76, 78, 79, 81,
84, 85, 88, 95, 96,

Limbah 103, 104, 115,
116, 117, 129,
137, 139, 148,
149, 150, 157,
160, 162, 167,
168, 172, 173,
178, 179, 180,
181, 182

Lingkungan 1, 2, 3, 4, 5, 6,
7, 8, 9, 10, 11, 12,
13, 14, 15, 16, 17,
18, 19, 20, 29, 32,
34, 41, 42, 44, 49,
56, 66, 75, 77, 78,
80, 82, 84, 85, 87,
88, 92, 93, 94, 95,
96, 97, 98, 108,
109, 110, 111,
112, 114, 115,
119, 121, 128,
129, 131, 133,
134, 137, 140,
142, 143, 144,
147, 151, 152,
153, 155, 156,
157, 158, 159,
160, 161, 166,
167, 171, 172,
173, 174, 175,
176, 177, 178,
179, 180, 181,
182, 183, 184

M

Mikroba 36, 39, 40, 41,
68, 70, 71, 74, 76,
77, 84, 97,
130, 138, 139,
141, 143, 144,
146, 147, 160,
170, 179

Mikroorganisme 8, 18,
33, 36, 38, 39, 71,
79, 87, 123, 124,
135, 136, 146,
152, 163, 167,
170, 178

Model 11, 15, 68, 118,
183, 185

Moluskisida 98, 154

N

Nabati 150, 151, 152,
154, 152, 154,
157, 158, 179

Nanoteknologi 16, 134

Nematisida 150

Non carsinoge 89, 90, 91

O

Off farm 14

Oksidasi 33, 34, 35, 39,
41, 42, 68, 118,
119, 121, 126,
131

OPT 27, 82, 87, 114, 119,
150, 154, 156,
158, 174, 176,
179, 180

Organik 2, 3, 6, 7, 11, 12,
14, 15, 16, 28, 33,
34, 35, 38, 39, 40,
41, 58, 61, 62, 65,
66, 67, 68, 70, 71,
74, 76, 77, 78, 81,
86, 95, 96, 105,
115, 116, 117,
123, 125, 129,
131, 133, 142,
149, 150, 151,
152, 156, 160,

Organik 164, 165, 166,
167, 169, 173,
174, 175, 176,
178, 179, 180,
181, 182, 183
Organisme 5, 8, 12,
16, 18, 27, 32, 35,
36, 69, 76, 77, 84,
86, 97, 103, 114,
132, 142, 173,
176, 178, 179
Organofosfat 82, 83,
97, 98, 99, 101,
102, 138
Organoklorin 82, 83,
96, 98, 99, 100,
102, 127, 138,
140, 141, 147,
148

P

Pangan 1, 5, 6, 8, 9, 10,
11, 14, 15, 17, 19,
21, 26, 28, 30, 31,
40, 49, 55, 64, 75,
76, 80, 87, 92,
101, 107, 108,
109, 111, 112,
114, 117, 154,
160, 170, 171,
172, 174, 175,
176, 179, 180,
181, 182, 184
Patogen 32, 34, 112
Pencemaran 2, 5, 8, 15,
17, 34, 75, 78, 79,
80, 81, 82, 83, 84,
85, 86, 88, 92, 93,
95, 96, 97, 100,
101, 103, 104,
105, 106, 137,

Pencemaran 153, 155,
156, 158, 160,
165
Pencucian 35, 79, 101,
161, 162, 173
Pengatusan 41
Perkebunan 40, 41, 67,
99, 102, 115, 129,
171, 181
Perkolasi 150
Perspektif 17, 43
Photocatalysis 131
Photodegradation 131
Phytoremediadi 133
Piretroid 88, 97, 103
Pupuk 1, 2, 4, 5, 7, 8, 11,
12, 13, 14, 16, 17,
18, 19, 21, 34, 35,
36, 39, 40, 61, 62,
63, 68, 74, 76, 77,
78, 79, 80, 81, 83,
84, 85, 92, 93,
103, 104, 105,
114, 115, 116,
121, 123, 124,
140, 141, 144,
146, 147, 148,
149, 150, 151,
154, 156, 157,
160, 163, 165,
173, 174, 179,
180, 181, 188

R

Racun 41, 77, 81, 86, 97,
101, 152
Ramah 3, 11, 14, 17, 18,
87, 94, 109, 114,
115, 131, 133,
140, 151, 152,
155, 156, 157,

Ramah 158, 161, 166,
 171, 172, 173,
 177, 178, 179,
 180, 181, 182,
 183, 184
 Reduksi 29, 33, 35, 70,
 124, 126, 162,
 164
 Reklamasi 182
 Remediasi 127, 128, 129,
 30, 131, 133,
 134, 137, 138,
 142, 143, 144,
 147, 149, 150,
 153, 160, 161,
 162, 164, 166,
 167, 169, 170
 Residu 5, 17, 18, 21, 65,
 75, 76, 78, 79,
 82, 83, 87, 88,
 89, 92, 93, 96,
 97, 98, 99, 100,
 101, 102, 125,
 128, 129, 130,
 131, 132, 133,
 137, 138, 139,
 140, 141, 142,
 144, 146, 147,
 148, 150, 152,
 153, 154, 155,
 156, 157, 158
 Pestisida 88, 92, 93, 96,
 97, 98, 99, 100,
 101, 102, 128,
 129, 130, 131,
 132, 133, 137,
 138, 139, 140,
 141, 142, 144,
 146, 147, 150,
 153, 154, 155,
 156, 157, 158
 Resistensi 77, 158

Resistensi hama 80, 103,
 152
 Resurgensi 77
 Retensi 74, 143, 162
 Rhizosfer 34
 Rodentisida 96

S

Salinisasi 3
 Saluran 40, 41, 42, 101,
 104, 144
 Semak 37, 41
 Semprot 110, 140, 152
 Senyawa 63, 70, 74, 75,
 81, 82, 83, 85,
 96, 97, 98, 99,
 100, 101, 127,
 132, 139, 146,
 152, 167, 179
 Serasi 11, 184
 Sintesis 36
 Sosial 6, 9, 10, 11, 12, 27,
 55, 56, 80, 87,
 107, 108, 153,
 154, 155, 173,
 175, 176, 177,
 184
 Spasial 16
 Suboptimal 109
 Sulfat masam 67, 109
 Swasembada 112, 128

T

Teknologi 3, 7, 8, 11, 13,
 14, 17, 18, 19,
 45, 87, 88, 107,
 108, 109, 110,
 111, 113, 114,
 116, 117, 126,
 128, 129, 133,

Teknologi 134, 137, 140,
146, 149, 153,
154, 155, 156,
157, 158, 160,
162, 166, 167,
168, 169, 172,
173, 174, 177,
179, 180, 181,
182, 183
Tempurung 137, 138,
141, 149, 162
Tepung 28, 140
Toksikologi 78
Tongkol 137, 138, 149,
150, 162, 163

Z

Zeolit 130, 141, 164, 165
Zigzag 146

BIOGRAFI PENULIS



Wahida Annisa Y. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lambung Mangkurat (1999), S2 dalam bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (2010), dan S3 bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (2014). Saat ini menjabat Kepala Balai Penelitian Lingkungan Pertanian (Balingtan).

Penulis menjadi peneliti Ahli Madya pada Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi sejak tahun 2018 -2021. Kemudian menjadi Ketua Kelompok Peneliti Pemulihan dan Mikrobiologi Rawa tahun 2020-2021. Ditugaskan sebagai penanggung jawab rencana penelitian tim peneliti (RPTP) pada tahun 2015-2021. Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) Basic Training Course CO₂ Emission Estimation From Peatland. in Central Kalimantan (Penyelenggara IJ Redd+ Project JICA) tahun 2015; 2) Advance Training Course GHG Emission Estimation From Peatland in Central Kalimantan (Penyelenggara IJ Redd+ Project JICA) tahun 2015; 3) Workshop peningkatan Kapasitas Negosiasi dan Diplomasi (Penyelenggara: Pusat Pendidikan dan pelatihan KEMENLU, Balitbangtan, tahun 2015; (4) The International Course On Climate Change and Food Security Nexus in Wageningen, The Nethederland (Penyelenggara: CDI, Wageningen), Tahun 2016; (5). Sebagai nara sumber pada seminar (1) Seminar Nasional " Soil Collaboration Fair 2017" dengan Topik Pertanian Presisi Sebagai upaya Penunjang Kedaulatan Pangan Indonesia, UGM Yogyakarta, 21 Oktober 2017; (2) Seminar "Bamboo for Biochar" dengan judul Peran Biochar Di Lahan Rawa Pasang Surut, UGM Yogyakarta 15 Maret 2019; (3) Seminar Nasional hari Pangan Sedunia (HPS Ke-38) dengan Topik: "Pengelolaan Lahan Rawa Untuk Produksi Pangan, Gedung Idham Chalid Banjarbaru, 17 Oktober 2019; (4) Workshop on the use rock phosphate to increase soil fertility and crop productivity (Penyelenggara OCP SA and IAARD), Tahun 2019. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.
Email: annisabalitra77@gmail.com



Helena Lina Susilawati. Menyelesaikan S1 dari jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Sebelas Maret, Surakarta pada tahun 2002 dan melanjutkan pendidikan S3 dari Department of Environmental Horticulture, Graduate School of Horticulture, Chiba University, Japan dan selesai tahun 2016. Saat ini sebagai peneliti Ahli Madya pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Menjadi penanggung jawab Laboratorium Gas Rumah Kaca pada tahun 2007. Ketua Kelompok Peneliti Emisi dan Absorpsi Gas Rumah Kaca tahun 2008-2011. Ditugaskan sebagai penanggung jawab rencana penelitian tim peneliti (RPTP) pada tahun 2009-2021. Tahun 2005 mengikuti pelatihan Klasifikasi Tanah di Pati, Jawa Tengah. Pada tahun 2007, mengikuti pelatihan Analisis Logam Berat dan Residu Agrokimia. Sebagai delegasi yang mewakili kegiatan Field Measurements of Greenhouse Gas Emissions (CH_4 , N_2O) from Direct Seeded Rice in Central Java di Vientiane Laos pada tahun 2011. Pada tahun 2013, mengikuti GHG Inventories in Asia (WGIA11) di Tsukuba, Jepang. Pada tahun 2016, mengikuti pelatihan Climate Change and Food Security Nexus 2 dengan penyelenggara CDI-Wageningen University di Wageningen, Belanda dan pelatihan editing kreatif di Cisarua, Bogor. Pada tahun 2017, mengikuti Improvement of N_2O Emission Factor from Nitrous Oxide from Agriculture Soil Management yang diselenggarakan oleh USAID di Hyderabad, India dan pelatihan karya tulis ilmiah internasional di Sentul, Bogor. Pada tahun 2018, mengikuti Rice Landscape and Climate Change yang diselenggarakan oleh APEC di Bangkok, Thailand. Pada tahun 2019, mengikuti establishing Climate Smart Villages in ASEAN Region to Improve Food Security and Resiliency in Local Community yang diselenggarakan oleh CCAFS SEA di Los Banos, Filipina. Pada tahun 2020, mengikuti training on the Introduction and Usage of Tools/Methods to Develop and Improve the Quality and Evaluation of the National Greenhouse Gas Inventories yang diselenggarakan oleh CCROM SEAP-IPB dan Pemerintah Belanda dilakukan secara online. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.

Email: helenalina_s@yahoo.com



Anicetus Wihardjaka dilahirkan di Padang Panjang, tanggal 17 April 1964. Penulis menyelesaikan S1 dari Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada Yogyakarta tahun 1990, S2 dari Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor tahun 2001, dan S3 dari Sekolah Pasca Sarjana Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Gadjah Mada tahun 2011. Hingga sekarang, penulis adalah peneliti utama di Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, dengan bidang penelitian ilmu tanah dan lingkungan pertanian.

Penulis pernah menjabat sebagai Pimpinan Bagian Proyek Litbang Sumberdaya Lingkungan (sejak Januari 2003- 2005), asisten peneliti pada Lembaga Penelitian Padi Internasional (IRRI) pada tahun 1990 – 1992, penanggungjawab penelitian kerja sama antara Arcadia-UC Davis-BB BIOGEN tahun 2013-2017, menjadi anggota tim lingkungan Kementerian Pertanian tahun 2019- 2020, menjadi pengurus organisasi ilmiah Perhimpunan Agronomi Indonesia (PERAGI) komda Jawa Tengah tahun 2018 s.d. sekarang, menjadi pengurus Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO) komda Jawa Tengah tahun 2019 s.d. sekarang, kemudian menjadi Koordinator Program pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian sejak tahun 2013 – 2021. Pelatihan yang pernah diikuti di antaranya Expert Dialogue Workshop yang diselenggarakan oleh DCCCEE di Australia pada tahun 2013, pelatihan Ahli Pengadaan Nasional tahun 2012, Data Managemnet Course tahun 2001, Researcher Links Climate Challenge (RLCC) Workshop di Thailand tahun 2017, SRINM Course di Philipina, dan INSURF Course di Philipina tahun 1991. Penulis mendapatkan tanda kehormatan SATYA LENCANA KARYA SATYA XX pada tahun 2016. Penulis juga menjadi penelaah dan penyunting pada jurnal nasional maupun internasional. Beberapa hasil penelitian telah dipublikasikan ke dalam Prosiding dan Jurnal baik nasional maupun internasional.

Email: a_wihardjaka@yahoo.co.id



Elisabeth Srihayu Harsanti. Menyelesaikan S1 pada jurusan Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (1994), S2 dalam program studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada (2008), dan S3 program studi Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia (2017). Saat ini sebagai peneliti Ahli Madya pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi; **Bidang Penelitian Ilmu Lingkungan dan Pencemaran Sumberdaya Lahan.**

Menjadi Ketua Kelompok Peneliti Evaluasi dan Pengendalian Pencemaran Pertanian di Balai Penelitian Lingkungan Pertanian tahun 2017 hingga sekarang. Mengikuti training Analisis residu pestisida di Laboratorium Analisis Residu di Cimanggu Bogor (2003); Magang analisis tanah di Laboratorium Balittanah (2010); On Job-training di International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Filipina (Februari – Mei 2012).

Short Training “Botanical Pesticides: Plant extraction method and evaluation of the effect on pest insect” in Queensland University, Australia (6-10 August 2018); Delegasi RI pada Sidang Codex Committee on Pesticide Residue CCPR51 di Macau, China (8-13 April 2019). Pernah menjadi narasumber, (1) Workshop Hortikultura Ramah Lingkungan dengan di Ditjen Hortikultura dengan topik “Penggunaan Pestisida: Kondisi saat ini dan Dampak Penggunaan Pestisida terhadap manusia dan Lingkungan” , (2) Narasumber Seminar Nasional IPA XI di UNNES dengan topic “Dukungan Inovasi Ramah Lingkungan dalam Pembelajaran IPA di Masa Pandemi”. Dan (3) Seminar Daring Seri #12 di SIL Universitas Indonesia dengan topik “Inovasi Tanaman Pangan Keluarga dalam Masa Pandemi”. Pernah terlibat Penelitian kerjasama, “Mitigation of Pesticide Residue Through Promotion Use of Biopesticide” (Penelitian Kerjasama APAARI-Litbang Pertanian, 2021); dan penanggungjawab kegiatan Penelitian kerjasama Balingtan-PT TJS (2019). Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik nasional maupun Internasional.

Email: esharsanti@gmail.com



Terry Ayu Adriany. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Mikrobiologi, Fakultas Biologi, Universitas Jenderal Soedirman (2009). Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian dengan bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi. Menjadi anggota 1) Kelompok Peneliti Emisi dan Absorpsi Gas Rumah Kaca tahun 2011 sampai sekarang;

2) Kegiatan kerjasama penelitian dengan National Agriculture and Food Research Organization (NARO) pada kegiatan MIRSA-3 dengan judul penelitian Development of comprehensive rice cultivation technologies that reduce greenhouse emissions in asia pada tahun 2019-2021; 3) Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO) pada tahun 2019 sampai sekarang; 3) Ditugaskan sebagai penanggung jawab rencana operasional penelitian pertanian (ROPP) pada tahun 2018-2021.

Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) The Rice Landscapes and Climate Change workshop 10-12 Oktober 2018 dengan penyelenggara kegiatan Food and Agriculture Organisation of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific; 2) Regional Workshop on Improvement and Development of Methane Emission Factor from Rice Cultivation, Pati, 1-4 Februari 2016, penyelenggara United States Agency of International Development (USAID). Menghadiri seminar internasional dan nasional: 1) Seminar Internasional 1st International Conference on Sustainable Tropical and Management; Virtual, 16-18 September 2020, Oral Presenter, penyelenggara Indonesian Center of Agricultural Land Resource Research and Development; 2) Seminar Nasional Hasil Penelitian Pertanian XI Penguatan penelitian dalam rangka mendukung implementasi Smart Eco Bio-Production, penyelenggaraan Universitas Gadjah Mada; Telah menghasilkan publikasi pada prosiding dan jurnal ilmiah baik internasional maupun nasional.

Email: terry_jaa@yahoo.com



Miranti Ariani. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Sosek Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sebelas Maret (2002), S2 dalam bidang studi Pengelolaan Sumberdaya Alam & Lingkungan, IPB University (2014), dan S3 bidang studi Ilmu Lingkungan, Universitas Gadjah Mada (sedang berjalan). Saat ini sebagai peneliti Ahli Madya pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian Lahan Rawa bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Pernah bertugas sebagai : 1) Penanggung jawab rencana operasional penelitian tim peneliti (ROPP) pada tahun 2013-2018; 2) Anggota tim Perubahan Iklim Kementerian Pertanian 2012-2018; 3) Fasilitator/narasumber Rencana Aksi Daerah GRK 2013-2018 (Bappenas); 4) Anggota Komite penyusunan ISO 14080 2015-2018 (BSN); 5) Narasumber Bimtek Perkebunan Rendah Emisi yang diselenggarakan oleh Ditjen Hortikultura 2015 6) Narasumber seminar Nasional Hasil-hasil Penelitian Pascasarjana, UNDIP, Semarang 21 November 2017; 7) Narasumber Lokakarya Penyampaian Hasil dan Pembelajaran Proses Peningkatan Kapasitas Lokal dalam Penyusunan Rencana Aksi Mitigasi Menuju Ekonomi Hijau di Propinsi Jawa Tengah, Semarang 27 Oktober 2017; 8) Narasumber dalam Regional Meeting on Convening Private Sector Investment in Climate - Smart Commodity Production in South East Asia, Bangkok, 21-22 Maret 2017; 9) Narasumber pada Regional Workshop "*Climate Action for Agriculture in Asia: Strengthening the role of scientific foresight and Climate-Smart Agriculture in addressing NDC priorities*" Bangkok, Thailand 10-12 October 2017. Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) Low carbon agriculture and emission reduction di Beijing, China (2011); 2) IPCC 2006 GHG Inventory, Singapore (2014) oleh IPCC; 3) Workshop on Improvement and Development of emission factor for N₂O from Agricultural Soil Management. Hyderabad, India (2016) oleh UNDP; 4) Workshop on Incorporating Mangroves into National GHG Inventory, Siem Reap, Cambodia (2016) oleh UNDP; 5) Workshop on Improvement and Development of CH₄ emission factor from rice cultivation, Pati, Indonesia (2016) oleh UNDP; 6) Workshop on Climate Risk Management/Loss & Damage oleh GIZ di UGM (2019). Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.

Email: miranti_ariani@yahoo.com



Triyani Dewi. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (2003), S2 dalam bidang studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (PSL), Institut Pertanian Bogor (2012), dan S3 bidang studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada (2021). Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Pernah mengikuti pelatihan/pertemuan : 1). Agricultural Courses on The Development of Tropical Wheat tahun 2012 di Salatiga (Penyelenggara UKSW Salatiga) 2). Workshop on Phytotechnologies as Remediation for Contaminated Sites tahun 2012 di Taiwan (Penyelenggara Taiwan Environmental Protection Administration); 3). Workshop Penyiapan Karya Tulis Ilmiah untuk Jurnal Internasional tahun 2013 di Bandung dan Bogor (Penyelenggara Pusat Perpustakaan dan Penyebaran Teknologi Pertanian, Kementerian Pertanian); 4). Magang “Ketidakpastian Pengukuran dalam ISO 17025: 2005” tahun 2013 di Yogyakarta (Penyelenggara Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu, UGM); 5). Anggota DELRI pada sidang Codex Committee on Contaminants in Foods (CCCF) ke-8 tahun 2014 di Hague, Netherland; 6). 4th Annual Review & Planning Meeting Climate Change Adaptation in Rainfed Rice Areas (CCARA) tahun 2014 di Vientiane, Laos (Penyelenggara International Rice Research Institute); 7). Pelatihan Corrective Action - Preventive Action (CAPA) for Laboratory & Services tahun 2014 di Jakarta; 8). Anggota DELRI pada sidang Codex Committee on Contaminants in Foods (CCCF) ke-9 tahun 2015 di New Delhi, India; 9). Training on Quality Assurance of Testing Data tahun 2015 di Bandung (Penyelenggara RC Chem Learning Centre); 10) 1st Annual Review and Planning Meeting for CCADS-RR tahun 2016 di Bogor (Penyelenggara International Rice Research Institute); 11). Sebagai narasumber pada Kegiatan Mentan Sapa Petani dan Penyuluh Pertanian (MSPP) Volume 43 secara virtual tanggal 19 November 2021 (Penyelenggara Badan Penyuluhan dan Pengembangan SDM Pertanian). Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/ Jurnal baik Nasional maupun Internasional.
Email: triyanidewi@yahoo.com.



Rina Kartikawati. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Pemuliaan Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya (2005), S2 dalam bidang *Environmental Resources* at Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Japan (2015), dan sedang menempuh pendidikan S3 bidang studi Doktor Ilmu Pertanian dengan Peminatan Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Penulis menjadi bagian dari Balai Penelitian Lingkungan Pertanian pada tahun 2006 dan menjadi Peneliti Ahli Pertama pada tahun 2010. Penulis diberikan tugas sebagai penanggung jawab rencana operasional penelitian pertanian (ROPP) pada tahun 2008 – 2012 dan tahun 2016-2017. Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) *Agricultural Environment Controlling Technologies for Developing Countries* (2012); 2) *Regional workshop on improvement and development of emission factor for methane from rice cultivation* (2016); 3) *Advanced Training Workshop of Korea RDA Alumni Association* (2017). Pernah mengikuti seminar nasional dan internasional: 1) Seminar Nasional Lembaga Penelitian Islam Riau (2017); 2) Seminar Nasional UNS (2017); 3) Seminar Nasional Balai Besar Penelitian Tanaman Padi; 4) *The third International Conference of the East and Southeast Asia Federation of Soil Science Societies (ESAFS)* (2017); 5) *International Seminar of PERIPI* (2017); 6) *International Workshop and Seminar: Innovative Environment Friendly Technology and Sustainable Food Self-Sufficiency* (2018); 7) *The 5th International Seminar on Sciences* (by the Faculty of Mathematic and Natural Sciences-IPB) (2019); 8) *1st International Conference on Sustainable Tropical Land Management* (2020). Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding baik Internasional maupun Nasional dan Jurnal Nasional.
Email: rinak_jaeri@yahoo.com



Ali Pramono. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Mikrobiologi, Jurusan Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (1998), S2 dalam bidang studi Bioteknologi, Fakultas Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada (2011). Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Menjadi Ketua Kelompok Peneliti Emisi dan Absorpsi Gas Rumah Kaca pada tahun 2013 sampai sekarang. Ditugaskan sebagai penanggungjawab rencana operasional penelitian tim peneliti (ROPP) pada tahun 2013-2021. Pernah mengikuti pelatihan/kursus : 1) Training on WeRise, a Seasonal weather forecast-based decision support system for intensifying rainfed rice production in Southeast Asia di Filipina, tahun 2015; 2) Training on Green Agricultural Cultivation and Management di Taiwan, tahun 2016; 3) Training Sustainable Agriculture based on Sufficiency Economy Philosophy di Thailand, tahun 2018; 4) Online Training on the Introduction and Usage of Tools/Methods to Develop and Improve the Quality and Evaluation of the National Greenhouse Gas Inventories" tahun 2020; 5) Training Penggunaan 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories untuk Pengembangan Sistem Inventarisasi Gas Rumah Kaca, tahun 2021; 6) The Agricultural S&T (Green Rice) Professionals Workshop for BRI Countries in Southeast Asia secara online, tahun 2021. Sebagai narasumber pada Workshop Rice Landscapes and Climate Change di Bangkok, tahun 2018. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.

Email: ali_pramono@yahoo.com.



Asep Kurnia. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Hama Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran (2000), S2 dalam bidang studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Gifu University, Jepang (2016). Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi. Bidang Penelitian Pencemaran Lingkungan. Ditugaskan sebagai penanggung jawab rencana penelitian tim peneliti (RPTP) pada tahun 2017-2021.

Manajer Teknis Laboratorium 2017-Sekarang. Delegasi Republik Indonesia pada Codex Committe for Pesticides Residue Meeting ke 52 Tahun 2021. Delegasi Republik Indonesia pada ASEAN EWG MRLs 25-26 Tahun 2021 dan 2022. Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) Short Training Course on Plant Extraction Methodologies Australia, 2018; 2) South East Asia Laboratory Network (SEALNET) Workshop, Bogor, 2017 3) Marco Satelite Symposium NIAES, Jepang, 2012 (4) Pelatihan analisis residu pestisida dan logam berat, Pati 2007 (5) Pelatihan operasional GC dan AAS, Pati, 2007. (6) Pelatihan operasional HPLC, Jakarta, 2011. (7) Pelatihan operasional GC-MS Pati, 2018. (8) Sosialisasi ISO/IEC 17025:2017, Pati, 2019. Sebagai nara sumber pada acara (1) Sharing invaluable insights and inspirations to the students and teachers with the topic "Should farmers use chemical pesticides without considering their consumer health and environmental impact to increase agricultural productivity?" Online, 2021. (2) FGD Dalam rangka pelaksanaan proyek WIPO GREEN Acceleration Project, Online, 2021 (3) Bimbingan Teknis dalam rangka World soil day, dengan tema "Tanah sehat demi terwujudnya pertanian berkelanjutan", online, 2020. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.
Email: ase_p_balingtan@yahoo.co.id



Poniman. Menyelesaikan S1 pada bidang Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Muria Kudus (1999), S2 dalam bidang Management Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Universitas Diponegoro Semarang (2021). Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian. Tergabung ke dalam kelompok peneliti Evaluasi dan Pengendalian Pencemaran Pertanian.

Menghasilkan dua patent dan dua lainnya dalam proses serta satu varietas unggul tahan kekeringan. Dalam dua tahun terakhir yang bersangkutan mengikuti beberapa pertemuan ilmiah dalam negeri, yaitu: (1) Seminar “Lahan Suboptimal ke-8 Tahun 2020”, Palembang, 20 Oktober 2020, (2) Seminar Nasional “Perhorti 2020”, Malang, 17 November 2020; (3) Seminar Nasional Dies Natalis Dua Dasawarsa Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, 2 Desember 2020. Adapun pertemuan ilmiah Internasional antara lain: (1) on 1st International Conference on Sustainable Tropical Land Management Indonesian Centre for Agricultural Land Resources Research and Development, Bogor September 16-18, 2020; (2) International Conference 2020 of “The 1st Academic International Conference on Literacy and Novelty” Universitas Muria Kudus on November 25, 2020; (3) “6th International Conference on Energy, Environment, Epidemiology and Information System” (6th ICENIS 2021), School of Postgraduate Studies Diponegoro University. Semarang on August 4th – 5th, 2021. Telah menghasilkan publikasi dan terbit pada Prosiding Nasional dan Internasional, serta jurnal Nasional.

Email: poniman63ir@gmail.com



Wahyu Purbalisa. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman (2002). Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi. Menjadi Anggota Kelompok Peneliti Evaluasi dan Pengendalian Pencemaran Pertanian tahun 2010 sampai sekarang.

Ditugaskan sebagai penanggung jawab Rencana Operasional Penelitian Pertanian (ROPP) tim peneliti pada tahun 2015, 2018-2021. Pernah mengikuti pelatihan/kursus : 1) Bimbingan Teknis Teknologi Pertanian Ramah Lingkungan (Penyelenggara Balingtan) tahun 2018, 2) Crop Management Skills for Indonesian Researcher and Extension Agents (Penyelenggara BB Padi-IRRI) tahun 2014, 3) Basic Agronomi Trough Evaluating Nutrient and Water Use Efficiency of High Yielding Crop Varieties (IRRI) tahun 2013. Sebagai pemrasaran pada (1) Seminar Internasional " First International Conference on Sustainable Tropical Land Management 2020", (2) Seminar International "International Conference on Biology and Aplied Science 2018" , (3) International Workshop and Seminar "Innovation of Environmental Friendly Pesticide to Support Food Self Suffiency 2017", (4) Seminar Nasional "Pendidikan Biologi dan Saintek 2017", (5) Seminar Nasional Perhimpunan Hortikultura Indonesia Tahun 2015, (6) Seminar Nasional Pangan 2015, (7) Seminar Nasional "Sistem Informasi dan Pemetaan Sumberdaya Lahan Mendukung Swasembada Pangan 2015", (8) Seminar Nasional "Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan 2014". Sebagai Delegasi pada acara "The Fourth International Rice Congress di Bangkok, Thailand Tahun 2014. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional. Email: purbalisa@gmail.com



Sukarjo. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada (1997), S2 dalam bidang studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada (2007). Saat ini sebagai peneliti Ahli Madya pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Menjadi Anggota Kelompok Peneliti Evaluasi dan Pengendalian Pencemaran Pertanian tahun 2013 sampai sekarang. Ditugaskan sebagai penanggung jawab rencana penelitian tim peneliti (RPTP) pada tahun 2015-2021. Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) FAO-OSU Training Course on Planning and Implementing Sustainable IPM System. in OSU-Oregon, USA tahun 2013; 2) International Training on Digital Soil Property Mapping and Map Delivery, Kementan Soil Partnership, FAO tahun 2019. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.

Email: sukarjo@gmail.com



Ika Ferry Y. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sebelas Maret (2007) dan S2 pada bidang studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada (2022). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama di Balai Penelitian Lingkungan Pertanian dengan bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) Regional Workshop on Improvement and Development of Emission Factor for Methan from Rice Cultivation. Indonesia 2016. 2) Bimbingan Teknis Teknologi Pertanian Ramah Lingkungan 2018. 3) International Workshop and Seminar on Ecofriendly Technology and Sustainable Food Self-Sufficiency Indonesia 2018.

Email: ikkaferri@yahoo.co.id



Nourma Al Viandari. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Ilmu Tanah, Agroteknologi Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran (2016). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian dengan bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi. Menjadi anggota Kelompok Peneliti Emisi dan Adsorpsi Gas Rumah Kaca.

Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) sebagai peserta pada “2022 Weekend Program” (Diseleenggarakan oleh Department of Animal Science, National Chung Hsing University, Taiwan), 2) sebagai peserta pada Bimbingan Teknis Online Tanaman Jeruk dan Buah Subtropika (Diselenggarakan oleh Balitjestro 2020), 3) sebagai peserta pada Research Writing and Publication Workshop Series 2020 (Diselenggarakan oleh Elsevier). Telah menghasilkan beberapa publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.
Email: nourma.al.viandari@gmail.com



Eni Yulianingsih. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sebelas Maret (2001) dan S2 dalam bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (2004). Saat ini sebagai peneliti Ahli Muda pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi. Menjadi Ketua Kelompok Peneliti Emisi dan Absorpsi Gas Rumah Kaca tahun 2018. Menjadi Ketua Kelompok Peneliti Emisi dan Absorpsi Gas Rumah Kaca tahun 2018.

Ditugaskan sebagai penanggung jawab rencana operasional penelitian tingkat peneliti (ROPP) pada tahun 2014-2016. Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) Workshop Rice Technology Transfer System tahun 2015 di Jeonju Korea Selatan; 2). Sebagai nara sumber pada bimbingan teknis (1) Pembuatan Pupuk Organik Cair Di Desa Bulumulyo Kecamatan Juwana Kabupaten Pati tahun 2021, 2) Pengambilan sampel Gas Rumah Kaca di Budiya Tanaman Perkebunan Ramah Lingkungan tanggal 22-23 Maret 2022 di Jombang. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal nasional.
Email: enyulianingsih@gmail.com



Ina Zulaehah. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Sebelas Maret Surakarta (2005), S2 dalam bidang studi *Plant Genetic Resources Conservation and Management*. Fakultas Pertanian, Universitas the Philippines of Los Banos (2010). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Menjadi Sekretaris Kelompok Peneliti Evaluasi dan Pengendalian Pencemaran Pertanian tahun 2020 sampai sekarang. Pernah mengikuti pelatihan/kursus : 1) Communication Skills Development Courses, IRRI tahun 2010; 2) Workshop Pengendalian Hama Terpadu pada Tanaman Tebu Guna Mendukung Kinerja Industri Gula yang Tangguh, tahun 2011; 3) Bimbingan Teknis Pengelolaan Biopestisida Ramah Lingkungan, tahun 2016; 4) Bimbingan Teknis Teknologi Pertanian Ramah Lingkungan, tahun 2018; 5) Bimbingan Teknis Pengujian Residu Pestisida, Tahun 2019; 6) Training "Promoting Livelihood and Food Security Through Diversified Farming Practices Using Integrated System and Participatory Approaches", Tahun 2019. Email: izul_tbn@yahoo.com



Elga Riesta Puteri. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Kimia, Universitas Negeri Yogyakarta (2017). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan dan menjadi anggota Kelompok Peneliti Evaluasi Penanggulangan Pencemaran Pertanian (EP3). Diterima sebagai CPNS di Balai Penelitian Lingkungan Pertanian pada tahun 2018 dan aktif mengikuti kegiatan kelompok peneliti EP3 serta anggota tim diseminasi.

Pernah mengikuti (1) Orientasi CPNS di Balai Penelitian Lahan Rawa, Banjarbaru, Kalimantan Selatan (2018), (2) Detasir program SERASI (Selamatkan Rawa Sejahterakan Petani) Kementerian Pertanian (2019) di Kecamatan Kayu Agung, Kabupaten Ogan Komering Ilir, Sumatera Selatan. Penerima *full-funded ASEAN and NON-ASEAN scholarship* untuk program M.Sc. (S2) di Chulalongkorn University, Thailand (2020) dan mengambil jurusan *Hazardous Substance and Environmental Management*. Email: elga.riesta@gmail.com



Dolty Mellyga Wangga Paputri. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Kartografi dan Penginderaan Jauh, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada (2011). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) International Training on Digital Soil Property Mapping and Information Delivery (Penyelenggara Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian + Food and Agriculture Organization of the United Nations) tahun 2019 Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.

Email: dolty.mellyga@gmail.com



Sarah. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (UGM) pada tahun 2017. Saat ini sedang menempuh program Magister di Universitas Diponegoro (UNDIP). Penulis adalah peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) Pelatihan Pengoprasian FTIR; 2) Pelatihan Pengoprasian GCMS. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal Nasional.

Email: sarahbalingtan@gmail.com



Siska Apriyani. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu (2009) dan S2 dalam bidang studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu (2017). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Penulis ditugaskan sebagai anggota penelitian rencana penelitian tim peneliti (RPTP) pada tahun 2020-2021 dan sebagai penanggung jawab Rencana Operasional Pelaksanaan Penelitian (ROPP) pada tahun 2021. Hingga saat ini aktif tergabung dalam kelti Evaluasi dan Pengendalian Pencemaran Pertanian (EP3), Balingtan. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.

Email: apriyanisiska86@gmail.com



Cicik Oktasari H. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Pembangunan Wilayah, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada (2008), S2 dalam bidang studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada (2021). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi. Saat ini menjadi anggota Kelompok Peneliti Evaluasi dan Penanggulangan Pencemaran Pertanian.

Pernah mengikuti pelatihan/kursus : 1) Pelatihan Audit Mutu Internal ISO 9001:2015 tahun 2018; 2) Pelatihan teknologi pertanian ramah lingkungan tahun 2018. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal Nasional.

Email: cicik.oktasari@gmail.com



Hesti Yulianingrum. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor (2012). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Menjadi anggota Kelompok Peneliti Emisi dan Absorpsi Gas Rumah Kaca tahun 2016 sampai sekarang. Pernah mengikuti pelatihan/kursus: 1) Regional Workshop on Improvement and Development of Methane Emission Factor from Rice (Penyelenggara USAID + IAERI) Tahun 2016. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding / Jurnal baik Internasional maupun Nasional.
Email: hestiyulianingrum@gmail.com



Ria Fauriah M. Menyelesaikan S1 pada program studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin (2014) dan S2 pada program studi Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin (2021). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Menjadi Anggota Kelompok Peneliti Evaluasi dan Penanggulangan Pencemaran Lingkungan Pertanian (EP3) tahun 2017 sampai sekarang. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional.
Email: riafauriah@gmail.com



Hidayatuz Zu'amah. Menyelesaikan S1 pada bidang studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sebelas Maret Surakarta (2012/13), S2 dalam bidang studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor (2015/16). Saat ini sebagai peneliti Ahli Pertama pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi. Menjadi Anggota Kelompok Peneliti Evaluasi Pengendalian Pencemaran Pertanian tahun 2020 sampai sekarang.

Ditugaskan sebagai penanggung jawab rencana operasional Penelitian Pertanian (ROPP) pada tahun 2020. Pernah mengikuti pelatihan/kursus : 1) Pelatihan "AFACI Training on Soil Organic Carbon Sequestration Modeling & Mapping implemented" yang diselenggarakan oleh FAO and AFACI, 17-21 Januari 2022. Sebagai pemrasaran pada seminar (1) Seminar Nasional Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI) Tanah untuk Kedaulatan Pertanian dan Keberlanjutan Kehidupan dengan judul Dinamika Populasi dan Keanekaragaman Collembola Di Perkebunan Kelapa Sawit Rakyat Kecamatan Bajubang Kabupaten Batanghari Provinsi Jambi, Universitas Brawijaya, 2015; (2) Seminar Internasional "1st International Conference on Sustainable Tropical Land Management" dengan judul Remediation of arsenic-contaminated soil by chelating agents in shallot plantation land in Bima, West Nusa Tenggara, 17 September 2020; (3) Seminar Nasional "Hasil Penelitian Pertanian XI" dengan judul Modifikasi Alat Filter Inlet Outlet (Fio) Dengan Biochar Tongkol Jagung Untuk Menjerap Kontaminan Logam Berat Air Irigasi, UGM, 20 November 2021. Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/Jurnal baik Internasional maupun Nasional. Email: aya_zuzun@gmail.com



Aprian Aji Santoso. Menyelesaikan studi S1 program studi Agroteknologi pada tahun 2015 dan studi S2 program Agronomi pada tahun 2018 di Fakultas Pertanian, Universitas Negeri Jenderal Soedirman. Saat ini menjadi Peneliti Pertama di Balai Penelitian Lingkungan Pertanian bidang kepakaran Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi.

Telah menghasilkan publikasi pada Prosiding/ Jurnal baik Internasional maupun Nasional. Email: aprisantoz@gmail.com

Pengelolaan pertanian berkelanjutan berorientasi pada peningkatan produktivitas tanaman dengan memperhatikan kelestarian lingkungan. Fenomena perubahan iklim, penurunan kualitas lingkungan pertanian dan produk pertanian akibat penggunaan bahan agrokimia secara intensif dan tidak bijaksana menjadi tantangan dalam mewujudkan ketahanan dan keamanan pangan.

Buku ini berisi tentang konsep dasar pertanian berkelanjutan, dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian, status emisi GRK dari sektor pertanian, serta teknologi adaptasi dan mitigasi gas rumah kaca pada sektor pertanian. Bagian lain juga memuat cemaran bahan agrokimia pada lingkungan pertanian, status cemaran residu pestisida dan logam berat, risiko dampak pencemaran residu pestisida dan logam berat, teknologi penanggulangan cemaran residu pestisida pada lingkungan pertanian, teknologi penanggulangan cemaran logam berat pada lingkungan pertanian serta sintesis atau rekomendasi untuk mewujudkan ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan melalui pengelolaan sistem pertanian yang bijaksana dan ramah lingkungan.

Dicetak Oleh:
GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS



Jl. Sendok, Keranggayam CT VIII, Caturtunggal,
Depok, Sleman, D.I. Yogyakarta 55281
Telp/Fax: 0274 561037, Mobile/WA: 081 228 47 8888
① ugm.press ② @ugm.press ③ ugm.press.ugm.ac.id

