

BAHAN AJAR

PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN LIMBAH PERKEBUNAN DAN PABRIK KELAPA SAWIT



Penulis:

Dr. Suratni Afrianti, ST., M.Si.

Editor

Andry Admaja Tarigan, S.P., M.Agr.

BUKU BAHAN AJAR

**PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN
LIMBAH PERKEBUNAN DAN PABRIK KELAPA
SAWIT**

*Disusun sebagai Materi Perkuliahan dan Pelatihan
Pengelolaan Sumber Daya Perkebunan dan Industri Kelapa Sawit Berkelanjutan*

Penulis:
Dr. Suratni Afrianti, S.T., M.Si.

PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN LIMBAH PERKEBUNAN DAN PABRIK KELAPA SAWIT

Buku Bahan Ajar

Penulis:

Dr. Suratni Afrianti, S.T., M.Si.

Editor: Tim Redaksi

Desain Sampul dan Tata Letak: Tim Redaksi

Cetakan Pertama, 2026

Format: A4 (21 x 29,7 cm)

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik cetak, elektronik, fotokopi, rekaman, maupun cara lainnya, tanpa izin tertulis dari penulis, kecuali untuk kutipan singkat guna keperluan penulisan artikel atau tinjauan ilmiah.

Buku ini disusun untuk keperluan pendidikan dan pelatihan di bidang pengelolaan lingkungan dan industri kelapa sawit berkelanjutan. Data, contoh perhitungan, dan studi kasus yang disajikan bersifat ilustratif untuk tujuan pembelajaran, kecuali dinyatakan lain dengan mengacu pada sumber tertentu.

Diterbitkan oleh:

Unpri Press

KATA PENGANTAR

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis dalam perekonomian Indonesia, baik sebagai penyumbang devisa negara maupun sebagai penggerak ekonomi di wilayah pedesaan. Indonesia tercatat sebagai produsen dan eksportir minyak sawit terbesar di dunia, dengan luas areal perkebunan yang tersebar di berbagai provinsi, mulai dari Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, hingga Papua. Namun demikian, aktivitas perkebunan dan pengolahan tandan buah segar (TBS) di pabrik kelapa sawit (PKS) menghasilkan limbah dalam jumlah besar, baik berupa limbah padat, cair, maupun gas, yang apabila tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan pencemaran lingkungan dan menurunkan citra keberlanjutan industri ini di mata dunia.

Di sisi lain, limbah kelapa sawit memiliki karakteristik khas berupa kandungan bahan organik, lignoselulosa, minyak, dan unsur hara yang tinggi, sehingga menyimpan potensi besar untuk dimanfaatkan kembali menjadi produk bernilai tambah, seperti kompos, biogas, biochar, pupuk, pakan ternak, dan sumber energi terbarukan. Pergeseran paradigma dari 'limbah sebagai beban' menuju 'limbah sebagai sumber daya' inilah yang menjadi benang merah utama buku bahan ajar ini.

Buku ini disusun secara sistematis dalam empat belas bab, dimulai dari konsep dasar pengelolaan limbah, pengelolaan lingkungan perkebunan, karakteristik limbah padat dan cair, berbagai teknologi pemanfaatan (pengomposan, biogas, energi biomassa, biochar, pupuk), aspek pengendalian pencemaran dan keselamatan kerja, hingga penerapan ekonomi sirkular dan perancangan sistem terpadu. Setiap bab dilengkapi dengan capaian pembelajaran, uraian materi, tabel data pendukung, studi kasus, istilah kunci, rangkuman, dan soal latihan untuk memperkuat pemahaman pembaca.

Buku bahan ajar ini ditujukan bagi mahasiswa program studi Agroteknologi, Teknologi Industri Pertanian, Teknik Lingkungan, dan program studi terkait, serta dapat menjadi rujukan bagi praktisi perkebunan, peneliti, dan pemerhati lingkungan yang ingin memahami secara komprehensif praktik pengelolaan dan pemanfaatan limbah kelapa sawit yang berkelanjutan.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung penyusunan buku ini. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi

penyempurnaan buku ini pada edisi mendatang. Semoga buku ini bermanfaat bagi dunia pendidikan dan pengembangan industri kelapa sawit Indonesia yang produktif sekaligus ramah lingkungan.

Penulis,

Dr. Suratni Afrianti, S.T., M.Si.

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	3
Daftar Tabel	12
Daftar Gambar.....	13
Petunjuk Penggunaan Buku	14
Pendahuluan.....	15
Bab 1. Konsep Dasar Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit	16
<i>Capaian Pembelajaran</i>	16
1.1 Pengertian Limbah Kelapa Sawit	17
1.2 Sumber dan Jenis Limbah Kelapa Sawit.....	18
1.3 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Sifat dan Karakteristik.....	18
1.4 Hierarki Pengelolaan Limbah	19
1.6 Peluang dan Tantangan Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit	20
1.7 Perbandingan Pengelolaan Limbah Sawit dengan Komoditas Perkebunan Lain	21
1.8 Peran Berbagai Pemangku Kepentingan	21
Rangkuman.....	23
Soal Latihan (Esai)	23
Diskusi Kelompok	24
Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)	24
Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)	25
Kunci Jawaban Soal Objektif.....	28
Bab 2. Pengelolaan Lingkungan Perkebunan Kelapa Sawit.....	29
<i>Capaian Pembelajaran</i>	29
2.1 Ruang Lingkup Pengelolaan Lingkungan Perkebunan	29
2.2 Dampak Lingkungan Kegiatan Perkebunan	30
2.3 Upaya Pengelolaan Lingkungan Perkebunan	30
2.4 Konservasi Tanah dan Air.....	31
2.5 Pengelolaan Kawasan Bernilai Konservasi Tinggi (HCV).....	31
2.6 Pemantauan Kualitas Udara dan Kebisingan di Area Perkebunan	31
2.7 Pengelolaan Kebakaran Lahan dan Kabut Asap	32

<i>Rangkuman</i>	33
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	33
<i>Diskusi Kelompok</i>	34
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	34
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	35
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	38
Bab 3. Limbah Padat Perkebunan Kelapa Sawit	39
<i>Capaian Pembelajaran</i>	39
<i>3.1 Jenis Limbah Padat Perkebunan</i>	39
<i>3.2 Karakteristik dan Volume Limbah</i>	39
<i>3.3 Estimasi Volume Limbah pada Skala Kebun</i>	40
<i>3.4 Potensi dan Kendala Pemanfaatan</i>	40
<i>3.5 Pemanfaatan Pelepah sebagai Bahan Baku Industri Kreatif</i>	41
<i>3.6 Tantangan Logistik Pengumpulan Limbah Perkebunan</i>	41
<i>Rangkuman</i>	42
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	43
<i>Diskusi Kelompok</i>	43
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	44
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	44
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	47
Bab 4. Limbah Padat Pabrik Kelapa Sawit	48
<i>Capaian Pembelajaran</i>	48
<i>4.1 Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)</i>	48
<i>4.2 Serat Perasan (Fibre) dan Cangkang (Shell)</i>	49
<i>4.3 Bungkil Inti Sawit (Palm Kernel Cake/Expeller)</i>	49
<i>4.4 Neraca Massa Limbah Padat Pabrik</i>	49
<i>4.5 Contoh Perhitungan Neraca Massa</i>	50
<i>4.6 Standar Mutu Bungkil Inti Sawit untuk Pakan Ternak</i>	50
<i>4.7 Penyimpanan dan Penanganan Limbah Padat Pabrik</i>	50
<i>Rangkuman</i>	52
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	52
<i>Diskusi Kelompok</i>	52

<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	53
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	53
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	56
Bab 5. Pengelolaan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (POME)	57
<i>Capaian Pembelajaran</i>	57
5.1 Karakteristik POME	57
5.2 Sistem Pengolahan POME Konvensional	58
5.3 Baku Mutu dan Pemantauan Limbah Cair	58
5.4 Pemanfaatan Efluen: Land Application	59
5.5 Teknologi Alternatif Pengolahan POME	59
5.6 Pengelolaan Lumpur (Sludge) Hasil Pengolahan POME	60
Rangkuman	61
Soal Latihan (Esai)	61
Diskusi Kelompok	62
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	62
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	63
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	65
Bab 6. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Bahan Organik	66
<i>Capaian Pembelajaran</i>	66
6.1 Limbah Kelapa Sawit sebagai Sumber Bahan Organik	67
6.2 Peran Bahan Organik bagi Kesuburan Tanah	67
6.3 Bentuk Aplikasi Bahan Organik Limbah Sawit	67
6.4 Perhitungan Kebutuhan Bahan Organik	67
6.5 Pengaruh Bahan Organik terhadap Aktivitas Mikroorganisme Tanah	68
6.6 Pemantauan Perubahan Kualitas Tanah Jangka Panjang	68
Rangkuman	69
Soal Latihan (Esai)	69
Diskusi Kelompok	70
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	70
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	71
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	73
Bab 7. Teknologi Pengomposan Limbah Kelapa Sawit	74

<i>Capaian Pembelajaran</i>	74
<i>7.1 Prinsip Dasar Pengomposan</i>	74
<i>7.2 Metode Pengomposan TKKS</i>	75
<i>7.3 Faktor yang Memengaruhi Proses Pengomposan</i>	75
<i>7.4 Indikator Kematangan dan Mutu Kompos</i>	75
<i>7.5 Manfaat Kompos TKKS</i>	76
<i>7.6 Penggunaan Mikroorganisme Dekomposer</i>	76
<i>7.7 Pengendalian Bau pada Unit Pengomposan</i>	76
<i>Rangkuman</i>	78
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	78
<i>Diskusi Kelompok</i>	78
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	79
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	79
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	82
Bab 8. Produksi Biogas dari POME	83
<i>Capaian Pembelajaran</i>	83
<i>8.1 Prinsip Dasar Produksi Biogas dari POME</i>	83
<i>8.2 Teknologi Digester Biogas POME</i>	84
<i>8.3 Pemanfaatan Biogas sebagai Sumber Energi</i>	84
<i>8.4 Estimasi Potensi Biogas</i>	85
<i>8.5 Pemurnian Biogas (Biogas Upgrading)</i>	85
<i>8.6 Perhitungan Kelayakan Ekonomi Proyek Biogas</i>	85
<i>Rangkuman</i>	87
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	87
<i>Diskusi Kelompok</i>	87
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	88
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	88
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	91
Bab 9. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi	92
<i>Capaian Pembelajaran</i>	92
<i>9.1 Potensi Energi Biomassa Kelapa Sawit</i>	92
<i>9.2 Pemanfaatan sebagai Bahan Bakar Boiler</i>	93

9.3 Teknologi Konversi Energi Lanjutan	93
9.4 Perbandingan Efisiensi Konversi Energi	94
9.5 Rantai Pasok Biomassa untuk Ekspor	94
Rangkuman.....	95
Soal Latihan (Esai)	96
Diskusi Kelompok	96
Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)	96
Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)	97
Kunci Jawaban Soal Objektif.....	99
Bab 10. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Menjadi Biochar	100
Capaian Pembelajaran	100
10.1 Konsep Biochar	100
10.2 Proses Pembuatan Biochar dari Limbah Sawit	100
10.3 Manfaat Biochar bagi Tanah dan Lingkungan	101
10.4 Aplikasi Biochar pada Tanaman Kelapa Sawit	101
10.5 Karakterisasi Biochar untuk Aplikasi Spesifik	102
10.6 Potensi Bio-oil sebagai Produk Samping Pirolisis	102
Rangkuman.....	103
Soal Latihan (Esai)	104
Diskusi Kelompok	104
Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)	104
Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)	105
Kunci Jawaban Soal Objektif.....	107
Bab 11. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Pupuk dan Pembenh Tanah.....	109
Capaian Pembelajaran	109
11.1 Jenis Pupuk Berbahan Limbah Kelapa Sawit	109
11.2 Kandungan Hara Limbah Kelapa Sawit.....	110
11.3 Strategi Aplikasi Pupuk Organik pada Kebun.....	110
11.4 Pengemasan dan Pemasaran Pupuk Organik Limbah Sawit.....	111
11.5 Kombinasi Pupuk Organik dan Pupuk Hayati.....	111
Rangkuman.....	112
Soal Latihan (Esai)	113

<i>Diskusi Kelompok</i>	113
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	113
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	114
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif.....</i>	117
Bab 12. Pengendalian Pencemaran dan Keselamatan Kerja dalam Pengelolaan Limbah.....	117
<i>Capaian Pembelajaran</i>	117
<i>12.1 Risiko Pencemaran dalam Pengelolaan Limbah.....</i>	118
<i>12.2 Upaya Pengendalian Pencemaran.....</i>	118
<i>12.3 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)</i>	118
<i>12.4 Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko</i>	118
<i>12.5 Prosedur Tanggap Darurat.....</i>	119
<i>12.6 Audit Lingkungan dan Kepatuhan Regulasi</i>	119
<i>12.7 Pelaporan dan Transparansi Kinerja Lingkungan</i>	119
<i>Rangkuman.....</i>	121
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	121
<i>Diskusi Kelompok</i>	122
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	122
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	122
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif.....</i>	125
Bab 13. Ekonomi Sirkular dan Industri Kelapa Sawit Berkelanjutan.....	126
<i>Capaian Pembelajaran</i>	126
<i>13.1 Konsep Ekonomi Sirkular</i>	127
<i>13.2 Penerapan Ekonomi Sirkular pada Industri Kelapa Sawit.....</i>	127
<i>13.3 Keberlanjutan Industri Kelapa Sawit</i>	127
<i>13.4 Analisis Nilai Tambah Produk Turunan Limbah</i>	128
<i>13.5 Indikator Pengukuran Ekonomi Sirkular</i>	128
<i>13.6 Tantangan Penerapan Ekonomi Sirkular pada Skala Industri.....</i>	128
<i>Rangkuman.....</i>	130
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	130
<i>Diskusi Kelompok</i>	130
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	131
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	131

<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	134
Bab 14. Perancangan Sistem Terpadu Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit.....	134
<i>Capaian Pembelajaran</i>	134
<i>14.1 Konsep Sistem Terpadu</i>	135
<i>14.2 Tahapan Perancangan Sistem Terpadu</i>	135
<i>14.3 Contoh Skema Sistem Terpadu</i>	136
<i>14.4 Analisis Kelayakan Teknologi</i>	136
<i>14.5 Evaluasi dan Keberlanjutan Sistem</i>	136
<i>14.6 Peran Digitalisasi dalam Pengelolaan Limbah Terpadu</i>	137
<i>14.7 Arah Pengembangan Riset dan Inovasi ke Depan</i>	137
<i>Rangkuman</i>	139
<i>Soal Latihan (Esai)</i>	139
<i>Diskusi Kelompok</i>	139
<i>Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)</i>	140
<i>Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)</i>	140
<i>Kunci Jawaban Soal Objektif</i>	143
Bank Soal Ujian Akhir Komprehensif.....	144
<i>A. Soal Pilihan Ganda</i>	144
<i>Kunci Jawaban Pilihan Ganda</i>	147
<i>B. Soal Esai Komprehensif</i>	147
Glosarium.....	149
Lampiran.....	151
<i>Lampiran 1: Istilah Kunci per Bab</i>	151
<i>Lampiran 2: Contoh Format Pemantauan Kualitas Limbah Cair (POME)</i>	155
<i>Lampiran 3: Contoh Prosedur Keselamatan Kerja di Area Digester Biogas</i>	155
<i>Lampiran 4: Tabel Konversi Satuan yang Umum Digunakan</i>	156
<i>Lampiran 5: Contoh SOP Penanganan Kebocoran Kolam Limbah Cair</i>	156
<i>Lampiran 6: Contoh Checklist Audit Internal Pengelolaan Limbah</i>	157
<i>Lampiran 7: Daftar Singkatan</i>	158
<i>Lampiran 8: Contoh Kerangka Dokumen RKL-RPL Sederhana untuk Pabrik Kelapa Sawit</i>	159
Daftar Pustaka.....	162

Tentang Penulis.....	167
----------------------	-----

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Sifat dan Karakteristik	19
Tabel 3.1 Estimasi Volume Limbah pada Skala Kebun	40
Tabel 4.1 Neraca Massa Limbah Padat Pabrik	49
Tabel 5.1 Baku Mutu dan Pemantauan Limbah Cair.....	58
Tabel 7.1 Faktor yang Memengaruhi Proses Pengomposan.....	75
Tabel 8.1 Teknologi Digester Biogas POME.....	84
Tabel 9.1 Potensi Energi Biomassa Kelapa Sawit	93
Tabel 10.1 Proses Pembuatan Biochar dari Limbah Sawit	101
Tabel 11.1 Kandungan Hara Limbah Kelapa Sawit	110
Tabel 12.1 Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko	119
Tabel 14.1 Analisis Kelayakan Teknologi	136
Tabel L.1 Contoh Format Pemantauan Kualitas Limbah Cair (POME).....	155
Tabel L.2 Tabel Konversi Satuan yang Umum Digunakan.....	156
Tabel L.3 Contoh Checklist Audit Internal Pengelolaan Limbah.....	157

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi terkait materi Bab 1: Konsep Dasar Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit	17
Gambar 2.1 Ilustrasi terkait materi Bab 2: Pengelolaan Lingkungan Perkebunan Kelapa Sawit	29
Gambar 3.1 Ilustrasi terkait materi Bab 3: Limbah Padat Perkebunan Kelapa Sawit	39
Gambar 4.1 Ilustrasi terkait materi Bab 4: Limbah Padat Pabrik Kelapa Sawit.....	48
Gambar 5.1 Ilustrasi terkait materi Bab 5: Pengelolaan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (POME).....	57
Gambar 6.1 Ilustrasi terkait materi Bab 6: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Bahan Organik	66
Gambar 7.1 Ilustrasi terkait materi Bab 7: Teknologi Pengomposan Limbah Kelapa Sawit	74
Gambar 8.1 Ilustrasi terkait materi Bab 8: Produksi Biogas dari POME	83
Gambar 9.1 Ilustrasi terkait materi Bab 9: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi	92
Gambar 10.1 Ilustrasi terkait materi Bab 10: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Menjadi Biochar	100
Gambar 11.1 Ilustrasi terkait materi Bab 11: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Pupuk dan Pembenah Tanah	109
Gambar 12.1 Ilustrasi terkait materi Bab 12: Pengendalian Pencemaran dan Keselamatan Kerja dalam Pengelolaan Limbah	117
Gambar 13.1 Ilustrasi terkait materi Bab 13: Ekonomi Sirkular dan Industri Kelapa Sawit Berkelanjutan.....	126
Gambar 14.1 Ilustrasi terkait materi Bab 14: Perancangan Sistem Terpadu Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit.....	135

PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU

1. Setiap bab diawali dengan Capaian Pembelajaran yang menjelaskan kompetensi yang diharapkan dikuasai pembaca setelah mempelajari bab tersebut.
2. Uraian materi disajikan secara sistematis dengan sub-bab, tabel data pendukung, dan ilustrasi perhitungan bila diperlukan.
3. Setiap bab dilengkapi Studi Kasus yang mengangkat penerapan materi pada kondisi nyata di lapangan.
4. Istilah Kunci disajikan untuk memudahkan pembaca memahami terminologi teknis yang digunakan.
5. Rangkuman disajikan di akhir bab sebagai penguatan pemahaman inti materi.
6. Soal Latihan disediakan dalam berbagai bentuk (uraian, analisis kasus, dan hitungan) untuk mengukur pemahaman pembaca.

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu tanaman perkebunan yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian nasional. Berdasarkan data statistik perkebunan, luas areal kelapa sawit Indonesia mencapai lebih dari 16 juta hektare yang tersebar di berbagai wilayah, dengan produksi minyak sawit mentah (CPO) mencapai puluhan juta ton per tahun. Rantai produksi kelapa sawit melibatkan dua tahap utama, yaitu kegiatan budi daya di perkebunan (on-farm) dan kegiatan pengolahan TBS menjadi CPO dan inti sawit di pabrik kelapa sawit (off-farm).

Setiap tahap dalam rantai produksi tersebut menghasilkan limbah dalam jumlah yang tidak sedikit. Pada tahap perkebunan, kegiatan pemangkasan pelepah dan peremajaan tanaman menghasilkan biomassa lignoselulosa dalam volume besar. Pada tahap pengolahan di pabrik, setiap ton TBS yang diproses menghasilkan sekitar 220-230 kg tandan kosong, 130-150 kg serat, 50-70 kg cangkang, serta 600-800 liter limbah cair (POME). Apabila diakumulasikan pada skala nasional, jumlah limbah yang dihasilkan industri kelapa sawit Indonesia mencapai puluhan hingga ratusan juta ton per tahun.

Volume limbah yang sangat besar ini menghadirkan dua sisi yang saling berkaitan. Di satu sisi, limbah yang tidak dikelola dengan baik berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, mulai dari pencemaran badan air oleh limbah cair bermuatan organik tinggi, emisi gas rumah kaca dari dekomposisi anaerobik, hingga degradasi lahan akibat pengelolaan limbah padat yang tidak tepat. Di sisi lain, karakteristik limbah kelapa sawit yang kaya bahan organik, energi, dan unsur hara menjadikannya sumber daya potensial yang dapat diolah menjadi produk bernilai tambah, seperti kompos, pupuk cair, biogas, listrik, biochar, dan bahan baku industri turunan lainnya.

Buku bahan ajar ini disusun untuk membekali pembaca dengan pemahaman yang runtut mengenai kedua sisi tersebut, mulai dari pemahaman konsep dan regulasi, karakteristik dan sumber limbah, berbagai teknologi pengolahan dan pemanfaatan, aspek pengendalian pencemaran dan keselamatan kerja, hingga penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam perancangan sistem pengelolaan limbah terpadu pada industri kelapa sawit.

BAB 1. KONSEP DASAR PENGELOLAAN LIMBAH KELAPA SAWIT

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan pengertian dan ruang lingkup limbah kelapa sawit
2. Mengidentifikasi sumber dan jenis limbah dari kegiatan perkebunan dan pabrik kelapa sawit
3. Memahami prinsip dasar pengelolaan limbah (waste management hierarchy)
4. Menjelaskan regulasi terkait pengelolaan limbah industri kelapa sawit di Indonesia
5. Menganalisis peluang dan tantangan pengelolaan limbah kelapa sawit di Indonesia

Hierarki Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit



Semakin ke bawah piramida, semakin diprioritaskan penerapannya

Gambar 1.1 Ilustrasi terkait materi Bab 1: Konsep Dasar Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit

1.1 Pengertian Limbah Kelapa Sawit

Limbah kelapa sawit adalah seluruh bahan sisa yang dihasilkan dari kegiatan budi daya (on-farm) maupun pengolahan tandan buah segar (TBS) menjadi minyak sawit mentah (Crude Palm Oil/CPO) dan inti sawit (Palm Kernel Oil/PKO) di pabrik kelapa sawit (off-farm) (Naibaho, 1996). Limbah ini dapat berwujud padat, cair, maupun gas, dan dihasilkan pada hampir setiap tahapan proses, mulai dari pemeliharaan tanaman, panen, hingga pengolahan di pabrik.

Berbeda dengan limbah pada umumnya yang cenderung dipandang sebagai bahan buangan tanpa nilai, limbah kelapa sawit memiliki karakteristik khas yaitu kandungan bahan organik, selulosa, lignin, minyak, dan unsur hara yang relatif tinggi.

Karakteristik ini menjadikan limbah kelapa sawit berpotensi besar untuk dimanfaatkan kembali (reuse), didaur ulang (recycle), maupun diolah menjadi produk bernilai tambah, sehingga konsep pengelolaannya tidak semata-mata berorientasi pada pembuangan, melainkan pada pemanfaatan.

Dalam kerangka keilmuan teknik lingkungan, limbah kelapa sawit dapat digolongkan sebagai limbah biomassa pertanian (agricultural biomass waste), yang secara umum bersifat biodegradable atau mudah terurai secara alami, meskipun laju dan hasil dekomposisinya sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan, kondisi lingkungan, serta ada tidaknya intervensi teknologi pengolahan.

1.2 Sumber dan Jenis Limbah Kelapa Sawit

Secara umum, sumber limbah kelapa sawit dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu limbah dari kegiatan perkebunan (on-farm) dan limbah dari kegiatan pengolahan di pabrik (off-farm). Pengelompokan ini penting karena karakteristik, volume, dan strategi pengelolaan pada masing-masing sumber berbeda secara signifikan.

1. Limbah perkebunan: pelepah dan daun hasil pemangkasan (pruning), batang kelapa sawit hasil peremajaan (replanting), serta gulma dan sisa tanaman penutup tanah.
2. Limbah padat pabrik: tandan kosong sawit (TKKS), serat perasan (fiber/mesocarp fibre), cangkang (shell), dan bungkil inti sawit (palm kernel cake).
3. Limbah cair pabrik: Palm Oil Mill Effluent (POME) yang berasal dari proses sterilisasi TBS, klarifikasi minyak, dan hidrosiklon inti sawit.
4. Limbah gas: emisi metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) dari dekomposisi anaerobik POME, serta emisi cerobong boiler.

1.3 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Sifat dan Karakteristik

Selain klasifikasi berdasarkan sumber, limbah kelapa sawit juga dapat digolongkan berdasarkan sifat fisik dan kimianya. Berdasarkan wujud, limbah dibedakan menjadi limbah padat, cair, dan gas. Berdasarkan sifat biodegradabilitasnya, hampir seluruh limbah kelapa sawit tergolong biodegradable karena tersusun dari senyawa organik

alami. Berdasarkan tingkat bahaya, limbah kelapa sawit pada umumnya tergolong limbah non-B3 (bukan Bahan Berbahaya dan Beracun), kecuali beberapa limbah dari kegiatan pemeliharaan mesin dan penggunaan bahan kimia pertanian yang harus dikelola sesuai ketentuan limbah B3.

Tabel 1.1 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Sifat dan Karakteristik

Jenis Limbah	Sumber	Wujud	Karakteristik Utama
Pelepah/batang	Perkebunan (pruning/replanting)	Padat	Lignoselulosa tinggi, volume besar
TKKS	Stasiun thresher pabrik	Padat	Kadar air tinggi, kaya kalium
Serat & cangkang	Stasiun pressing & nut/kernel	Padat	Nilai kalor tinggi, untuk bahan bakar
Bungkil inti sawit	Stasiun kernel crushing	Padat	Kaya protein, untuk pakan ternak
POME	Sterilizer, klarifikasi, hidrosiklon	Cair	BOD/COD sangat tinggi
Gas metana	Dekomposisi anaerobik POME	Gas	Berpotensi sebagai sumber energi

1.4 Hierarki Pengelolaan Limbah

Prinsip pengelolaan limbah yang lazim digunakan secara internasional dikenal dengan istilah hierarki pengelolaan limbah (waste management hierarchy), yang secara berurutan meliputi: pencegahan (prevention), pengurangan (reduction), penggunaan kembali (reuse), daur ulang (recycle), pemulihan energi (energy recovery), dan pembuangan akhir (disposal) sebagai pilihan terakhir. Semakin ke atas urutan hierarki tersebut, semakin tinggi nilai keberlanjutan dan efisiensi sumber daya yang dicapai.

Dalam konteks industri kelapa sawit, penerapan hierarki ini diwujudkan misalnya melalui optimalisasi proses agar limbah yang dihasilkan minimal, pemanfaatan tandan kosong sebagai mulsa atau kompos, pemanfaatan cangkang dan fiber sebagai bahan bakar boiler, serta pengolahan POME menjadi biogas sebelum residunya dimanfaatkan sebagai pupuk cair. Prinsip ini juga sejalan dengan pendekatan produksi bersih (cleaner production) yang menekankan pencegahan timbunan limbah sejak dari sumbernya, bukan semata-mata pengolahan di ujung pipa (end-of-pipe treatment).

1.5 Regulasi Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit di Indonesia

Pengelolaan limbah industri kelapa sawit di Indonesia diatur melalui berbagai peraturan perundang-undangan, antara lain Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, serta baku mutu limbah cair bagi usaha dan/atau kegiatan minyak sawit yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 (Pemerintah Republik Indonesia, 2009, 2021; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014).

Selain regulasi pemerintah, terdapat pula standar dan sertifikasi keberlanjutan seperti Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) dan Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO) yang mensyaratkan perusahaan perkebunan dan pabrik kelapa sawit menerapkan praktik pengelolaan limbah yang bertanggung jawab terhadap lingkungan, termasuk kewajiban memiliki dokumen lingkungan (AMDAL/UKL-UPL), izin pembuangan air limbah, serta pelaporan pemantauan lingkungan secara berkala kepada instansi berwenang (ISPO, 2020; RSPO, 2018).

1.6 Peluang dan Tantangan Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit

Peluang pengelolaan limbah kelapa sawit di Indonesia sangat besar mengingat skala industri yang luas dan kebutuhan pasar terhadap produk ramah lingkungan yang terus meningkat, baik untuk pupuk organik, energi terbarukan, maupun bahan baku industri turunan (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2022). Meningkatnya kesadaran perusahaan terhadap sertifikasi keberlanjutan juga mendorong percepatan investasi pada unit pengolahan limbah.

Namun demikian, tantangan yang dihadapi juga tidak sedikit, di antaranya keterbatasan modal investasi pada perusahaan skala kecil dan menengah, minimnya sumber daya manusia yang menguasai teknologi pengolahan limbah, infrastruktur logistik yang belum memadai di beberapa wilayah, serta fluktuasi harga produk turunan limbah di pasar yang dapat memengaruhi kelayakan ekonomi investasi pengolahan limbah.

1.7 Perbandingan Pengelolaan Limbah Sawit dengan Komoditas Perkebunan Lain

Dibandingkan dengan komoditas perkebunan lain seperti karet, tebu, atau kakao, kelapa sawit memiliki keunikan karena hampir seluruh bagian tanaman dan hasil olahannya menghasilkan produk samping yang dapat dimanfaatkan secara ekonomis. Pada industri gula tebu misalnya, limbah utama berupa ampas tebu (bagasse) umumnya juga dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler, namun industri kelapa sawit memiliki keragaman jenis limbah yang lebih banyak, meliputi limbah padat berserat, limbah cair dengan beban organik sangat tinggi, serta potensi energi biomassa yang lebih besar per satuan luas lahan.

Keunikan lain adalah adanya rantai pasok limbah dua arah antara kebun dan pabrik: kebun menyuplai TBS ke pabrik, sementara pabrik dapat mengembalikan produk olahan limbah seperti kompos dan efluen olahan ke kebun. Pola aliran material dua arah semacam ini relatif jarang ditemukan pada komoditas perkebunan lain dan menjadi salah satu keunggulan struktural yang mendukung penerapan ekonomi sirkular pada industri kelapa sawit.

1.8 Peran Berbagai Pemangku Kepentingan

Pengelolaan limbah kelapa sawit yang efektif memerlukan keterlibatan berbagai pemangku kepentingan, mulai dari perusahaan perkebunan dan pabrik sebagai penghasil limbah utama, pemerintah pusat dan daerah sebagai regulator dan pengawas, lembaga penelitian dan perguruan tinggi sebagai penyedia inovasi teknologi, hingga masyarakat sekitar yang berperan sebagai pemantau sekaligus penerima manfaat dari program pengelolaan limbah, misalnya melalui kemitraan pengolahan pakan ternak atau penyerapan tenaga kerja pada unit pengolahan limbah.

Kolaborasi multi-pihak ini penting karena pengelolaan limbah yang baik tidak dapat berjalan optimal apabila hanya mengandalkan kepatuhan perusahaan semata, tanpa dukungan kebijakan pemerintah yang konsisten, riset teknologi yang terus berkembang, serta partisipasi aktif masyarakat dalam pengawasan lingkungan di sekitar wilayah operasional perkebunan dan pabrik.

Studi Kasus: Penerapan Hierarki Pengelolaan Limbah pada PKS Skala Menengah

Sebuah pabrik kelapa sawit (PKS) dengan kapasitas olah 45 ton TBS/jam di Provinsi Riau menerapkan strategi pengelolaan limbah bertahap mengikuti hierarki pengelolaan limbah. Pada tahap awal, perusahaan melakukan efisiensi proses untuk menekan jumlah oil losses pada limbah cair. Selanjutnya, seluruh cangkang dan serat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler sehingga kebutuhan energi pabrik terpenuhi secara mandiri. TKKS diolah menjadi kompos menggunakan efluen POME sebagai aktivator, sedangkan sisa efluen diarahkan ke unit digester biogas tertutup sebelum dialirkan ke lahan aplikasi (land application).

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa penerapan strategi tersebut mampu menurunkan volume limbah yang dibuang ke lingkungan hingga lebih dari 80 persen, sekaligus menghasilkan penghematan biaya energi dan pupuk anorganik yang signifikan bagi kebun inti perusahaan. Studi kasus ini menggambarkan bagaimana penerapan hierarki pengelolaan limbah secara konsisten dapat memberikan manfaat ganda, baik dari sisi lingkungan maupun ekonomi.

Studi Kasus Tambahan: Sertifikasi RSPO dan Pengelolaan Limbah Berkelanjutan

Sebuah grup perkebunan yang mengajukan sertifikasi RSPO diharuskan menunjukkan bukti pengelolaan limbah yang sesuai kriteria, termasuk dokumentasi neraca massa limbah, hasil pemantauan kualitas efluen, serta rencana pengelolaan kawasan HCV. Proses audit RSPO menemukan beberapa catatan minor terkait dokumentasi pemantauan yang belum konsisten, sehingga perusahaan diminta menyusun sistem pencatatan digital terpadu sebelum sertifikasi disetujui.

Setelah perbaikan sistem dokumentasi dan pemantauan diterapkan selama enam bulan, perusahaan berhasil memperoleh sertifikasi RSPO, yang kemudian meningkatkan akses pasar produk CPO mereka ke pembeli internasional yang mensyaratkan jaminan keberlanjutan rantai pasok.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah kabupaten memiliki 12 pabrik kelapa sawit dengan total kapasitas olah gabungan 720 ton TBS/jam yang beroperasi rata-rata 18 jam/hari. Perkirakan total volume POME yang dihasilkan seluruh pabrik tersebut per hari (gunakan asumsi 0,7 m³ POME per ton TBS)!

Pembahasan: Total TBS diolah per hari = $720 \text{ ton/jam} \times 18 \text{ jam} = 12.960 \text{ ton TBS/hari}$. Volume POME = $12.960 \text{ ton} \times 0,7 \text{ m}^3/\text{ton} = 9.072 \text{ m}^3/\text{hari}$. Dengan demikian, seluruh pabrik di kabupaten tersebut berpotensi menghasilkan sekitar 9.072 meter kubik POME setiap harinya, sebuah volume yang menegaskan pentingnya perencanaan pengelolaan limbah cair pada skala kawasan, tidak hanya pada skala satu pabrik.

Rangkuman

1. Limbah kelapa sawit bersumber dari kegiatan perkebunan (on-farm) dan pabrik pengolahan (off-farm), terdiri atas limbah padat, cair, dan gas.
2. Limbah kelapa sawit dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber, wujud, biodegradabilitas, dan tingkat bahaya.
3. Hierarki pengelolaan limbah menempatkan pencegahan dan pemanfaatan sebagai prioritas utama dibandingkan pembuangan.
4. Pengelolaan limbah kelapa sawit di Indonesia diatur oleh regulasi pemerintah serta standar keberlanjutan seperti ISPO dan RSPO.
5. Pengelolaan limbah kelapa sawit menghadirkan peluang besar sekaligus tantangan investasi, SDM, dan infrastruktur.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan perbedaan sumber limbah on-farm dan off-farm pada industri kelapa sawit!
2. Sebutkan dan jelaskan tahapan dalam hierarki pengelolaan limbah!
3. Mengapa limbah kelapa sawit berpotensi tinggi untuk dimanfaatkan kembali dibandingkan limbah pada umumnya?
4. Sebutkan dua standar keberlanjutan yang mengatur pengelolaan lingkungan pada industri kelapa sawit di Indonesia!

5. Analisislah dampak yang mungkin timbul apabila limbah kelapa sawit tidak dikelola dengan baik!
6. Jelaskan perbedaan pendekatan cleaner production dengan pengolahan end-of-pipe!
7. Diskusikan tantangan utama penerapan pengelolaan limbah pada perusahaan kelapa sawit skala kecil!
8. Berdasarkan studi kasus pada bab ini, jelaskan manfaat ganda yang diperoleh PKS dari penerapan hierarki pengelolaan limbah!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan bersama kelompok: apabila sebuah kabupaten memiliki belasan pabrik kelapa sawit yang berdekatan, apakah lebih efisien membangun unit pengolahan limbah terpusat (regional) dibandingkan unit pengolahan pada masing-masing pabrik? Jelaskan pertimbangan teknis dan ekonominya.
2. Diskusikan peran pemerintah daerah dalam mendorong penerapan hierarki pengelolaan limbah pada perusahaan kelapa sawit skala kecil dan menengah di wilayahnya.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. On-farm bersumber dari kegiatan budi daya di kebun (pruning, replanting), sedangkan off-farm bersumber dari proses pengolahan TBS di pabrik (TKKS, serat, cangkang, POME).
2. Hierarki meliputi pencegahan, pengurangan, penggunaan kembali, daur ulang, pemulihan energi, dan pembuangan akhir; prioritas tertinggi pada pencegahan timbulan limbah.

3. Karena kandungan bahan organik, lignoselulosa, minyak, dan unsur hara yang tinggi menjadikan limbah sawit relatif mudah diolah menjadi produk bernilai tambah dibanding limbah anorganik.
4. ISPO (Indonesian Sustainable Palm Oil) dan RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil) adalah dua standar keberlanjutan utama yang mengatur pengelolaan lingkungan perkebunan dan pabrik.
5. Tanpa pengelolaan yang baik, limbah dapat mencemari air, tanah, dan udara, menimbulkan bau, menjadi sumber vektor penyakit, serta melanggar baku mutu lingkungan yang berlaku.
6. Cleaner production mencegah timbulan limbah sejak dari sumber melalui efisiensi proses, sedangkan end-of-pipe hanya mengolah limbah setelah terbentuk di akhir proses produksi.
7. Tantangan utama meliputi keterbatasan modal investasi, minimnya SDM terlatih, infrastruktur logistik yang kurang memadai, dan fluktuasi harga produk turunan limbah.
8. PKS memperoleh manfaat lingkungan berupa penurunan volume limbah dibuang, serta manfaat ekonomi berupa penghematan biaya energi dan pupuk anorganik.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Limbah kelapa sawit yang berasal dari kegiatan pemangkasan pelepah dan peremajaan tanaman digolongkan sebagai limbah...
 - A. Off-farm
 - B. On-farm
 - C. B3
 - D. Non-organik
 - E. Gas rumah kaca
2. Urutan hierarki pengelolaan limbah yang paling diprioritaskan adalah...
 - A. Pembuangan akhir

- B. Daur ulang
- C. Pencegahan
- D. Pemulihan energi
- E. Penggunaan kembali

3. Berikut yang BUKAN merupakan limbah padat pabrik kelapa sawit adalah...

- A. TKKS
- B. Cangkang
- C. Serat
- D. Bungkil inti sawit
- E. Pelepah

4. Standar sertifikasi kelapa sawit berkelanjutan yang bersifat wajib di Indonesia adalah...

- A. RSPO
- B. ISPO
- C. FSC
- D. Fairtrade
- E. Organic Certification

5. Pendekatan yang mencegah timbulnya limbah sejak dari sumber produksi disebut...

- A. End-of-pipe treatment
- B. Cleaner production
- C. Waste disposal
- D. Bioremediasi
- E. Fitoremediasi

6. Regulasi utama di Indonesia yang mengatur perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup adalah...

- A. UU No. 32 Tahun 2009
- B. UU No. 5 Tahun 1990

- C. UU No. 18 Tahun 2008
- D. UU No. 41 Tahun 1999
- E. UU No. 23 Tahun 2014

7. Pergeseran pandangan limbah dari 'beban' menjadi 'sumber daya' berkaitan erat dengan prinsip...

- A. Produksi massal
- B. Ekonomi sirkular
- C. Produksi linear
- D. Outsourcing
- E. Diversifikasi produk

8. Berikut ini yang BUKAN termasuk pemangku kepentingan dalam pengelolaan limbah kelapa sawit adalah...

- A. Perusahaan sebagai penghasil limbah
- B. Pemerintah sebagai regulator
- C. Lembaga penelitian sebagai penyedia inovasi
- D. Masyarakat sebagai pemantau
- E. Kompetitor asing sebagai penentu kebijakan

9. Limbah kelapa sawit tergolong limbah non-B3, kecuali pada kegiatan...

- A. Pemangkasan pelepah
- B. Pemeliharaan mesin dan penggunaan bahan kimia pertanian
- C. Pengangkutan TBS
- D. Panen buah
- E. Pembibitan

10. Dibandingkan limbah tebu (bagasse), keunikan limbah kelapa sawit terletak pada...

- A. Tidak menghasilkan limbah cair
- B. Keragaman jenis limbah dan aliran material dua arah kebun-pabrik
- C. Tidak dapat dimanfaatkan

- D. Hanya menghasilkan limbah gas
- E. Tidak diatur regulasi apa pun

Kunci Jawaban Soal Objektif

1B 2C 3E 4B 5B 6A 7B 8E 9B 10B

BAB 2. PENGELOLAAN LINGKUNGAN PERKEBUNAN KELAPA SAWIT

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Memahami konsep pengelolaan lingkungan pada kegiatan perkebunan kelapa sawit
2. Mengidentifikasi dampak lingkungan dari kegiatan perkebunan kelapa sawit
3. Menjelaskan upaya pengelolaan dan pemantauan lingkungan perkebunan
4. Menjelaskan prinsip konservasi tanah dan air pada lahan perkebunan

Skema Zona Penyangga (Buffer Zone) di Sepanjang Aliran Sungai



Gambar 2.1 Ilustrasi terkait materi Bab 2: Pengelolaan Lingkungan Perkebunan Kelapa Sawit

2.1 Ruang Lingkup Pengelolaan Lingkungan Perkebunan

Pengelolaan lingkungan perkebunan kelapa sawit mencakup upaya sistematis untuk mengendalikan dampak kegiatan budi daya, seperti pembukaan lahan, pemupukan, pengendalian gulma dan hama penyakit, panen, serta pengangkutan TBS, agar tidak menimbulkan kerusakan terhadap tanah, air, udara, dan keanekaragaman hayati di sekitar area perkebunan.

Pengelolaan lingkungan yang baik pada tingkat perkebunan menjadi fondasi penting sebelum limbah tersebut sampai pada tahap pengolahan di pabrik, karena praktik budi daya yang buruk dapat memperbesar volume dan kompleksitas limbah yang harus dikelola pada tahap berikutnya. Sebagai contoh, penggunaan pupuk dan pestisida yang tidak sesuai dosis dapat mencemari sumber air, yang pada akhirnya menambah beban pencemaran di badan air penerima yang sama dengan lokasi pembuangan efluen pabrik.

2.2 Dampak Lingkungan Kegiatan Perkebunan

Beberapa dampak lingkungan yang umum timbul dari kegiatan perkebunan kelapa sawit meliputi erosi dan degradasi lahan akibat pembukaan lahan yang tidak tepat, pencemaran air permukaan dan air tanah akibat residu pupuk dan pestisida, penurunan kualitas udara akibat pembakaran lahan, serta hilangnya habitat satwa liar akibat konversi lahan hutan menjadi perkebunan monokultur.

Dampak lain yang perlu mendapat perhatian adalah perubahan tata air (hidrologi) pada lahan gambut akibat pembuatan sistem drainase, yang dapat menyebabkan subsidensi (penurunan permukaan) gambut, peningkatan risiko kebakaran lahan pada musim kemarau, serta pelepasan karbon yang tersimpan di dalam tanah gambut ke atmosfer dalam bentuk CO₂.

2.3 Upaya Pengelolaan Lingkungan Perkebunan

Upaya pengelolaan lingkungan perkebunan dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan, antara lain penerapan praktik pertanian yang baik (Good Agricultural Practices/GAP), konservasi tanah dan air melalui pembuatan teras, rorak, dan tanaman penutup tanah (cover crop), pengendalian hama terpadu (PHT) untuk mengurangi penggunaan pestisida kimia, serta penetapan kawasan bernilai konservasi tinggi (High Conservation Value/HCV) di dalam areal perkebunan.

Pemantauan lingkungan secara berkala juga penting dilakukan, meliputi pemantauan kualitas air sungai, kualitas udara, tingkat erosi, serta keanekaragaman hayati, sebagai bagian dari pelaksanaan dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) atau Upaya Pengelolaan Lingkungan dan Upaya Pemantauan Lingkungan (UKL-UPL) (Susanto dkk., 2019).

2.4 Konservasi Tanah dan Air

Pada lahan perkebunan berlereng, konservasi tanah dan air menjadi prioritas untuk mencegah erosi dan kehilangan hara. Teknik yang umum diterapkan antara lain pembuatan teras individu (individual terrace) pada setiap pohon, pembuatan teras kontur pada lahan dengan kemiringan curam, pembuatan rorak (lubang penampung serasah dan air) di antara barisan tanaman, serta penanaman kacang penutup tanah (legume cover crop/LCC) seperti *Mucuna bracteata* dan *Pueraria javanica* pada tanaman belum menghasilkan (TBM) (Risza, 1994).

Selain manfaat konservasi, kacang penutup tanah juga berperan dalam fiksasi nitrogen dari udara, menekan pertumbuhan gulma, serta menjaga kelembapan tanah, sehingga mengurangi kebutuhan input pupuk nitrogen pada fase awal pertumbuhan tanaman.

2.5 Pengelolaan Kawasan Bernilai Konservasi Tinggi (HCV)

Kawasan HCV adalah areal di dalam atau berdekatan dengan perkebunan yang memiliki nilai penting bagi keanekaragaman hayati, jasa lingkungan, atau nilai sosial budaya masyarakat setempat, seperti daerah aliran sungai, hutan riparian, atau habitat satwa dilindungi. Perusahaan perkebunan yang menerapkan sertifikasi RSPO diwajibkan melakukan identifikasi, pemetaan, dan pengelolaan kawasan HCV sebagai bagian dari komitmen keberlanjutan (Manurung & Sitompul, 2018).

2.6 Pemantauan Kualitas Udara dan Kebisingan di Area Perkebunan

Selain pemantauan kualitas air, pengelolaan lingkungan perkebunan juga mencakup pemantauan kualitas udara, terutama terkait risiko kebakaran lahan pada musim kemarau dan penggunaan alat berat pada kegiatan pembukaan lahan atau replanting. Indikator kualitas udara yang umum dipantau meliputi konsentrasi partikulat (PM10), indeks standar pencemar udara (ISPU), serta titik panas (hotspot) yang terdeteksi melalui citra satelit sebagai sistem peringatan dini kebakaran lahan.

Pemantauan kebisingan juga diperlukan terutama di sekitar area pabrik dan jalan angkutan TBS yang dilalui kendaraan berat secara intensif, untuk memastikan tingkat kebisingan tidak melampaui baku tingkat kebisingan yang dapat mengganggu kenyamanan masyarakat di sekitar area operasional.

2.7 Pengelolaan Kebakaran Lahan dan Kabut Asap

Kebakaran lahan, khususnya pada lahan gambut, merupakan salah satu risiko lingkungan paling serius pada perkebunan kelapa sawit di Indonesia, karena dapat menimbulkan kabut asap lintas wilayah dan lintas negara, mengganggu kesehatan masyarakat, serta melepaskan emisi karbon dalam jumlah besar ke atmosfer (Yuliana & Ginting, 2015). Upaya pencegahan kebakaran meliputi pembangunan menara pemantau api, penyediaan regu pemadam kebakaran (RPK) dan peralatan pemadaman di setiap unit kebun, pembuatan sekat kanal pada lahan gambut untuk menjaga kelembapan, serta sistem peringatan dini berbasis pemantauan cuaca dan titik panas.

Studi Kasus: Pengelolaan Kawasan Riparian pada Perkebunan di Kalimantan Tengah

Sebuah perusahaan perkebunan kelapa sawit di Kalimantan Tengah menetapkan zona penyangga (buffer zone) selebar 50 meter di sepanjang aliran sungai yang melintasi areal konsesi sebagai kawasan HCV. Pada zona tersebut, vegetasi alami dipertahankan dan kegiatan pemupukan maupun aplikasi pestisida dihentikan untuk mencegah pencemaran badan air. Perusahaan juga membangun rorak dan teras individu pada blok tanaman berlereng untuk mengurangi risiko erosi menuju sungai.

Hasil pemantauan selama tiga tahun menunjukkan penurunan kekeruhan air sungai serta peningkatan populasi ikan lokal di sekitar zona penyangga, yang menjadi indikator perbaikan kualitas ekosistem perairan akibat pengelolaan lingkungan perkebunan yang lebih baik.

Studi Kasus Tambahan: Kemitraan Kebun Plasma dalam Pengelolaan Limbah

Sebuah PKS yang bermitra dengan kebun plasma masyarakat mengembangkan skema distribusi kompos TKKS gratis kepada petani plasma sebagai bagian dari kemitraan inti-plasma, dengan syarat petani turut berpartisipasi dalam pengangkutan kompos dari pabrik ke kebun masing-masing. Skema ini membantu petani plasma mengurangi biaya pupuk sekaligus memperbaiki kesuburan lahan mereka dalam jangka panjang.

Kemitraan semacam ini menunjukkan bahwa pengelolaan limbah kelapa sawit dapat memberikan manfaat yang meluas hingga ke tingkat petani kecil di sekitar wilayah

operasional pabrik, memperkuat hubungan sosial dan ekonomi antara perusahaan inti dan masyarakat plasma.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah perusahaan menetapkan zona penyangga selebar 50 meter di kedua sisi sungai sepanjang 8 km yang melintasi areal konsesinya. Hitunglah estimasi luas kawasan HCV riparian yang harus dipertahankan (dalam hektare)!

Pembahasan: Luas = panjang sungai $\times$ lebar total zona penyangga (dua sisi) = $8.000 \text{ m} \times (50 \text{ m} + 50 \text{ m}) = 8.000 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 800.000 \text{ m}^2$. Dikonversi ke hektare ($1 \text{ ha} = 10.000 \text{ m}^2$): $800.000 / 10.000 = 80$ hektare. Dengan demikian, perusahaan tersebut perlu mempertahankan sekitar 80 hektare kawasan riparian sebagai zona penyangga HCV di sepanjang sungai yang melintasi arealnya.

Rangkuman

1. Pengelolaan lingkungan perkebunan menjadi fondasi bagi pengelolaan limbah pada tahap pengolahan di pabrik.
2. Dampak lingkungan perkebunan meliputi erosi, pencemaran air, penurunan kualitas udara, dan perubahan hidrologi gambut.
3. Praktik GAP, konservasi tanah dan air, PHT, serta penetapan kawasan HCV merupakan upaya pengelolaan lingkungan perkebunan.
4. Konservasi tanah dan air melalui teras, rorak, dan kacang penutup tanah penting pada lahan berlereng.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan mengapa pengelolaan lingkungan pada tingkat perkebunan penting dilakukan sebelum tahap pengolahan di pabrik!
2. Sebutkan tiga dampak lingkungan yang dapat ditimbulkan oleh kegiatan perkebunan kelapa sawit!

3. Apa yang dimaksud dengan kawasan High Conservation Value (HCV) dan mengapa penting dipertahankan?
4. Jelaskan peran dokumen AMDAL/UKL-UPL dalam pengelolaan lingkungan perkebunan!
5. Berikan contoh penerapan konservasi tanah dan air pada lahan perkebunan berlereng!
6. Jelaskan dampak pembuatan sistem drainase pada lahan gambut terhadap emisi karbon!
7. Sebutkan manfaat penanaman kacang penutup tanah (LCC) selain fungsi konservasi!
8. Berdasarkan studi kasus, jelaskan manfaat penetapan zona penyangga (buffer zone) di sepanjang sungai!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan strategi yang dapat diterapkan perusahaan untuk mencegah kebakaran lahan gambut pada musim kemarau panjang.
2. Diskusikan bagaimana keberadaan zona penyangga riparian dapat memberikan manfaat baik bagi perusahaan maupun masyarakat sekitar.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Karena praktik budi daya yang buruk di kebun dapat memperbesar volume dan kompleksitas limbah yang harus dikelola pada tahap pengolahan di pabrik, misalnya melalui pencemaran sumber air bersama.
2. Erosi dan degradasi lahan, pencemaran air oleh residu pupuk/pestisida, dan penurunan kualitas udara akibat pembakaran lahan.

3. HCV adalah kawasan bernilai konservasi tinggi (habitat satwa, jasa lingkungan, nilai sosial budaya) yang wajib dipertahankan karena berperan penting bagi keseimbangan ekosistem dan komitmen keberlanjutan perusahaan.
4. AMDAL/UKL-UPL menjadi dasar hukum dan teknis bagi perusahaan untuk memantau serta mengelola dampak lingkungan secara terencana dan terukur.
5. Contohnya pembuatan teras individu, teras kontur, rorak, dan penanaman kacang penutup tanah (LCC) pada lahan berlereng.
6. Drainase pada lahan gambut menyebabkan subsidensi dan dekomposisi gambut yang melepaskan karbon tersimpan sebagai emisi CO₂ ke atmosfer.
7. Selain konservasi, LCC berperan dalam fiksasi nitrogen, menekan gulma, dan menjaga kelembapan tanah.
8. Zona penyangga riparian mencegah pencemaran langsung ke sungai dan terbukti memperbaiki kualitas air serta populasi biota perairan.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Kawasan bernilai konservasi tinggi yang wajib dipertahankan pada areal perkebunan dikenal dengan istilah...
 - A. AMDAL
 - B. UKL-UPL
 - C. HCV
 - D. GAP
 - E. LCC
2. Tanaman kacang penutup tanah yang ditanam pada tanaman belum menghasilkan berfungsi untuk...
 - A. Meningkatkan pH tanah secara drastis
 - B. Fiksasi nitrogen dan menekan gulma
 - C. Meningkatkan salinitas tanah
 - D. Mempercepat panen TBS

- E. Menggantikan pupuk kalium
3. Dampak drainase pada lahan gambut untuk perkebunan sawit adalah...
- A. Peningkatan kesuburan permanen
 - B. Subsiden dan pelepasan karbon
 - C. Penurunan risiko kebakaran
 - D. Peningkatan keanekaragaman hayati
 - E. Tidak ada dampak signifikan
4. Teknik konservasi tanah pada lahan berlereng yang berupa lubang penampung serasah disebut...
- A. Rorak
 - B. Teras kontur
 - C. Piringan
 - D. Gawangan
 - E. Parit drainase
5. Dokumen yang menjadi dasar pemantauan dampak lingkungan suatu usaha perkebunan adalah...
- A. ISPO
 - B. RSPO
 - C. AMDAL/UKL-UPL
 - D. SNI
 - E. HACCP
6. Zona penyangga di sepanjang sungai pada areal perkebunan bertujuan untuk...
- A. Meningkatkan hasil panen
 - B. Mencegah pencemaran langsung ke badan air
 - C. Menambah luas tanam
 - D. Mengurangi biaya pupuk
 - E. Mempercepat replanting

7. Indikator kualitas udara yang umum dipantau terkait risiko kebakaran lahan meliputi...

- A. PM10 dan ISPU
- B. Salinitas tanah
- C. Debit air sungai
- D. Kadar garam udara
- E. pH tanah

8. Sistem yang dibangun untuk menjaga kelembapan lahan gambut guna mencegah kebakaran disebut...

- A. Rorak
- B. Sekat kanal
- C. Terasering
- D. Piringan
- E. Cover crop

9. *Mucuna bracteata* dan *Pueraria javanica* merupakan contoh...

- A. Hama tanaman
- B. Kacangan penutup tanah (LCC)
- C. Jenis pupuk kimia
- D. Jenis cangkang
- E. Mikroorganisme dekomposer

10. Manfaat pemantauan kebisingan di sekitar pabrik dan jalur angkutan TBS adalah...

- A. Meningkatkan produksi CPO
- B. Menjaga kenyamanan masyarakat sekitar
- C. Mengurangi kebutuhan pupuk
- D. Mempercepat panen
- E. Menambah luas tanam

Kunci Jawaban Soal Objektif

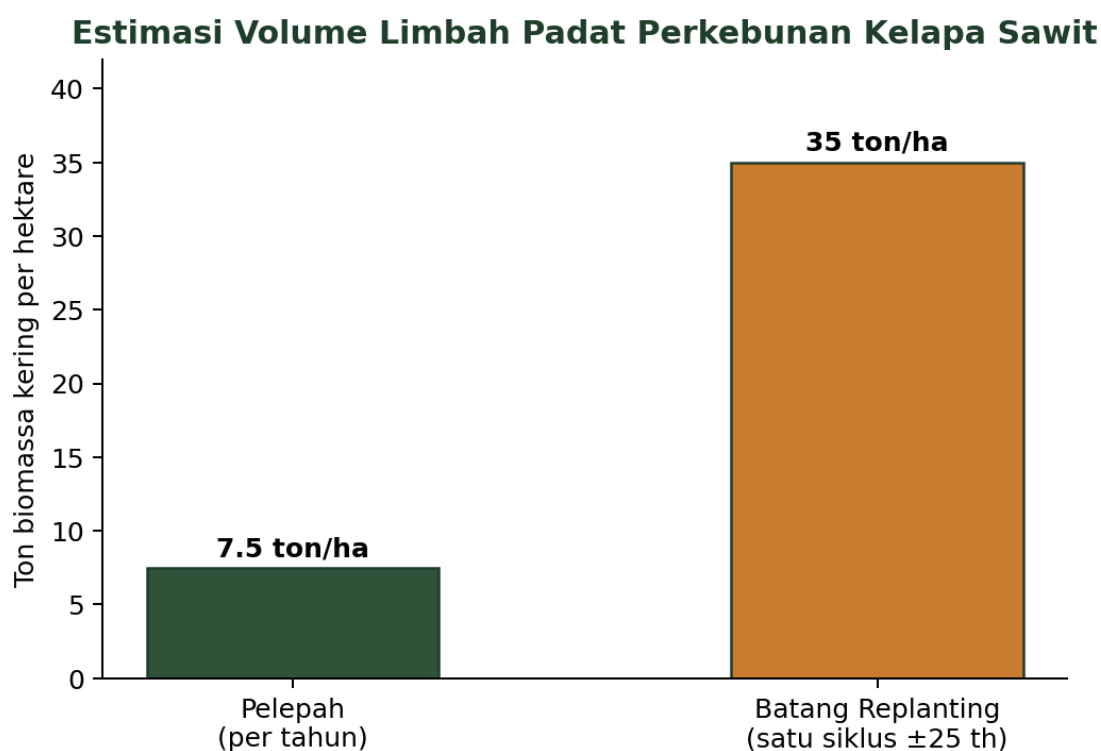
1C 2B 3B 4A 5C 6B 7A 8B 9B 10B

BAB 3. Limbah Padat Perkebunan Kelapa Sawit

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Mengidentifikasi jenis dan karakteristik limbah padat perkebunan kelapa sawit
2. Menjelaskan potensi dan kendala pemanfaatan limbah padat perkebunan
3. Menghitung estimasi volume limbah padat perkebunan berdasarkan luas areal



Gambar 3.1 Ilustrasi terkait materi Bab 3: Limbah Padat Perkebunan Kelapa Sawit

3.1 Jenis Limbah Padat Perkebunan

Limbah padat perkebunan kelapa sawit terutama berasal dari kegiatan pemeliharaan tanaman dan peremajaan (replanting). Jenis limbah padat yang dihasilkan meliputi pelepah daun hasil pruning yang dilakukan secara rutin setiap panen, batang kelapa sawit tua hasil penebangan pada saat replanting, serta sisa gulma dan tanaman penutup tanah.

3.2 Karakteristik dan Volume Limbah

Pelepah daun kelapa sawit dihasilkan dalam jumlah besar karena setiap pohon menghasilkan sekitar 20-25 pelepah per tahun dengan berat rata-rata 2-3 kg per pelepah dalam kondisi kering (Lubis, 1992). Dengan populasi tanaman sekitar 130-143 pohon per hektare, setiap hektare perkebunan dapat menghasilkan sekitar 6-9 ton pelepah kering per tahun.

Batang kelapa sawit hasil replanting memiliki volume yang sangat besar, diperkirakan sekitar 130-143 batang per hektare dengan berat kering per batang mencapai 200-300 kilogram, sehingga menghasilkan biomassa lignoselulosa dalam jumlah sangat besar, yaitu sekitar 30-40 ton per hektare, pada satu siklus tanam (umumnya 25 tahun).

Secara kimiawi, pelepah dan batang kelapa sawit mengandung selulosa sekitar 35-45%, hemiselulosa sekitar 20-25%, dan lignin sekitar 15-20%, komposisi yang menjadikannya berpotensi sebagai bahan baku pakan ternak, kompos, bahan bangunan, maupun bahan baku industri pulp dan bioenergi (Wulandari & Santoso, 2017).

3.3 Estimasi Volume Limbah pada Skala Kebun

Pemahaman terhadap estimasi volume limbah penting dalam perencanaan pengelolaan limbah pada skala kebun. Sebagai ilustrasi, sebuah kebun seluas 1.000 hektare dengan populasi rata-rata 136 pohon/ha akan menghasilkan sekitar 7.000-9.000 ton pelepah kering per tahun dari kegiatan pruning rutin, sementara pada saat replanting seluruh areal tersebut dapat menghasilkan sekitar 30.000-40.000 ton batang kering yang harus dikelola dalam periode replanting (umumnya 1-2 tahun).

Tabel 3.1 Estimasi Volume Limbah pada Skala Kebun

Parameter	Nilai per Hektare	Keterangan
Populasi tanaman	130-143 pohon	Bergantung jarak tanam
Pelepah per tahun	6-9 ton kering	Dari pruning rutin
Biomassa batang (replanting)	30-40 ton kering	Satu siklus tanam $\pm$ 25 tahun
Kadar selulosa	35-45%	Basis bahan kering
Kadar lignin	15-20%	Basis bahan kering

3.4 Potensi dan Kendala Pemanfaatan

Pelepah kelapa sawit umumnya dibiarkan tergeletak di gawangan sebagai mulsa alami yang membantu menjaga kelembapan tanah, menekan pertumbuhan gulma, serta menyumbang bahan organik saat terdekomposisi (Batubara & Rangkuti, 2013). Sementara itu, batang hasil replanting dapat dicacah dan dikembalikan ke lahan (chipping and mulching) atau diolah menjadi produk turunan seperti papan partikel dan pakan ternak fermentasi.

Kendala utama dalam pemanfaatan limbah padat perkebunan adalah lokasinya yang tersebar luas di area perkebunan, biaya pengumpulan dan transportasi yang tinggi, serta keterbatasan teknologi pengolahan di tingkat lapangan sehingga sebagian besar limbah masih dibiarkan terdekomposisi secara alami (Pahan, 2018).

3.5 Pemanfaatan Pelepah sebagai Bahan Baku Industri Kreatif

Selain pemanfaatan sebagai mulsa dan pakan ternak, pelepah kelapa sawit mulai dikembangkan sebagai bahan baku industri kreatif, seperti kerajinan tangan, papan komposit ringan, dan bahan baku kertas semi-industri pada skala usaha mikro kecil dan menengah (UMKM) di beberapa wilayah sentra perkebunan. Serat pelepah yang telah diolah dapat dianyam atau dicetak menjadi produk bernilai tambah seperti tas, wadah, atau panel dekorasi interior.

3.6 Tantangan Logistik Pengumpulan Limbah Perkebunan

Tantangan logistik menjadi salah satu hambatan utama dalam pemanfaatan limbah padat perkebunan secara komersial, mengingat pelepah dan batang tersebar di seluruh areal kebun yang dapat mencapai ribuan hektare. Biaya pengumpulan, pencacahan di lapangan, dan transportasi menuju unit pengolahan sering kali lebih tinggi dibandingkan nilai jual produk akhir, sehingga diperlukan inovasi dalam desain alat pencacah portabel dan skema kemitraan dengan pihak ketiga untuk menekan biaya logistik.

Studi Kasus: Pemanfaatan Batang Sawit Hasil Replanting sebagai Pakan Ternak Fermentasi

Pada program replanting seluas 500 hektare di Sumatera Selatan, perusahaan bekerja sama dengan kelompok peternak setempat untuk memanfaatkan empulur batang kelapa sawit sebagai bahan baku pakan ternak sapi melalui proses fermentasi

menggunakan probiotik. Batang yang telah ditebang dicacah menjadi ukuran kecil, kemudian empulurnya diperas untuk diambil niranya, dan ampasnya difermentasi selama beberapa hari sebelum diberikan sebagai pakan tambahan bagi ternak.

Program ini tidak hanya membantu perusahaan mengurangi volume limbah batang yang harus dikelola pada masa replanting, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi bagi peternak sekitar berupa akses pakan alternatif dengan biaya rendah, sekaligus memperkuat hubungan sosial antara perusahaan dan masyarakat sekitar kebun.

Studi Kasus Tambahan: Efisiensi Energi melalui Kombinasi Cogeneration dan Biogas

Sebuah PKS menggabungkan sistem cogeneration berbahan bakar cangkang-serat dengan pembangkit listrik tenaga biogas dari POME untuk memaksimalkan pemanfaatan energi internal. Pada musim puncak produksi TBS, kebutuhan listrik pabrik terpenuhi sepenuhnya dari kombinasi kedua sumber energi tersebut, bahkan menghasilkan surplus listrik yang dialirkan ke fasilitas perumahan karyawan di sekitar pabrik.

Pendekatan kombinasi ini menunjukkan bagaimana integrasi berbagai sumber energi berbasis limbah dapat meningkatkan ketahanan energi pabrik sekaligus memberikan manfaat tambahan bagi kesejahteraan karyawan yang tinggal di kompleks perumahan sekitar pabrik.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah kebun seluas 3.200 hektare menghasilkan rata-rata 7,5 ton pelepah kering per hektare per tahun. Hitunglah total produksi pelepah kering kebun tersebut dalam satu tahun, serta perkiraan produksi per bulan!

Pembahasan: Total per tahun = $3.200 \text{ ha} \times 7,5 \text{ ton/ha} = 24.000 \text{ ton per tahun}$.
Perkiraan per bulan = $24.000 \text{ ton} / 12 \text{ bulan} = 2.000 \text{ ton per bulan}$. Angka ini menunjukkan skala biomassa pelepah yang harus dikelola secara rutin setiap bulannya, yang pada praktiknya sebagian besar dibiarkan sebagai mulsa alami di gawangan tanaman.

Rangkuman

1. Limbah padat perkebunan terdiri atas pelepah hasil pruning dan batang hasil replanting yang jumlahnya sangat besar.
2. Kandungan lignoselulosa pada limbah ini membuka peluang pemanfaatan sebagai mulsa, kompos, pakan ternak, dan bahan baku industri.
3. Estimasi volume limbah penting untuk perencanaan pengelolaan pada skala kebun, terutama saat periode replanting.
4. Kendala utama pemanfaatan adalah sebaran lokasi yang luas dan biaya logistik yang tinggi.

Soal Latihan (Esai)

1. Sebutkan dua jenis limbah padat utama yang dihasilkan dari kegiatan perkebunan kelapa sawit!
2. Mengapa batang hasil replanting menghasilkan volume biomassa yang sangat besar?
3. Jelaskan manfaat pelepah kelapa sawit apabila dibiarkan sebagai mulsa di gawangan!
4. Apa kendala utama dalam pemanfaatan limbah padat perkebunan kelapa sawit secara komersial?
5. Jelaskan konsep chipping and mulching pada limbah batang kelapa sawit hasil replanting!
6. Hitunglah perkiraan jumlah pelepah kering yang dihasilkan kebun seluas 2.500 hektare dalam satu tahun (gunakan asumsi 7 ton/ha/tahun)!
7. Jelaskan manfaat sosial-ekonomi dari program pemanfaatan batang sawit sebagai pakan ternak seperti pada studi kasus!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan peluang dan tantangan pengembangan industri kreatif berbahan baku pelepah kelapa sawit di wilayah sentra perkebunan.

2. Diskusikan strategi menekan biaya logistik pengumpulan limbah padat perkebunan pada kebun berskala luas.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Pelepah hasil pruning dan batang hasil replanting.
2. Karena populasi tanaman per hektare besar dan berat kering per batang tinggi, menghasilkan biomassa dalam jumlah besar pada satu siklus tanam.
3. Mulsa pelepah menjaga kelembapan tanah, menekan gulma, dan menyumbang bahan organik saat terdekomposisi.
4. Sebaran lokasi limbah yang luas di kebun serta biaya pengumpulan dan transportasi yang tinggi.
5. Batang dicacah menjadi serpihan kecil kemudian disebar kembali ke lahan sebagai mulsa alih-alih dibakar atau dibuang.
6. $2.500 \text{ ha} \times 7 \text{ ton/ha/tahun} = 17.500 \text{ ton}$ pelepah kering per tahun.
7. Memberikan akses pakan alternatif murah bagi peternak sekaligus mengurangi volume limbah batang yang harus dikelola perusahaan saat replanting.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Limbah padat yang dihasilkan dari kegiatan pruning rutin adalah...
 - A. Batang tua
 - B. Pelepah daun
 - C. TKKS
 - D. Cangkang
 - E. POME
2. Volume biomassa terbesar pada limbah perkebunan dihasilkan pada saat...

- A. Panen harian
 - B. Pemupukan
 - C. Replanting
 - D. Penyemprotan gulma
 - E. Sensus pohon
3. Kandungan utama penyusun dinding sel pelepah dan batang kelapa sawit adalah...
- A. Protein
 - B. Lignoselulosa
 - C. Lemak
 - D. Karbohidrat sederhana
 - E. Mineral
4. Manfaat utama pelepah yang dibiarkan sebagai mulsa di gawangan adalah...
- A. Meningkatkan hama
 - B. Menjaga kelembapan dan menekan gulma
 - C. Mempercepat erosi
 - D. Mengurangi bahan organik tanah
 - E. Meningkatkan salinitas
5. Kendala utama pemanfaatan komersial limbah padat perkebunan adalah...
- A. Tidak ada kandungan hara
 - B. Biaya logistik dan sebaran lokasi luas
 - C. Dilarang undang-undang
 - D. Tidak dapat terurai
 - E. Bersifat B3
6. Chipping and mulching pada batang hasil replanting bertujuan untuk...
- A. Membakar batang
 - B. Menjual batang utuh

- C. Mencacah dan mengembalikan ke lahan
 - D. Mengekspor batang
 - E. Membuat kertas
7. Produk industri kreatif yang dapat dihasilkan dari serat pelepah kelapa sawit adalah...
- A. Biogas
 - B. Kerajinan tangan dan panel dekorasi
 - C. Pupuk NPK
 - D. Minyak sawit
 - E. Semen
8. Populasi tanaman kelapa sawit per hektare pada umumnya berkisar antara...
- A. 10-20 pohon
 - B. 50-70 pohon
 - C. 130-143 pohon
 - D. 300-350 pohon
 - E. 500 pohon
9. Siklus replanting kelapa sawit pada umumnya dilakukan setiap...
- A. 5 tahun
 - B. 10 tahun
 - C. 15 tahun
 - D. 25 tahun
 - E. 40 tahun
10. Kandungan lignin pada pelepah dan batang kelapa sawit berkisar antara...
- A. 1-5%
 - B. 15-20%
 - C. 35-45%
 - D. 60-70%

E. 80-90%

Kunci Jawaban Soal Objektif

1B 2C 3B 4B 5B 6C 7B 8C 9D 10B

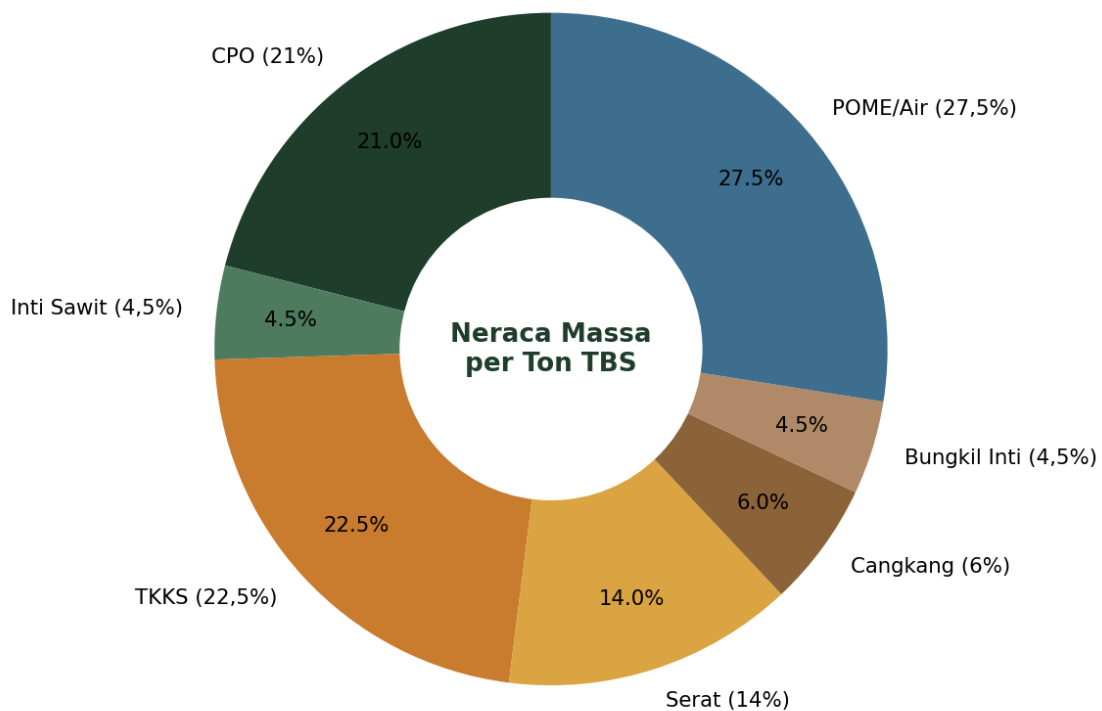
BAB 4. Limbah Padat Pabrik Kelapa Sawit

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Mengidentifikasi jenis-jenis limbah padat yang dihasilkan pabrik kelapa sawit
2. Menjelaskan karakteristik dan potensi pemanfaatan tandan kosong, serat, cangkang, dan bungkil inti sawit
3. Menghitung neraca massa limbah padat pabrik kelapa sawit

Ilustrasi Neraca Massa Pengolahan Tandan Buah Segar (TBS)



Gambar 4.1 Ilustrasi terkait materi Bab 4: Limbah Padat Pabrik Kelapa Sawit

4.1 Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) atau empty fruit bunch (EFB) merupakan limbah padat terbesar yang dihasilkan pabrik kelapa sawit, dengan jumlah sekitar 22-23% dari

berat TBS yang diolah (Naibaho, 1996). TKKS memiliki kandungan air sekitar 60-65%, selulosa sekitar 40-45%, dan unsur hara kalium yang cukup tinggi, sehingga sangat potensial dimanfaatkan sebagai bahan baku kompos, mulsa, maupun bahan baku pulp dan bioenergi.

4.2 Serat Perasan (Fibre) dan Cangkang (Shell)

Serat perasan (mesocarp fibre) dihasilkan dari proses pengempaan (pressing) daging buah sawit dengan proporsi sekitar 13-15% dari berat TBS, sedangkan cangkang (shell) dihasilkan dari proses pemecahan biji dengan proporsi sekitar 5-7% dari berat TBS (Simanjuntak & Purnama, 2018). Kedua jenis limbah ini memiliki nilai kalor yang cukup tinggi sehingga umumnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap dan energi listrik yang digunakan dalam proses pengolahan di pabrik.

4.3 Bungkil Inti Sawit (Palm Kernel Cake/Expeller)

Bungkil inti sawit merupakan hasil samping dari proses ekstraksi minyak inti sawit (PKO), berupa padatan sisa pengempaan inti sawit yang masih mengandung protein sekitar 14-18% dan serat kasar cukup tinggi (Rachmawati & Suryadi, 2020). Limbah ini banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku pakan ternak ruminansia karena kandungan nutrisinya yang baik meskipun memiliki kadar serat kasar yang relatif tinggi, sehingga umumnya perlu dikombinasikan dengan bahan pakan lain.

4.4 Neraca Massa Limbah Padat Pabrik

Secara umum, dari setiap ton TBS yang diolah, pabrik kelapa sawit menghasilkan sekitar 220-230 kg TKKS, 130-150 kg serat, 50-70 kg cangkang, dan sekitar 40-50 kg bungkil inti sawit, di samping produk utama berupa CPO sekitar 20-22% dan inti sawit sekitar 4-5%. Pemahaman terhadap neraca massa ini penting sebagai dasar perencanaan sistem pengelolaan dan pemanfaatan limbah secara terpadu di setiap pabrik (Hidayat & Nugroho, 2015).

Tabel 4.1 Neraca Massa Limbah Padat Pabrik

Komponen	Proporsi terhadap TBS	Pemanfaatan Umum
----------	-----------------------	------------------

Komponen	Proporsi terhadap TBS	Pemanfaatan Umum
CPO	20-22%	Produk utama
Inti sawit (kernel)	4-5%	Bahan baku PKO
TKKS	22-23%	Kompos, mulsa, bahan baku pulp
Serat (fibre)	13-15%	Bahan bakar boiler
Cangkang (shell)	5-7%	Bahan bakar boiler, arang
Bungkil inti sawit	4-5%	Pakan ternak
POME	60-80% (volume)	Biogas, land application

4.5 Contoh Perhitungan Neraca Massa

Sebagai ilustrasi, apabila sebuah pabrik kelapa sawit mengolah 1.000 ton TBS dalam satu hari, maka dapat diperkirakan produksi limbah padat sebagai berikut: TKKS sekitar 220-230 ton, serat sekitar 130-150 ton, cangkang sekitar 50-70 ton, dan bungkil inti sawit sekitar 40-50 ton. Perhitungan semacam ini menjadi dasar bagi manajemen pabrik dalam merencanakan kapasitas unit pengomposan, kebutuhan bahan bakar boiler, serta kapasitas gudang penyimpanan bungkil inti sawit sebelum dipasarkan.

4.6 Standar Mutu Bungkil Inti Sawit untuk Pakan Ternak

Agar dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai bahan baku pakan ternak, bungkil inti sawit perlu memenuhi standar mutu tertentu, seperti kadar air maksimum sekitar 12-14%, kadar protein kasar minimum sekitar 14-16%, serta kadar minyak sisa yang tidak berlebihan karena dapat memengaruhi daya simpan produk. Pengendalian mutu dilakukan melalui pengujian laboratorium secara berkala terhadap setiap batch produksi sebelum dipasarkan kepada industri pakan ternak.

4.7 Penyimpanan dan Penanganan Limbah Padat Pabrik

Penyimpanan limbah padat pabrik seperti cangkang dan serat perlu memperhatikan aspek keamanan terhadap risiko kebakaran spontan (self-heating), mengingat sifat biomassa yang dapat mengalami dekomposisi dan peningkatan suhu apabila ditumpuk dalam kondisi lembap dan volume besar dalam waktu lama. Oleh karena itu, area penyimpanan (bunker) perlu dirancang dengan sistem sirkulasi udara yang baik,

pemantauan suhu tumpukan secara berkala, serta rotasi penggunaan bahan bakar boiler mengikuti prinsip first-in-first-out (FIFO).

Studi Kasus: Perencanaan Kapasitas Unit Kompos Berdasarkan Neraca Massa TKKS

Sebuah pabrik kelapa sawit berkapasitas 60 ton TBS/jam beroperasi rata-rata 20 jam per hari, sehingga mengolah sekitar 1.200 ton TBS per hari. Berdasarkan neraca massa, pabrik tersebut menghasilkan sekitar 264-276 ton TKKS per hari. Manajemen pabrik kemudian merancang unit pengomposan dengan kapasitas pengolahan 270 ton TKKS per hari menggunakan metode windrow dengan waktu proses 45 hari, sehingga membutuhkan area pengomposan yang cukup luas untuk menampung tumpukan kompos pada berbagai tahap kematangan secara bersamaan.

Perencanaan yang mendasarkan pada neraca massa yang akurat ini membantu pabrik menghindari penumpukan TKKS yang berlebihan di area terbuka, yang berpotensi menimbulkan bau dan menjadi sumber genangan air yang menciptakan habitat bagi vektor penyakit seperti nyamuk.

Studi Kasus Tambahan: Restorasi Lahan Gambut Pascakebakaran

Setelah mengalami kebakaran lahan gambut pada musim kemarau, sebuah perusahaan perkebunan melaksanakan program restorasi meliputi pembasahan kembali (rewetting) lahan gambut melalui penyekatan kanal, penanaman kembali vegetasi asli pada zona konservasi, serta penguatan tim pencegahan kebakaran berbasis masyarakat desa sekitar.

Program restorasi ini menjadi pembelajaran penting bahwa pengelolaan lingkungan perkebunan tidak hanya bersifat preventif, tetapi juga memerlukan kesiapan rencana pemulihan (recovery plan) apabila insiden lingkungan besar seperti kebakaran lahan gambut terjadi.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah pabrik mengolah 900 ton TBS/hari. Dengan menggunakan proporsi umum (TKKS 22%, serat 14%, cangkang 6%, bungkil inti sawit 4,5%), hitunglah masing-masing jumlah limbah padat yang dihasilkan per hari!

Pembahasan: TKKS = $900 \times 22\% = 198$ ton/hari. Serat = $900 \times 14\% = 126$ ton/hari. Cangkang = $900 \times 6\% = 54$ ton/hari. Bungkil inti sawit = $900 \times 4,5\% = 40,5$ ton/hari. Total limbah padat tersebut menjadi dasar perhitungan kapasitas unit pengomposan,

kebutuhan bahan bakar boiler harian, dan kapasitas gudang penyimpanan bungkil inti sawit pabrik tersebut.

Rangkuman

5. Limbah padat pabrik kelapa sawit terdiri atas TKKS, serat, cangkang, dan bungkil inti sawit dengan proporsi dan karakteristik berbeda.
6. Serat dan cangkang umumnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler, sedangkan TKKS potensial sebagai kompos dan bungkil inti sawit sebagai pakan ternak.
7. Neraca massa limbah padat menjadi dasar perencanaan sistem pengelolaan limbah terpadu di pabrik, termasuk perencanaan kapasitas unit kompos.

Soal Latihan (Esai)

1. Sebutkan empat jenis limbah padat utama yang dihasilkan pabrik kelapa sawit beserta perkiraan proporsinya terhadap berat TBS!
2. Mengapa serat dan cangkang lebih banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar dibandingkan TKKS?
3. Jelaskan potensi pemanfaatan bungkil inti sawit sebagai pakan ternak!
4. Apa manfaat memahami neraca massa limbah padat pabrik kelapa sawit?
5. Jika sebuah pabrik mengolah 1.500 ton TBS per hari, perkirakan jumlah TKKS, serat, dan cangkang yang dihasilkan dalam satu hari!
6. Berdasarkan studi kasus, jelaskan mengapa perencanaan kapasitas unit kompos perlu didasarkan pada neraca massa yang akurat!
7. Jelaskan risiko yang dapat timbul apabila TKKS dibiarkan menumpuk tanpa pengolahan!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan risiko yang dapat timbul apabila cangkang dan serat disimpan dalam tumpukan besar tanpa sirkulasi udara yang memadai.
2. Diskusikan pentingnya standar mutu bungkil inti sawit bagi industri pakan ternak yang menggunakannya sebagai bahan baku.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. TKKS (22-23%), serat (13-15%), cangkang (5-7%), bungkil inti sawit (4-5%) dari berat TBS.
2. Karena nilai kalornya lebih tinggi dan kadar airnya lebih rendah dibandingkan TKKS yang basah dan lebih cocok untuk kompos.
3. Kandungan protein dan seratnya menjadikannya bahan pakan tambahan yang baik untuk ternak ruminansia, meski perlu dikombinasikan bahan pakan lain.
4. Menjadi dasar perencanaan kapasitas unit pengolahan (kompos, boiler, gudang) agar sesuai dengan volume limbah aktual yang dihasilkan.
5. $1.500 \text{ ton} \times 22-23\% \approx 330-345 \text{ ton TKKS}$; $\times 13-15\% \approx 195-225 \text{ ton serat}$; $\times 5-7\% \approx 75-105 \text{ ton cangkang}$.
6. Agar kapasitas unit kompos tidak under-capacity (menumpuk) atau over-capacity (boros investasi) dibandingkan volume TKKS aktual.
7. Berisiko menimbulkan bau, genangan air (habitat vektor penyakit), dan pencemaran akibat lindi (leachate) yang tidak terkelola.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Limbah padat pabrik kelapa sawit dengan proporsi terbesar terhadap berat TBS adalah...
 - A. Cangkang
 - B. Serat

- C. TKKS
 - D. Bungkil inti sawit
 - E. Abu boiler
2. Bahan bakar boiler pabrik kelapa sawit umumnya berasal dari...
- A. TKKS dan POME
 - B. Cangkang dan serat
 - C. Bungkil inti sawit
 - D. Batu bara
 - E. Solar
3. Bungkil inti sawit paling banyak dimanfaatkan sebagai...
- A. Bahan bakar boiler
 - B. Kompos
 - C. Pakan ternak
 - D. Land application
 - E. Biochar
4. Neraca massa limbah padat pabrik penting untuk merencanakan...
- A. Harga jual CPO
 - B. Kapasitas unit pengolahan limbah
 - C. Gaji karyawan
 - D. Jadwal panen kebun
 - E. Rute distribusi CPO
5. Perkiraan proporsi cangkang terhadap berat TBS yang diolah adalah sekitar...
- A. 1-2%
 - B. 5-7%
 - C. 13-15%
 - D. 22-23%

E. 30-35%

6. Risiko yang dapat timbul apabila TKKS dibiarkan menumpuk tanpa pengolahan adalah...

- A. Peningkatan hasil panen
- B. Bau dan genangan air sumber vektor penyakit
- C. Penurunan biaya operasional
- D. Peningkatan nilai jual TBS
- E. Tidak ada risiko

7. Kadar air maksimum yang disyaratkan pada bungkil inti sawit untuk pakan ternak adalah...

- A. 5%
- B. 12-14%
- C. 25%
- D. 40%
- E. 60%

8. Risiko utama penyimpanan cangkang dan serat dalam tumpukan besar dan lembap adalah...

- A. Penyusutan volume
- B. Self-heating/kebakaran spontan
- C. Peningkatan nilai kalor
- D. Penurunan kadar air otomatis
- E. Tidak ada risiko

9. Prinsip rotasi penggunaan bahan bakar boiler yang dianjurkan adalah...

- A. LIFO
- B. FIFO
- C. Acak (random)
- D. First-in-last-out

E. Tidak perlu rotasi

10. Produk utama yang dihasilkan bersama limbah padat dari pengolahan TBS adalah...

A. Pupuk NPK

B. CPO dan inti sawit

C. Biogas

D. Kompos

E. Bio-oil

Kunci Jawaban Soal Objektif

1C 2B 3C 4B 5B 6B 7B 8B 9B 10B

BAB 5. PENGELOLAAN LIMBAH CAIR PABRIK KELAPA SAWIT (POME)

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan karakteristik limbah cair pabrik kelapa sawit (POME)
2. Memahami sistem pengolahan POME secara konvensional (kolam anaerobik-aerobik)
3. Menjelaskan parameter baku mutu limbah cair kelapa sawit
4. Menjelaskan prinsip land application sebagai alternatif pemanfaatan efluen POME

Diagram Alir Sistem Pengolahan POME (Kolam Terbuka)



Biogas ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) ditangkap dari Kolam Anaerobik apabila menggunakan sistem tertutup (covered lagoon)

Gambar 5.1 Ilustrasi terkait materi Bab 5: Pengelolaan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (POME)

5.1 Karakteristik POME

Palm Oil Mill Effluent (POME) adalah limbah cair yang dihasilkan dari proses pengolahan TBS, terutama berasal dari air kondensat rebusan (sterilizer condensate) sekitar 36%, air buangan klarifikasi minyak (clarification wastewater) sekitar 60%, dan air buangan hidrosiklon inti sawit sekitar 4%. Setiap ton TBS yang diolah menghasilkan sekitar 0,6-0,8 meter kubik POME (Yacob et al., 2006).

POME memiliki karakteristik sebagai limbah organik dengan kandungan Biochemical Oxygen Demand (BOD) dan Chemical Oxygen Demand (COD) yang sangat tinggi, masing-masing dapat mencapai 20.000-30.000 mg/L dan 40.000-60.000 mg/L, disertai

kandungan minyak dan lemak sekitar 4.000-6.000 mg/L, padatan tersuspensi (TSS) sekitar 15.000-20.000 mg/L, serta suhu yang masih cukup panas (80-90°C) saat keluar dari proses produksi, dengan pH cenderung asam (4,0-5,0).

5.2 Sistem Pengolahan POME Konvensional

Sistem pengolahan POME yang paling umum diterapkan di Indonesia adalah sistem kolam terbuka (open pond system) yang terdiri atas rangkaian kolam anaerobik, fakultatif, dan aerobik (Ariwibowo & Prasetya, 2019). POME yang masih panas terlebih dahulu dialirkan ke kolam pendingin (cooling pond) dan kolam pengasaman (acidification pond) untuk menurunkan suhu dan pH sebelum masuk ke kolam anaerobik utama, dengan waktu tinggal (retention time) pada kolam anaerobik dapat mencapai 45-60 hari.

Pada kolam anaerobik, bahan organik diuraikan oleh bakteri anaerob menghasilkan biogas yang sebagian besar terdiri atas metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂). Efluen dari kolam anaerobik selanjutnya dialirkan ke kolam fakultatif dan aerobik untuk menurunkan kadar BOD/COD lebih lanjut sebelum dibuang ke badan air atau diaplikasikan ke lahan (land application).

5.3 Baku Mutu dan Pemantauan Limbah Cair

Pemerintah menetapkan baku mutu limbah cair bagi usaha industri minyak sawit, yang mencakup parameter BOD (maksimal 100 mg/L), COD (maksimal 350 mg/L), minyak dan lemak (maksimal 25 mg/L), total nitrogen (maksimal 50 mg/L), serta pH (6-9), sebagai syarat sebelum limbah cair dibuang ke lingkungan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014). Pemantauan kualitas efluen dilakukan secara berkala melalui pengambilan sampel dan analisis laboratorium untuk memastikan hasil olahan memenuhi baku mutu yang berlaku sebelum dibuang atau dimanfaatkan lebih lanjut.

Tabel 5.1 Baku Mutu dan Pemantauan Limbah Cair

Parameter	Kadar POME Mentah (perkiraan)	Baku Mutu Buang (maks.)
BOD	20.000-30.000 mg/L	100 mg/L
COD	40.000-60.000 mg/L	350 mg/L

Parameter	Kadar POME Mentah (perkiraan)	Baku Mutu Buang (maks.)
Minyak & Lemak	4.000-6.000 mg/L	25 mg/L
TSS	15.000-20.000 mg/L	250 mg/L
pH	4,0-5,0	6-9

5.4 Pemanfaatan Efluen: Land Application

Salah satu alternatif pemanfaatan efluen POME yang telah diolah adalah aplikasi lahan (land application), yaitu mengalirkan efluen ke areal perkebunan melalui jaringan flatbed atau longbed sebagai sumber air dan hara bagi tanaman kelapa sawit, sekaligus mengurangi kebutuhan pupuk anorganik (Handayani & Pratama, 2014). Praktik ini harus dilakukan dengan pengawasan ketat terhadap dosis dan lokasi aplikasi agar tidak mencemari sumber air tanah, dan umumnya memerlukan izin khusus dari instansi lingkungan hidup setempat.

Dosis aplikasi efluen umumnya ditentukan berdasarkan kapasitas serap tanah dan kebutuhan hara tanaman, dengan mempertimbangkan jarak minimum dari sumber air, sumur penduduk, dan pemukiman, serta rotasi blok aplikasi untuk mencegah kejenuhan tanah menampung beban organik dan hara secara berlebihan.

5.5 Teknologi Alternatif Pengolahan POME

Selain sistem kolam konvensional, terdapat beberapa teknologi alternatif pengolahan POME yang mulai diterapkan untuk meningkatkan efisiensi dan menghemat lahan, antara lain sistem Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) yang menggunakan reaktor tertutup dengan waktu tinggal lebih singkat, sistem membran (membrane bioreactor) untuk menghasilkan efluen dengan kualitas lebih tinggi, serta teknologi evaporasi dan pengeringan untuk menghasilkan padatan yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pupuk granul.

Pemilihan teknologi alternatif ini umumnya mempertimbangkan ketersediaan lahan, karena sistem kolam konvensional membutuhkan area yang luas, sementara sistem reaktor tertutup seperti UASB dapat menghemat lahan secara signifikan meskipun dengan biaya investasi dan kebutuhan keahlian operasional yang lebih tinggi.

5.6 Pengelolaan Lumpur (Sludge) Hasil Pengolahan POME

Proses pengolahan POME, baik pada sistem kolam maupun reaktor tertutup, akan menghasilkan lumpur endapan (sludge) yang perlu dikelola secara berkala melalui pengurasan kolam. Lumpur ini masih mengandung bahan organik dan hara yang cukup tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan campuran kompos, dengan tetap memperhatikan kandungan logam berat dan patogen melalui pengujian laboratorium sebelum diaplikasikan ke lahan pertanian.

Studi Kasus: Optimalisasi Sistem Kolam dan Land Application pada PKS di Sumatera Utara

Sebuah pabrik kelapa sawit di Sumatera Utara mengalami kendala kapasitas kolam pengolahan yang tidak mampu menampung debit POME akibat peningkatan kapasitas olah pabrik. Perusahaan kemudian melakukan penataan ulang rangkaian kolam, penambahan kolam aerasi, serta memasang aerator mekanis pada kolam fakultatif untuk mempercepat penurunan BOD/COD. Selain itu, sebagian efluen dari kolam akhir dialirkan melalui sistem flatbed ke blok kebun yang membutuhkan tambahan hara, dengan rotasi blok setiap enam bulan untuk mencegah kejenuhan lahan.

Hasil pemantauan menunjukkan bahwa kualitas efluen akhir yang dibuang ke badan air berhasil memenuhi baku mutu yang ditetapkan, sementara blok kebun yang menerima land application menunjukkan penurunan kebutuhan pupuk kalium sekitar 20-30 persen dibandingkan blok yang tidak menerima aplikasi efluen.

Studi Kasus Tambahan: Diversifikasi Produk dari TKKS menjadi Serat Rayon

Sebuah konsorsium riset dan industri mengembangkan teknologi ekstraksi selulosa dari TKKS untuk dijadikan bahan baku serat rayon tekstil, sebagai alternatif pemanfaatan TKKS selain kompos dan bahan bakar. Proses ini melibatkan tahap delignifikasi kimiawi untuk memisahkan selulosa dari lignin dan hemiselulosa sebelum diproses lebih lanjut menjadi serat.

Meskipun masih dalam tahap pengembangan skala pilot, inovasi ini menunjukkan potensi diversifikasi nilai tambah TKKS ke arah industri tekstil yang jauh lebih tinggi nilainya dibandingkan pemanfaatan konvensional sebagai kompos atau mulsa.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah pabrik menghasilkan POME dengan debit 650 m³/hari dan kadar COD 45.000 mg/L. Setelah melalui pengolahan, kadar COD outlet menjadi 300 mg/L. Hitunglah efisiensi penyisihan (removal efficiency) COD sistem pengolahan tersebut!

Pembahasan: Efisiensi penyisihan = $[(\text{COD masuk} - \text{COD keluar}) / \text{COD masuk}] \times 100\% = [(45.000 - 300) / 45.000] \times 100\% = (44.700/45.000) \times 100\% \approx 99,3\%$. Efisiensi penyisihan yang tinggi ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan POME pabrik tersebut bekerja secara efektif dalam menurunkan beban pencemaran organik sebelum efluen dibuang atau dimanfaatkan lebih lanjut.

Rangkuman

1. POME merupakan limbah cair pabrik kelapa sawit dengan kandungan BOD dan COD yang sangat tinggi.
2. Sistem kolam anaerobik-aerobik merupakan metode konvensional yang umum digunakan untuk mengolah POME.
3. Baku mutu limbah cair menetapkan batas maksimum parameter BOD, COD, minyak-lemak, dan pH sebelum dibuang ke lingkungan.
4. Efluen POME yang telah diolah dapat dimanfaatkan melalui land application dengan pengawasan yang ketat.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan sumber-sumber utama yang membentuk POME dalam proses pengolahan TBS!
2. Mengapa kadar BOD dan COD pada POME sangat tinggi dibandingkan limbah cair domestik?
3. Jelaskan tahapan pengolahan POME pada sistem kolam terbuka!
4. Apa yang dimaksud dengan land application dan apa risikonya jika tidak dikelola dengan baik?

5. Sebutkan parameter yang umum digunakan dalam baku mutu limbah cair industri kelapa sawit beserta nilai maksimumnya!
6. Jika debit POME suatu pabrik adalah 700 m³/hari dengan BOD 25.000 mg/L, hitunglah beban BOD (kg/hari) yang harus diolah!
7. Berdasarkan studi kasus, jelaskan manfaat rotasi blok pada praktik land application!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan pertimbangan yang perlu diperhatikan sebuah pabrik dalam memilih antara sistem kolam konvensional dan sistem reaktor tertutup (UASB) untuk mengolah POME.
2. Diskusikan potensi dan risiko pemanfaatan lumpur (sludge) hasil pengolahan POME sebagai bahan campuran kompos.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Kondensat sterilizer, air buangan klarifikasi minyak, dan air buangan hidrosiklon inti sawit.
2. Karena mengandung sisa minyak, gula, dan senyawa organik terlarut dalam konsentrasi sangat tinggi dari proses pengolahan TBS.
3. POME didinginkan dan diasamkan, diolah di kolam anaerobik (produksi biogas), lalu kolam fakultatif dan aerobik untuk menurunkan BOD/COD lebih lanjut.
4. Land application adalah aplikasi efluen olahan ke lahan sebagai sumber air/hara; risikonya pencemaran air tanah bila dosis berlebihan.
5. BOD maks 100 mg/L, COD maks 350 mg/L, minyak-lemak maks 25 mg/L, pH 6-9.
6. Beban BOD = $700 \text{ m}^3 \times 25.000 \text{ mg/L} = 700.000 \times 25 \text{ g} = 17.500.000 \text{ g} = 17.500 \text{ kg BOD/hari}$.

7. Rotasi blok mencegah kejenuhan tanah menampung beban organik/hara berlebihan pada satu lokasi secara terus-menerus.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. POME adalah singkatan dari...
 - A. Palm Oil Mill Effluent
 - B. Plantation Organic Mixed Effluent
 - C. Palm Oil Mineral Extract
 - D. Plant Oil Mill Emission
 - E. Palm Organic Mill Extract

2. Parameter yang menunjukkan beban pencemaran organik pada limbah cair adalah...
 - A. pH dan warna
 - B. BOD dan COD
 - C. Kekeruhan saja
 - D. Suhu saja
 - E. Salinitas

3. Pada sistem kolam terbuka, tahap pertama yang dilalui POME setelah keluar dari pabrik adalah...
 - A. Kolam aerobik
 - B. Kolam anaerobik
 - C. Kolam pendingin
 - D. Land application
 - E. Kolam fakultatif

4. Baku mutu BOD maksimum untuk limbah cair kelapa sawit yang dibuang ke lingkungan adalah...
 - A. 25 mg/L
 - B. 50 mg/L

- C. 100 mg/L
- D. 350 mg/L
- E. 1.000 mg/L

5. Aplikasi efluen olahan POME ke lahan perkebunan disebut...

- A. Land clearing
- B. Land application
- C. Land reclamation
- D. Land banking
- E. Land grabbing

6. Risiko utama apabila dosis land application berlebihan adalah...

- A. Peningkatan hasil panen drastis
- B. Pencemaran air tanah
- C. Penurunan biaya pupuk
- D. Peningkatan populasi ikan
- E. Tidak ada risiko

7. Fungsi kolam pendingin (cooling pond) dalam sistem pengolahan POME adalah...

- A. Meningkatkan suhu POME
- B. Menurunkan suhu POME sebelum pengolahan lanjut
- C. Menyaring padatan
- D. Menambah kadar minyak
- E. Mengukur pH akhir

8. Teknologi alternatif pengolahan POME yang menggunakan reaktor tertutup dengan waktu tinggal singkat adalah...

- A. Kolam terbuka
- B. UASB
- C. Land application langsung
- D. Insinerasi

E. Evaporasi kolam terbuka

9. Lumpur (sludge) hasil pengolahan POME berpotensi dimanfaatkan sebagai...

- A. Bahan bakar utama boiler
- B. Campuran bahan kompos
- C. Bahan baku CPO
- D. Pupuk kimia sintetis
- E. Tidak memiliki manfaat

10. Suhu POME saat keluar dari proses produksi pabrik biasanya berkisar antara...

- A. 20-30°C
- B. 40-50°C
- C. 80-90°C
- D. 100-110°C
- E. 150°C

Kunci Jawaban Soal Objektif

1A 2B 3C 4C 5B 6B 7B 8B 9B 10C

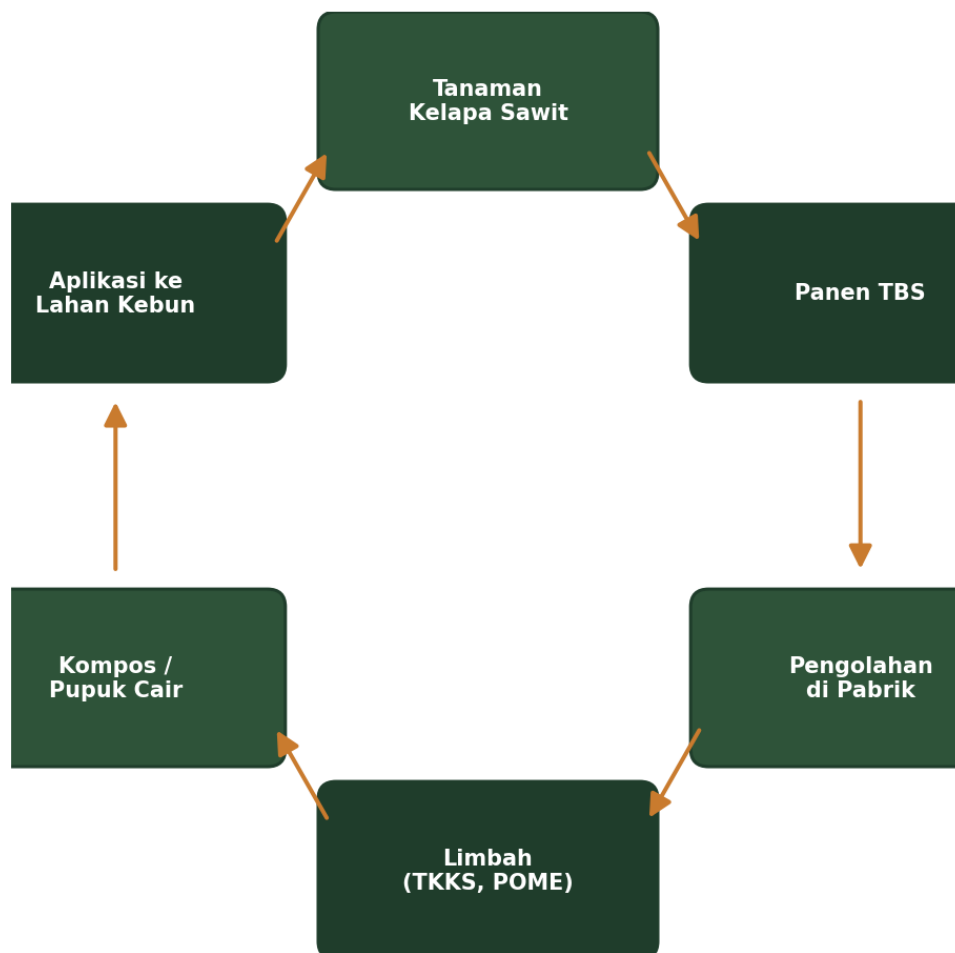
BAB 6. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Bahan Organik

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan konsep pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai sumber bahan organik tanah
2. Menjelaskan peran bahan organik dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah
3. Menjelaskan strategi pengembalian hara limbah ke lahan perkebunan

Siklus Pengembalian Bahan Organik ke Lahan Perkebunan



Gambar 6.1 Ilustrasi terkait materi Bab 6: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Bahan Organik

6.1 Limbah Kelapa Sawit sebagai Sumber Bahan Organik

Berbagai jenis limbah kelapa sawit, seperti TKKS, pelepah, dan efluen POME, memiliki kandungan bahan organik dan unsur hara yang tinggi sehingga berpotensi besar dikembalikan ke lahan sebagai sumber bahan organik tanah (Afrianti, 2021). Pemanfaatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, di mana hara yang terangkut bersama panen dikembalikan kembali ke ekosistem perkebunan.

6.2 Peran Bahan Organik bagi Kesuburan Tanah

Penambahan bahan organik ke dalam tanah memberikan berbagai manfaat, antara lain memperbaiki struktur dan agregasi tanah, meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan retensi air, menyediakan unsur hara makro dan mikro secara perlahan (slow release), serta menstimulasi aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara (Nasution & Harahap, 2017).

Pada lahan perkebunan kelapa sawit yang umumnya berada di lahan mineral masam atau lahan gambut, penambahan bahan organik dari limbah sawit sangat penting untuk menjaga produktivitas tanah dalam jangka panjang, mengingat pengambilan hara oleh tanaman melalui panen TBS berlangsung secara terus-menerus (Silalahi & Br Ginting, 2014).

6.3 Bentuk Aplikasi Bahan Organik Limbah Sawit

Aplikasi bahan organik dari limbah kelapa sawit dapat dilakukan dalam beberapa bentuk, yaitu aplikasi langsung berupa mulsa TKKS atau cacahan pelepah di piringan dan gawangan, aplikasi kompos matang hasil pengomposan TKKS, serta aplikasi efluen POME melalui land application sebagai sumber hara cair (Susanto dkk., 2019).

6.4 Perhitungan Kebutuhan Bahan Organik

Kebutuhan aplikasi bahan organik ke lahan umumnya dihitung berdasarkan hasil analisis tanah dan target peningkatan kandungan bahan organik tanah (C-organik). Sebagai acuan umum, aplikasi TKKS segar dengan dosis 30-40 ton per hektare per tahun (setara sekitar 2-3 tandan per pohon) sering digunakan pada perkebunan yang menerapkan aplikasi mulsa TKKS secara rutin, dengan penyesuaian dosis berdasarkan hasil analisis kesuburan tanah pada masing-masing blok kebun.

6.5 Pengaruh Bahan Organik terhadap Aktivitas Mikroorganisme Tanah

Penambahan bahan organik dari limbah kelapa sawit secara konsisten dapat meningkatkan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah, termasuk bakteri pelarut fosfat, bakteri penambat nitrogen, serta jamur mikoriza yang membantu penyerapan hara oleh akar tanaman. Peningkatan aktivitas biologi tanah ini berkontribusi terhadap perbaikan kesehatan tanah secara menyeluruh, tidak hanya dari sisi kandungan hara, tetapi juga dari sisi ketahanan tanah terhadap tekanan lingkungan seperti kekeringan dan serangan patogen tanah.

6.6 Pemantauan Perubahan Kualitas Tanah Jangka Panjang

Untuk mengevaluasi efektivitas program pengembalian bahan organik ke lahan, perusahaan perkebunan umumnya melakukan pemantauan kualitas tanah secara berkala melalui analisis laboratorium terhadap parameter kandungan C-organik, kapasitas tukar kation, pH tanah, serta kandungan hara makro dan mikro pada titik-titik sampel yang representatif di setiap blok kebun, dengan interval pemantauan umumnya setiap 2-3 tahun sekali.

Studi Kasus: Program Zero Burning dan Pengembalian Bahan Organik pada Replanting

Pada program replanting di sebuah kebun di Kalimantan Barat, perusahaan menerapkan kebijakan zero burning, yaitu tidak melakukan pembakaran terhadap batang dan pelepah hasil tebang tanaman tua. Sebagai gantinya, batang dicacah menjadi serpihan kecil dan disebar kembali ke lahan sebagai mulsa, dikombinasikan dengan aplikasi kompos TKKS pada lubang tanam bibit baru.

Setelah tiga tahun, hasil analisis tanah menunjukkan peningkatan kandungan C-organik tanah dari sekitar 1,5% menjadi lebih dari 2,5%, disertai perbaikan struktur tanah dan peningkatan pertumbuhan tanaman muda dibandingkan blok replanting yang menerapkan pembakaran terbuka pada periode sebelumnya.

Studi Kasus Tambahan: Program CSR Pengolahan Sampah Terpadu dengan Kompos TKKS

Sebuah PKS mengembangkan program tanggung jawab sosial perusahaan (CSR) dengan mencampurkan kompos TKKS bersama sampah organik rumah tangga dari desa sekitar untuk menghasilkan pupuk kompos campuran yang dibagikan kepada

kelompok tani setempat. Program ini sekaligus membantu desa mengatasi masalah pengelolaan sampah organik yang selama ini belum tertangani dengan baik.

Kolaborasi lintas sektor semacam ini memperlihatkan bagaimana fasilitas pengolahan limbah kelapa sawit dapat diperluas fungsinya untuk turut menyelesaikan persoalan lingkungan di luar batas operasional perusahaan, sekaligus memperkuat hubungan sosial dengan masyarakat sekitar.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Hasil analisis tanah pada suatu blok kebun menunjukkan kandungan C-organik awal 1,4% sebelum program aplikasi bahan organik, dan meningkat menjadi 2,1% setelah tiga tahun aplikasi kompos TKKS rutin. Hitunglah persentase peningkatan C-organik tersebut!

Pembahasan: Peningkatan = $[(2,1 - 1,4) / 1,4] \times 100\% = (0,7/1,4) \times 100\% = 50\%$. Artinya, kandungan C-organik pada blok kebun tersebut meningkat sebesar 50% dari kondisi awal setelah tiga tahun penerapan aplikasi kompos TKKS secara rutin, yang mengindikasikan perbaikan kesuburan tanah yang cukup signifikan.

Rangkuman

5. Limbah kelapa sawit seperti TKKS, pelepah, dan efluen POME merupakan sumber bahan organik yang bernilai bagi tanah perkebunan.
6. Bahan organik berperan penting dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah.
7. Aplikasi bahan organik dapat dilakukan melalui mulsa, kompos, maupun land application dengan dosis yang disesuaikan hasil analisis tanah.
8. Kebijakan zero burning pada replanting mendukung pengembalian bahan organik secara maksimal ke lahan.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan hubungan antara pemanfaatan limbah sebagai bahan organik dengan konsep ekonomi sirkular!

2. Sebutkan tiga manfaat penambahan bahan organik terhadap sifat tanah!
3. Mengapa lahan perkebunan kelapa sawit memerlukan input bahan organik secara berkelanjutan?
4. Sebutkan tiga bentuk aplikasi bahan organik dari limbah kelapa sawit ke lahan perkebunan!
5. Jelaskan perbedaan antara aplikasi mulsa langsung dan aplikasi kompos matang!
6. Jelaskan manfaat kebijakan zero burning dibandingkan pembakaran terbuka pada saat replanting!
7. Bagaimana cara menentukan dosis aplikasi bahan organik yang tepat pada suatu blok kebun?

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan mengapa peningkatan aktivitas mikroorganisme tanah penting bagi ketahanan tanaman terhadap kekeringan.
2. Diskusikan interval waktu yang ideal untuk pemantauan kualitas tanah pada kebun yang menerapkan program bahan organik rutin.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Pemanfaatan limbah sebagai bahan organik mengembalikan hara yang terangkut panen kembali ke ekosistem kebun, sejalan dengan prinsip sirkular (bukan linear/buang).
2. Memperbaiki struktur tanah, meningkatkan KTK dan retensi air, serta menyediakan hara secara slow release.
3. Karena panen TBS terus-menerus mengangkut hara keluar dari lahan sehingga perlu pengembalian bahan organik secara berkelanjutan.

4. Mulsa langsung, kompos matang, dan land application efluen POME.
5. Mulsa langsung belum terdekomposisi sempurna (proses masih berjalan di lapangan), sedangkan kompos matang sudah stabil dan siap diserap tanaman.
6. Zero burning mempertahankan bahan organik dan menghindari emisi serta kehilangan hara akibat pembakaran terbuka.
7. Berdasarkan hasil analisis tanah (C-organik, KTK, pH) dan target peningkatan kesuburan pada masing-masing blok.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Pemanfaatan limbah sawit sebagai bahan organik sejalan dengan prinsip...
 - A. Ekonomi linear
 - B. Ekonomi sirkular
 - C. Ekonomi digital
 - D. Ekonomi berbagi
 - E. Ekonomi ekstraktif
2. Manfaat utama penambahan bahan organik terhadap tanah adalah...
 - A. Menurunkan KTK
 - B. Memperbaiki struktur dan retensi air tanah
 - C. Meningkatkan erosi
 - D. Menurunkan aktivitas mikroba
 - E. Meningkatkan salinitas
3. Kebijakan yang menghindari pembakaran biomassa saat replanting disebut...
 - A. Zero waste
 - B. Zero burning
 - C. Zero emission
 - D. Zero tillage
 - E. Zero deforestation

4. Indikator kesuburan tanah yang umum dipantau setelah program aplikasi bahan organik adalah...

- A. Warna daun
- B. C-organik tanah
- C. Tinggi tanaman
- D. Jumlah pelepah
- E. Warna buah

5. Bentuk aplikasi bahan organik yang berupa cairan hasil olahan limbah pabrik adalah...

- A. Mulsa pelepah
- B. Kompos TKKS
- C. Efluen POME (land application)
- D. Abu boiler
- E. Biochar

6. Aktivitas mikroorganisme tanah yang meningkat akibat penambahan bahan organik antara lain...

- A. Bakteri pelarut fosfat dan mikoriza
- B. Virus tanaman
- C. Bakteri patogen akar
- D. Nematoda parasit
- E. Jamur penyebab penyakit

7. Interval umum pemantauan kualitas tanah pada kebun yang menerapkan program bahan organik rutin adalah...

- A. Setiap hari
- B. Setiap minggu
- C. Setiap 2-3 tahun sekali
- D. Setiap 10 tahun
- E. Tidak perlu dipantau

8. Parameter yang dianalisis pada pemantauan kualitas tanah jangka panjang meliputi...
- A. C-organik, KTK, dan pH tanah
 - B. Harga jual CPO
 - C. Jumlah karyawan kebun
 - D. Curah hujan harian saja
 - E. Warna kemasan pupuk
9. Manfaat peningkatan aktivitas mikroorganisme tanah bagi tanaman adalah...
- A. Meningkatkan ketahanan terhadap kekeringan dan patogen
 - B. Menurunkan hasil panen
 - C. Mempercepat pembusukan akar
 - D. Meningkatkan serangan hama
 - E. Tidak berpengaruh
10. Contoh mikroorganisme yang berperan dalam membantu penyerapan hara oleh akar tanaman adalah...
- A. Jamur mikoriza
 - B. Virus mosaik
 - C. Bakteri patogen
 - D. Nematoda parasit
 - E. Jamur penyebab busuk pangkal batang

Kunci Jawaban Soal Objektif

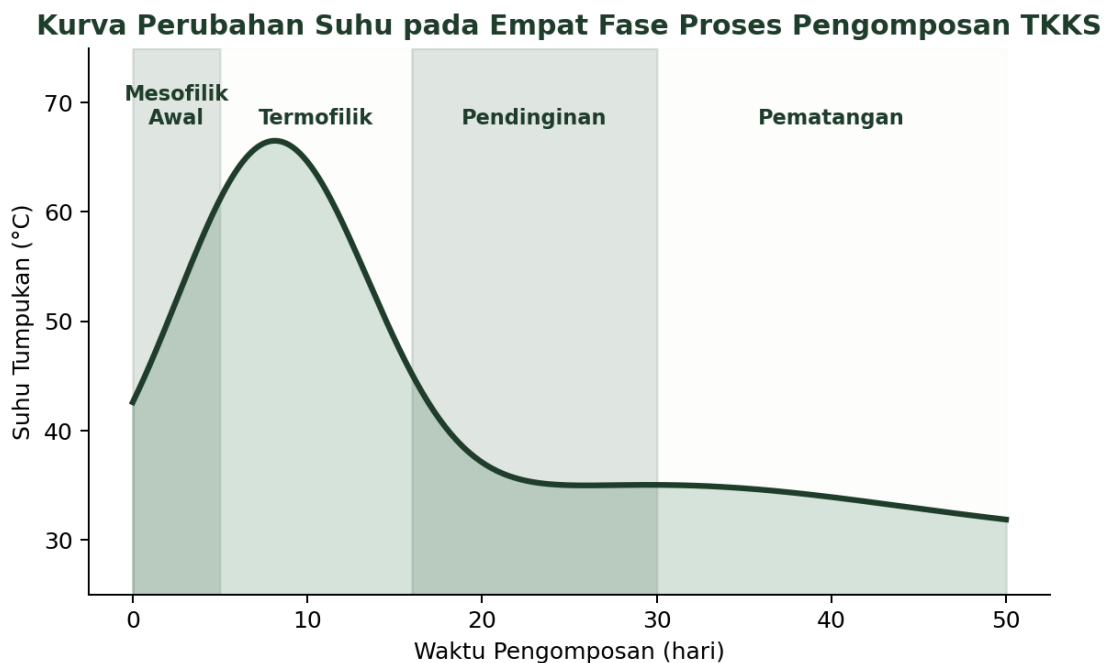
1B 2B 3B 4B 5C 6A 7C 8A 9A 10A

BAB 7. Teknologi Pengomposan Limbah Kelapa Sawit

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan prinsip dasar proses pengomposan
2. Menguraikan metode dan tahapan pengomposan TKKS dan limbah padat lainnya
3. Menjelaskan faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan pengomposan
4. Menjelaskan parameter kematangan dan mutu kompos



Gambar 7.1 Ilustrasi terkait materi Bab 7: Teknologi Pengomposan Limbah Kelapa Sawit

7.1 Prinsip Dasar Pengomposan

Pengomposan adalah proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi terkendali menjadi bahan yang lebih stabil, matang, dan kaya hara yang disebut kompos (Kurniawan & Anggraini, 2019). Proses ini melibatkan aktivitas mikroorganisme aerob maupun anaerob yang mengubah senyawa kompleks seperti selulosa dan lignin menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tersedia bagi tanaman.

Secara umum proses pengomposan berlangsung melalui empat fase, yaitu fase mesofilik awal, fase termofilik, fase pendinginan, dan fase pematangan.

7.2 Metode Pengomposan TKKS

Terdapat beberapa metode pengomposan TKKS yang umum diterapkan, yaitu metode windrow (tumpukan memanjang yang dibalik secara berkala), metode bak/reaktor terbuka dengan sistem aerasi, serta metode kombinasi dengan penambahan aktivator berupa efluen POME atau mikroorganisme dekomposer untuk mempercepat proses penguraian (Badan Standardisasi Nasional, 2004).

Proses pengomposan TKKS umumnya membutuhkan waktu 40-60 hari, jauh lebih cepat dibandingkan dekomposisi alami di lapangan yang dapat memakan waktu lebih dari satu tahun, terutama apabila TKKS dicacah terlebih dahulu untuk memperluas permukaan kontak dengan mikroorganisme.

7.3 Faktor yang Memengaruhi Proses Pengomposan

Keberhasilan proses pengomposan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain rasio karbon terhadap nitrogen (C/N ratio) bahan baku yang idealnya berkisar 25-35, kadar air tumpukan (idealnya 50-60%), suhu tumpukan yang dipantau secara berkala (fase termofilik dapat mencapai 55-65°C), ketersediaan oksigen melalui pembalikan atau aerasi, serta ukuran partikel bahan yang dikomposkan (Wulandari & Santoso, 2017).

Tabel 7.1 Faktor yang Memengaruhi Proses Pengomposan

Parameter	Nilai Optimal	Fungsi/Dampak
Rasio C/N	25-35	Mempercepat aktivitas mikroba
Kadar air	50-60%	Mendukung aktivitas mikroba tanpa anaerobik berlebih
Suhu tumpukan	55-65°C (fase termofilik)	Membunuh patogen dan biji gulma
Frekuensi pembalikan	1-2 kali/minggu	Menjaga aerasi dan suhu merata
Ukuran partikel	< 5 cm	Mempercepat kontak mikroba-bahan

7.4 Indikator Kematangan dan Mutu Kompos

Indikator kematangan kompos dapat dilihat dari perubahan warna menjadi cokelat kehitaman, tekstur yang remah dan tidak berbau menyengat, penurunan suhu tumpukan mendekati suhu lingkungan, serta nilai C/N ratio akhir yang mendekati rasio C/N tanah, yaitu sekitar 10-20. Selain pengamatan fisik, mutu kompos juga dapat dievaluasi melalui uji laboratorium terhadap kandungan hara makro (N, P, K), pH, serta uji perkecambahan benih untuk memastikan kompos tidak bersifat fitotoksik terhadap tanaman.

7.5 Manfaat Kompos TKKS

Kompos TKKS dapat digunakan sebagai pupuk organik pada tanaman kelapa sawit maupun tanaman lain, dengan manfaat memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kandungan bahan organik dan kalium, serta mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik sehingga dapat menekan biaya produksi dalam jangka panjang (Kementerian Pertanian, 2019).

7.6 Penggunaan Mikroorganisme Dekomposer

Untuk mempercepat proses pengomposan, banyak unit kompos TKKS menambahkan mikroorganisme dekomposer komersial yang mengandung konsorsium bakteri dan jamur selulolitik serta lignolitik, seperti *Trichoderma* sp. dan *Aspergillus* sp., yang mampu mempercepat penguraian selulosa dan lignin pada tumpukan kompos. Penggunaan dekomposer ini dapat memangkas waktu proses pengomposan hingga 20-30% dibandingkan proses alami tanpa penambahan mikroorganisme.

7.7 Pengendalian Bau pada Unit Pengomposan

Salah satu tantangan operasional unit pengomposan adalah timbulnya bau yang dapat mengganggu lingkungan sekitar, terutama apabila tumpukan mengalami kondisi anaerobik akibat kadar air berlebih atau aerasi yang kurang memadai. Pengendalian bau dapat dilakukan melalui pengaturan frekuensi pembalikan yang lebih intensif, penambahan bahan berkarbon tinggi seperti serbuk gergaji untuk menyerap kelembapan berlebih, serta penempatan lokasi unit kompos dengan jarak yang cukup dari pemukiman penduduk.

Studi Kasus: Unit Pengomposan Terintegrasi dengan Land Application di Jambi

Sebuah pabrik kelapa sawit di Provinsi Jambi membangun unit pengomposan TKKS dengan metode windrow yang diperkaya dengan penyiraman efluen POME hasil olahan kolam anaerobik sebagai sumber air dan aktivator sekaligus. Tumpukan kompos dibalik menggunakan alat pembalik mekanis (compost turner) setiap tiga hari sekali pada dua minggu pertama, kemudian setiap minggu pada fase berikutnya, dengan total waktu proses sekitar 50 hari hingga kompos matang.

Integrasi ini memberikan dua manfaat sekaligus, yaitu mempercepat proses pengomposan TKKS karena pasokan air dan nutrisi dari POME, sekaligus mengurangi volume efluen POME yang harus diolah lebih lanjut di kolam pengolahan limbah cair, sehingga menurunkan beban kerja sistem kolam secara keseluruhan.

Studi Kasus Tambahan: Penerapan Sensor IoT pada Kolam Pengolahan POME

Sebuah PKS memasang sensor daring untuk memantau pH, suhu, dan level ketinggian kolam limbah secara real-time yang terhubung ke aplikasi pemantauan berbasis telepon pintar bagi petugas lingkungan. Sistem ini memberikan peringatan otomatis apabila terjadi anomali seperti kenaikan pH mendadak atau level kolam mendekati kapasitas maksimum.

Penerapan teknologi ini terbukti mempercepat respons petugas terhadap potensi masalah operasional, mengurangi risiko luapan kolam, serta menyederhanakan proses pelaporan data pemantauan lingkungan kepada manajemen dan regulator.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Suatu unit kompos TKKS tanpa penambahan dekomposer membutuhkan waktu 55 hari untuk mencapai kematangan. Jika penambahan dekomposer mampu mempercepat waktu proses sebesar 25%, berapa hari waktu proses yang dibutuhkan setelah penambahan dekomposer?

Pembahasan: Percepatan waktu = $25\% \times 55 \text{ hari} = 13,75 \text{ hari} \approx 14 \text{ hari}$. Waktu proses baru = $55 - 14 = 41 \text{ hari}$. Dengan penambahan dekomposer, waktu pengomposan dapat dipersingkat menjadi sekitar 41 hari, yang berarti unit kompos dapat memproses siklus produksi lebih banyak dalam satu tahun dibandingkan tanpa penggunaan dekomposer.

Rangkuman

9. Pengomposan adalah proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme menjadi kompos yang stabil dan kaya hara melalui empat fase utama.
10. Metode windrow dan reaktor aerasi merupakan metode umum pengomposan TKKS dengan waktu proses 40-60 hari.
11. Keberhasilan pengomposan dipengaruhi oleh rasio C/N, kadar air, suhu, aerasi, dan ukuran partikel bahan.
12. Kematangan kompos dapat dinilai melalui indikator fisik dan uji laboratorium seperti C/N akhir dan uji fitotoksisitas.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan prinsip dasar terjadinya proses pengomposan dan empat fase yang dilaluinya!
2. Sebutkan dan jelaskan dua metode pengomposan TKKS yang umum digunakan!
3. Sebutkan lima faktor yang memengaruhi keberhasilan proses pengomposan beserta nilai optimalnya!
4. Bagaimana cara mengetahui bahwa kompos TKKS telah matang dan siap digunakan?
5. Jelaskan manfaat penggunaan kompos TKKS dibandingkan penggunaan pupuk anorganik secara penuh!
6. Berdasarkan studi kasus, jelaskan manfaat integrasi unit kompos dengan pemanfaatan efluen POME!
7. Mengapa suhu tinggi pada fase termofilik penting bagi mutu akhir kompos?

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan manfaat dan risiko penggunaan mikroorganisme dekomposer komersial pada skala unit kompos pabrik.

2. Diskusikan strategi penempatan lokasi unit kompos agar tidak menimbulkan gangguan bau bagi masyarakat sekitar.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Pengomposan adalah penguraian bahan organik oleh mikroorganisme melalui fase mesofilik awal, termofilik, pendinginan, dan pematangan.
2. Windrow (tumpukan dibalik berkala) dan reaktor/bak aerasi terbuka dengan sistem aerasi terkendali.
3. Rasio C/N (25-35), kadar air (50-60%), suhu (55-65°C fase termofilik), frekuensi pembalikan, dan ukuran partikel (<5cm).
4. Melalui perubahan warna cokelat kehitaman, tekstur remah tidak berbau, suhu mendekati lingkungan, dan C/N akhir 10-20.
5. Memperbaiki struktur tanah dan menyuplai bahan organik jangka panjang, sekaligus mengurangi biaya dan dampak lingkungan pupuk anorganik.
6. Mengurangi kebutuhan air bersih untuk pengomposan sekaligus mengurangi volume efluen POME yang harus diolah lebih lanjut.
7. Suhu tinggi membunuh patogen dan biji gulma sehingga kompos aman digunakan dan tidak menyebarkan gulma baru.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Rasio C/N yang ideal untuk proses pengomposan berkisar antara...
 - A. 5-10
 - B. 10-15
 - C. 25-35
 - D. 50-60
 - E. 70-80

2. Fase pengomposan dengan suhu tertinggi yang mampu membunuh patogen disebut fase...

- A. Mesofilik awal
- B. Termofilik
- C. Pendinginan
- D. Pematangan
- E. Anaerobik

3. Metode pengomposan TKKS dengan tumpukan memanjang yang dibalik berkala disebut...

- A. Vermikompos
- B. Windrow
- C. Bokashi
- D. Fermentasi cair
- E. Digestasi anaerobik

4. Indikator kompos telah matang dapat dilihat dari...

- A. Bau menyengat dan panas
- B. Warna coklat kehitaman dan tidak berbau
- C. Tekstur masih kasar dan basah
- D. Suhu tetap tinggi
- E. C/N ratio masih di atas 40

5. Penambahan mikroorganisme dekomposer pada kompos TKKS bertujuan untuk...

- A. Memperlambat proses
- B. Mempercepat penguraian selulosa dan lignin
- C. Meningkatkan bau
- D. Menambah kadar air berlebih
- E. Mengurangi unsur hara

6. Waktu proses pengomposan TKKS pada umumnya berkisar antara...
- A. 5-10 hari
 - B. 15-20 hari
 - C. 40-60 hari
 - D. 100-120 hari
 - E. lebih dari 1 tahun
7. Contoh mikroorganisme dekomposer yang sering ditambahkan pada kompos TKKS adalah...
- A. *Escherichia coli*
 - B. *Trichoderma* sp. dan *Aspergillus* sp.
 - C. *Salmonella* sp.
 - D. *Vibrio* sp.
 - E. *Plasmodium* sp.
8. Penambahan dekomposer pada kompos TKKS dapat memangkas waktu proses hingga...
- A. 5%
 - B. 20-30%
 - C. 60%
 - D. 90%
 - E. Tidak berpengaruh
9. Penyebab utama timbulnya bau menyengat pada unit pengomposan adalah...
- A. Kondisi anaerobik akibat kadar air berlebih
 - B. Suhu terlalu rendah
 - C. Ukuran partikel terlalu kecil
 - D. C/N ratio terlalu rendah
 - E. Terlalu sering dibalik

10. Bahan yang dapat ditambahkan untuk menyerap kelembapan berlebih pada tumpukan kompos adalah...

- A. Air tambahan
- B. Serbuk gergaji
- C. Garam
- D. Minyak
- E. Pasir laut

Kunci Jawaban Soal Objektif

1C 2B 3B 4B 5B 6C 7B 8B 9A 10B

BAB 8. Produksi Biogas dari POME

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan prinsip dasar produksi biogas dari limbah cair kelapa sawit
2. Menguraikan jenis teknologi digester biogas POME
3. Menjelaskan pemanfaatan biogas sebagai sumber energi
4. Menghitung potensi produksi biogas dari debit POME suatu pabrik

Skema Sederhana Covered Lagoon Digester untuk Biogas POME



Gambar 8.1 Ilustrasi terkait materi Bab 8: Produksi Biogas dari POME

8.1 Prinsip Dasar Produksi Biogas dari POME

Biogas dihasilkan melalui proses dekomposisi anaerobik bahan organik oleh bakteri metanogen dalam kondisi tanpa oksigen, yang menghasilkan gas campuran terutama metana (CH_4) sekitar 55-65% dan karbon dioksida (CO_2) sekitar 35-45%, beserta sejumlah kecil gas lain seperti hidrogen sulfida (H_2S) (Ramadhani & Saputra, 2016). Proses ini berlangsung melalui empat tahapan utama, yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis.

POME merupakan substrat yang sangat baik untuk produksi biogas karena kandungan bahan organiknya yang tinggi, sehingga selain berfungsi mengurangi beban pencemaran, proses ini sekaligus menghasilkan sumber energi terbarukan.

8.2 Teknologi Digester Biogas POME

Terdapat beberapa jenis digester yang umum digunakan untuk menangkap biogas dari POME, yaitu digester kolam tertutup (covered lagoon digester) yang menggunakan lapisan penutup High Density Polyethylene (HDPE) di atas kolam anaerobik terbuka, serta digester tangki tertutup (continuous stirred tank reactor/CSTR) yang menawarkan kontrol proses lebih baik meskipun dengan biaya investasi lebih tinggi (Hutapea & Simatupang, 2019).

Covered lagoon digester lebih banyak digunakan di Indonesia karena biaya investasi yang relatif lebih rendah dan kemudahan retrofit pada kolam anaerobik yang sudah ada, sementara CSTR lebih cocok diterapkan pada pabrik dengan kapasitas besar yang membutuhkan efisiensi produksi biogas lebih tinggi dan waktu tinggal (retention time) lebih singkat, yaitu sekitar 15-25 hari dibandingkan 45-60 hari pada covered lagoon.

Tabel 8.1 Teknologi Digester Biogas POME

Aspek	Covered Lagoon Digester	CSTR
Investasi	Relatif rendah	Relatif tinggi
Retention time	45-60 hari	15-25 hari
Kontrol proses	Terbatas	Baik (suhu, pH, pengadukan)
Kesesuaian	Retrofit kolam eksisting	Pabrik kapasitas besar/baru

8.3 Pemanfaatan Biogas sebagai Sumber Energi

Biogas hasil pengolahan POME dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBg) yang menggerakkan generator gas engine, sebagai substitusi bahan bakar boiler bersama cangkang dan fiber, maupun dijual sebagai listrik ke jaringan PLN melalui skema jual beli listrik energi terbarukan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017).

Selain manfaat energi, pemanfaatan biogas POME juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca, karena metana yang sebelumnya terlepas begitu saja ke atmosfer dari kolam terbuka kini ditangkap dan dibakar (flaring) atau dimanfaatkan sebagai energi, sehingga berperan penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim di sektor perkebunan.

8.4 Estimasi Potensi Biogas

Secara umum, setiap ton TBS yang diolah berpotensi menghasilkan sekitar 25-30 meter kubik biogas, sehingga pabrik berkapasitas 45 ton TBS/jam yang beroperasi 20 jam per hari (900 ton TBS/hari) berpotensi menghasilkan sekitar 22.500-27.000 meter kubik biogas per hari (Siregar & Panjaitan, 2013). Dengan asumsi 1 meter kubik biogas setara dengan sekitar 1,8-2,0 kWh listrik menggunakan gas engine, potensi listrik yang dapat dibangkitkan berkisar antara 1,7-2,2 MW, tergantung efisiensi generator yang digunakan.

8.5 Pemurnian Biogas (Biogas Upgrading)

Biogas mentah hasil digester masih mengandung pengotor seperti hidrogen sulfida (H_2S) dan uap air yang dapat menyebabkan korosi pada peralatan gas engine apabila tidak dimurnikan terlebih dahulu. Proses pemurnian biogas (biogas upgrading) dapat dilakukan melalui sistem scrubber untuk menyerap H_2S , serta sistem pengering (dehumidifier) untuk mengurangi kadar uap air, sehingga kualitas biogas yang masuk ke gas engine memenuhi spesifikasi teknis yang direkomendasikan oleh produsen peralatan.

8.6 Perhitungan Kelayakan Ekonomi Proyek Biogas

Kelayakan ekonomi proyek biogas POME umumnya dievaluasi melalui perhitungan biaya investasi (capital expenditure/CAPEX), biaya operasional tahunan (operational expenditure/OPEX), potensi pendapatan dari penjualan listrik atau penghematan biaya energi, serta indikator kelayakan investasi seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan payback period. Proyek biogas POME umumnya memiliki payback period berkisar antara 3-6 tahun, tergantung pada skema pendanaan, harga jual listrik, dan skala kapasitas pabrik.

Studi Kasus: Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) Terhubung Jaringan PLN

Sebuah PKS di Riau membangun instalasi covered lagoon digester dengan kapasitas menampung seluruh debit POME dari pabrik berkapasitas 60 ton TBS/jam. Biogas yang dihasilkan dialirkan ke dua unit gas engine berkapasitas total 1,2 MW, menghasilkan listrik yang sebagian digunakan untuk kebutuhan operasional pabrik dan sebagian lagi dijual ke PLN melalui skema power purchase agreement (PPA) untuk energi terbarukan.

Selain pendapatan tambahan dari penjualan listrik, proyek ini juga menghasilkan sertifikat pengurangan emisi karbon yang dapat diperdagangkan, mengingat proyek ini berhasil menangkap dan memanfaatkan gas metana yang sebelumnya terlepas ke atmosfer dari kolam anaerobik terbuka pada sistem pengolahan limbah sebelumnya.

Studi Kasus Tambahan: Sinergi Riset Perguruan Tinggi dan Industri dalam Pengembangan Biochar

Sebuah perguruan tinggi bekerja sama dengan pabrik kelapa sawit setempat untuk mengembangkan reaktor pirolisis skala menengah yang memanfaatkan cangkang sebagai bahan baku, dengan mahasiswa program studi terkait dilibatkan dalam pengujian karakteristik biochar yang dihasilkan pada berbagai suhu pirolisis sebagai bagian dari tugas akhir penelitian mereka.

Kemitraan riset-industri semacam ini memberikan manfaat ganda, yaitu pengembangan inovasi teknologi pengolahan limbah bagi perusahaan sekaligus kesempatan penelitian terapan yang relevan bagi dunia pendidikan tinggi di bidang teknologi pertanian dan lingkungan.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah proyek PLTBg membutuhkan investasi Rp 45 miliar dan menghasilkan pendapatan bersih Rp 9 miliar per tahun dari penjualan listrik dan penghematan energi. Hitunglah estimasi payback period sederhana dari proyek tersebut!

Pembahasan: Payback period sederhana = Total investasi / Pendapatan bersih tahunan = Rp 45 miliar / Rp 9 miliar per tahun = 5 tahun. Dengan demikian, proyek PLTBg tersebut diperkirakan dapat mengembalikan modal investasinya dalam waktu sekitar 5 tahun, sebuah periode yang tergolong wajar untuk proyek infrastruktur energi terbarukan berskala menengah.

Rangkuman

13. Biogas dari POME dihasilkan melalui dekomposisi anaerobik yang menghasilkan gas metana dan karbon dioksida.
14. Covered lagoon digester dan CSTR merupakan dua teknologi utama penangkapan biogas dari POME dengan karakteristik berbeda.
15. Biogas dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik dan bahan bakar, sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca.
16. Estimasi potensi biogas penting untuk perencanaan kapasitas instalasi pembangkit listrik tenaga biogas.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan empat tahapan proses dekomposisi anaerobik dalam produksi biogas!
2. Sebutkan perbedaan utama antara covered lagoon digester dan CSTR!
3. Mengapa POME dianggap sebagai substrat yang baik untuk produksi biogas?
4. Jelaskan manfaat ganda dari pengolahan POME menjadi biogas!
5. Bagaimana pemanfaatan biogas POME dapat berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim?
6. Sebuah pabrik mengolah 800 ton TBS/hari; dengan asumsi 27 m³ biogas/ton TBS, hitunglah potensi produksi biogas per hari dan estimasi potensi listriknya (gunakan 1,9 kWh/m³)!
7. Berdasarkan studi kasus, jelaskan manfaat tambahan yang diperoleh perusahaan selain pendapatan dari penjualan listrik!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan mengapa pemurnian biogas penting dilakukan sebelum digunakan pada gas engine.

2. Diskusikan faktor-faktor yang dapat memengaruhi payback period proyek biogas POME pada suatu pabrik.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Hidrolisis (pemecahan senyawa kompleks), asidogenesis (pembentukan asam), asetogenesis (pembentukan asetat), dan metanogenesis (pembentukan metana).
2. Covered lagoon lebih murah dan cocok retrofit kolam eksisting namun retention time lebih lama; CSTR lebih mahal namun kontrol proses lebih baik dan retention time lebih singkat.
3. Karena kandungan bahan organiknya sangat tinggi sehingga ideal sebagai substrat bakteri metanogen.
4. Mengurangi beban pencemaran organik sekaligus menghasilkan energi terbarukan (biogas).
5. Menangkap metana yang sebelumnya lepas ke atmosfer dari kolam terbuka, sehingga mengurangi emisi gas rumah kaca.
6. $800 \text{ ton} \times 27 \text{ m}^3/\text{ton} = 21.600 \text{ m}^3 \text{ biogas/hari}$; listrik $\approx 21.600 \times 1,9 \text{ kWh/m}^3 \approx 41.040 \text{ kWh/hari}$.
7. Selain pendapatan listrik, proyek memperoleh sertifikat pengurangan emisi karbon yang dapat diperdagangkan.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Gas utama yang dihasilkan dari dekomposisi anaerobik POME adalah...
 - A. Oksigen dan nitrogen
 - B. Metana dan karbon dioksida
 - C. Hidrogen dan argon
 - D. Ozon dan karbon monoksida

- E. Klorin dan amonia
2. Tahap akhir dekomposisi anaerobik yang menghasilkan gas metana disebut...
- A. Hidrolisis
 - B. Asidogenesis
 - C. Asetogenesis
 - D. Metanogenesis
 - E. Fermentasi alkohol
3. Jenis digester biogas yang paling banyak digunakan di Indonesia karena biaya investasi rendah adalah...
- A. CSTR
 - B. Covered lagoon digester
 - C. Fixed dome digester
 - D. Balloon digester
 - E. Plug flow digester
4. Proses menghilangkan H₂S dan uap air dari biogas mentah disebut...
- A. Land application
 - B. Biogas upgrading
 - C. Composting
 - D. Pyrolysis
 - E. Gasification
5. Manfaat ganda dari pengolahan POME menjadi biogas adalah...
- A. Hanya menghasilkan energi
 - B. Mengurangi pencemaran sekaligus menghasilkan energi
 - C. Hanya mengurangi bau
 - D. Hanya meningkatkan pH
 - E. Tidak ada manfaat tambahan

6. Payback period umum proyek biogas POME berkisar antara...
- A. Kurang dari 1 tahun
 - B. 3-6 tahun
 - C. 15-20 tahun
 - D. Lebih dari 25 tahun
 - E. Tidak dapat dihitung
7. Proses biogas upgrading bertujuan menghilangkan pengotor berupa...
- A. Karbon dioksida sepenuhnya
 - B. Hidrogen sulfida dan uap air
 - C. Oksigen murni
 - D. Nitrogen cair
 - E. Metana
8. Sistem yang menyerap gas H₂S pada proses pemurnian biogas disebut...
- A. Scrubber
 - B. Boiler
 - C. Turbin
 - D. Kondensor
 - E. Digester
9. Indikator kelayakan investasi proyek biogas yang menunjukkan periode pengembalian modal adalah...
- A. NPV
 - B. IRR
 - C. Payback period
 - D. ROA
 - E. EBITDA
10. Manfaat lingkungan utama dari penangkapan dan pemanfaatan biogas POME adalah...

- A. Meningkatkan emisi metana
- B. Mengurangi emisi gas rumah kaca
- C. Menambah limbah cair
- D. Meningkatkan BOD
- E. Tidak ada manfaat lingkungan

Kunci Jawaban Soal Objektif

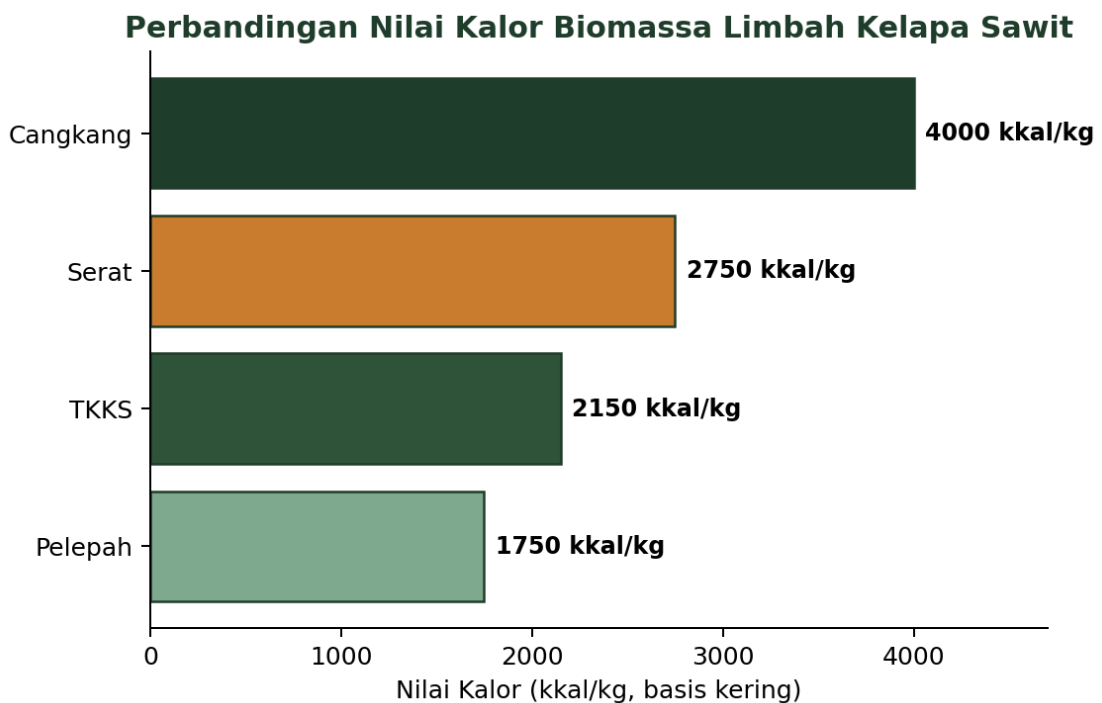
1B 2D 3B 4B 5B 6B 7B 8A 9C 10B

BAB 9. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan potensi limbah kelapa sawit sebagai sumber energi biomassa
2. Menguraikan teknologi konversi energi dari limbah padat kelapa sawit
3. Menjelaskan konsep energi mandiri (energy self-sufficient) pada pabrik kelapa sawit



Gambar 9.1 Ilustrasi terkait materi Bab 9: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi

9.1 Potensi Energi Biomassa Kelapa Sawit

Selain POME yang dapat diolah menjadi biogas, limbah padat kelapa sawit seperti cangkang, serat, dan TKKS juga memiliki nilai kalor yang cukup tinggi sehingga potensial dimanfaatkan sebagai sumber energi biomassa (Simanjuntak & Purnama, 2018). Cangkang memiliki nilai kalor tertinggi di antara ketiganya, yaitu sekitar 3.500-

4.500 kkal/kg, diikuti oleh serat sekitar 2.500-3.000 kkal/kg, dan TKKS sekitar 1.800-2.500 kkal/kg dalam kondisi kering.

Tabel 9.1 Potensi Energi Biomassa Kelapa Sawit

Jenis Biomassa	Nilai Kalor (kkal/kg, kering)	Kadar Air Umum
Cangkang	3.500-4.500	10-15%
Serat (fibre)	2.500-3.000	35-40%
TKKS	1.800-2.500	60-65%
Pelepah	1.500-2.000	50-60%

9.2 Pemanfaatan sebagai Bahan Bakar Boiler

Sebagian besar pabrik kelapa sawit di Indonesia telah memanfaatkan cangkang dan serat sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap yang digunakan dalam proses sterilisasi TBS maupun untuk menggerakkan turbin uap penghasil listrik (cogeneration), sehingga sebagian besar kebutuhan energi pabrik dapat dipenuhi secara mandiri (energy self-sufficient) tanpa bergantung pada bahan bakar fosil (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi [BPPT], 2015).

Umumnya proporsi campuran bahan bakar boiler terdiri atas sekitar 60-70% serat dan 30-40% cangkang, komposisi yang disesuaikan dengan nilai kalor gabungan yang dibutuhkan serta ketersediaan masing-masing jenis limbah dari proses produksi harian.

9.3 Teknologi Konversi Energi Lanjutan

Selain pembakaran langsung, terdapat teknologi konversi energi lanjutan yang dapat diterapkan pada limbah padat kelapa sawit, antara lain gasifikasi biomassa yang mengubah bahan padat menjadi gas mudah terbakar (syngas) melalui pembakaran tidak sempurna pada suhu tinggi, pirolisis yang menghasilkan bio-oil dan biochar melalui pemanasan tanpa oksigen, serta pembuatan pelet biomassa dari cangkang dan serat sebagai komoditas ekspor bahan bakar padat terbarukan (Sari & Wijaya, 2017).

Pengembangan teknologi ini membuka peluang diversifikasi produk energi dari limbah kelapa sawit, tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan energi internal pabrik, tetapi juga berpotensi dijual sebagai komoditas energi terbarukan baik di pasar domestik

maupun internasional, khususnya cangkang sawit yang telah menjadi salah satu komoditas ekspor biomassa penting dari Indonesia ke Jepang dan Korea Selatan (Panggabean & Aritonang, 2016).

9.4 Perbandingan Efisiensi Konversi Energi

Efisiensi konversi energi biomassa kelapa sawit bervariasi tergantung teknologi yang digunakan. Pembakaran langsung pada boiler konvensional umumnya memiliki efisiensi termal sekitar 60-75%, sementara sistem gasifikasi dapat mencapai efisiensi konversi energi listrik yang lebih tinggi apabila dikombinasikan dengan gas engine, meskipun membutuhkan investasi dan kompleksitas operasional yang lebih besar. Pemilihan teknologi yang tepat perlu mempertimbangkan skala kebutuhan energi, ketersediaan modal, dan kapasitas sumber daya manusia yang dimiliki perusahaan.

9.5 Rantai Pasok Biomassa untuk Ekspor

Pengembangan rantai pasok biomassa kelapa sawit untuk keperluan ekspor memerlukan standar mutu yang konsisten, termasuk kadar air, ukuran partikel, kandungan abu, dan nilai kalor sesuai spesifikasi yang diminta pembeli internasional. Selain itu, aspek keberlanjutan rantai pasok juga menjadi perhatian penting, termasuk sertifikasi keberlanjutan biomassa dan jejak karbon (carbon footprint) dari proses pengumpulan hingga pengapalan produk ke negara tujuan ekspor.

Studi Kasus: Ekspor Cangkang Sawit sebagai Bahan Bakar Biomassa

Sebuah kelompok pabrik kelapa sawit di Sumatera mengembangkan unit pengumpulan dan pengeringan cangkang dari beberapa pabrik mitra untuk memenuhi kontrak ekspor cangkang sawit ke pembangkit listrik biomassa di Jepang. Cangkang yang terkumpul disortir untuk memisahkan kotoran dan cangkang pecah berukuran kecil, kemudian dikeringkan hingga kadar air di bawah 15% sebelum dikemas dalam kontainer untuk pengapalan.

Program ini memberikan nilai tambah ekonomi signifikan bagi cangkang yang sebelumnya hanya digunakan sebagai bahan bakar boiler internal dengan nilai jual rendah, sekaligus mendukung target energi terbarukan negara tujuan ekspor yang menggantikan sebagian penggunaan batu bara pada pembangkit listriknya.

Studi Kasus Tambahan: Kalkulasi Jejak Karbon Pabrik Kelapa Sawit

Sebuah pabrik kelapa sawit melakukan perhitungan jejak karbon (carbon footprint) dari seluruh aktivitas operasionalnya, termasuk emisi dari kolam limbah terbuka, penggunaan bahan bakar fosil untuk transportasi, dan konsumsi listrik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa emisi metana dari kolam POME terbuka menyumbang porsi terbesar dari total jejak karbon pabrik.

Berdasarkan temuan tersebut, perusahaan memprioritaskan investasi pada instalasi penangkapan biogas sebagai langkah mitigasi utama, karena berpotensi memberikan penurunan jejak karbon paling signifikan dibandingkan langkah efisiensi energi lainnya di area pabrik.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah pabrik menghasilkan 60 ton cangkang per hari dengan nilai kalor 4.000 kkal/kg. Hitunglah total energi kalor yang terkandung dalam produksi cangkang harian tersebut (dalam Gkal/hari)!

Pembahasan: Energi total = $60.000 \text{ kg} \times 4.000 \text{ kkal/kg} = 240.000.000 \text{ kkal} = 240.000 \text{ Mkal} = 240 \text{ Gkal}$ per hari (1 Gkal = 1.000.000 kkal). Dengan demikian, cangkang yang dihasilkan pabrik tersebut setiap harinya menyimpan potensi energi kalor yang sangat besar, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler maupun dijual sebagai komoditas biomassa.

Rangkuman

17. Cangkang, serat, dan TKKS memiliki nilai kalor yang menjadikannya potensial sebagai sumber energi biomassa.
18. Sebagian besar pabrik kelapa sawit memanfaatkan cangkang dan serat sebagai bahan bakar boiler secara mandiri.
19. Teknologi gasifikasi, pirolisis, dan pembuatan pelet biomassa membuka peluang diversifikasi produk energi.
20. Cangkang sawit telah menjadi komoditas ekspor biomassa penting bagi Indonesia.

Soal Latihan (Esai)

1. Bandingkan nilai kalor cangkang, serat, dan TKKS kelapa sawit!
2. Jelaskan konsep energy self-sufficient pada pabrik kelapa sawit!
3. Apa yang dimaksud dengan gasifikasi biomassa dan apa produk yang dihasilkannya?
4. Jelaskan potensi pelet biomassa dari limbah kelapa sawit sebagai komoditas ekspor!
5. Mengapa pemanfaatan cangkang dan serat sebagai bahan bakar boiler dianggap sebagai bentuk pemanfaatan energi yang efisien?
6. Berdasarkan studi kasus, jelaskan proses yang perlu dilakukan agar cangkang sawit memenuhi standar ekspor!
7. Jelaskan perbedaan prinsip antara gasifikasi dan pirolisis!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan pertimbangan yang perlu diperhatikan perusahaan dalam memilih antara pembakaran langsung dan gasifikasi biomassa.
2. Diskusikan tantangan yang mungkin dihadapi dalam membangun rantai pasok cangkang sawit untuk ekspor ke negara lain.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Cangkang > serat > TKKS, karena kadar air cangkang paling rendah dan struktur ligninnya lebih padat.
2. Kondisi pabrik mampu memenuhi seluruh kebutuhan energinya (uap dan listrik) dari limbah biomasanya sendiri tanpa bahan bakar fosil.

3. Konversi biomassa padat menjadi gas mudah terbakar (syngas) melalui pembakaran tidak sempurna pada suhu tinggi.
4. Cangkang sawit telah menjadi komoditas ekspor biomassa untuk pembangkit listrik di negara seperti Jepang dan Korea Selatan.
5. Karena memanfaatkan limbah yang tersedia melimpah di lokasi pabrik sehingga tidak perlu biaya transportasi bahan bakar dari luar.
6. Cangkang perlu disortir, dikeringkan hingga kadar air <15%, dan dikemas sesuai standar mutu ekspor.
7. Gasifikasi menghasilkan gas mudah terbakar (syngas), sedangkan pirolisis menghasilkan padatan (biochar), cairan (bio-oil), dan gas non-kondensasi.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Limbah padat kelapa sawit dengan nilai kalor tertinggi adalah...
 - A. TKKS
 - B. Pelepah
 - C. Serat
 - D. Cangkang
 - E. Bungkil inti sawit
2. Kondisi pabrik yang mampu memenuhi kebutuhan energinya sendiri dari limbah biomassa disebut...
 - A. Net zero
 - B. Energy self-sufficient
 - C. Carbon neutral
 - D. Off-grid total
 - E. Energy deficit
3. Proses konversi biomassa padat menjadi gas mudah terbakar (syngas) disebut...
 - A. Pirolisis

- B. Gasifikasi
 - C. Fermentasi
 - D. Hidrolisis
 - E. Transesterifikasi
4. Cangkang sawit Indonesia banyak diekspor sebagai bahan bakar biomassa ke negara...
- A. Brazil dan Argentina
 - B. Jepang dan Korea Selatan
 - C. Mesir dan Maroko
 - D. Kanada dan Meksiko
 - E. Australia dan Selandia Baru
5. Campuran umum bahan bakar boiler pabrik kelapa sawit terdiri atas...
- A. 100% TKKS
 - B. Serat dan cangkang
 - C. 100% batu bara
 - D. Bungkil inti sawit saja
 - E. POME murni
6. Syarat mutu ekspor cangkang sawit umumnya mensyaratkan kadar air di bawah...
- A. 5%
 - B. 15%
 - C. 35%
 - D. 50%
 - E. 65%
7. Nilai kalor cangkang kelapa sawit dalam kondisi kering berkisar antara...
- A. 500-1.000 kkal/kg
 - B. 1.800-2.500 kkal/kg
 - C. 3.500-4.500 kkal/kg

- D. 6.000-7.000 kkal/kg
E. 10.000 kkal/kg
8. Proporsi umum campuran bahan bakar boiler pabrik kelapa sawit adalah...
- A. 100% cangkang
B. 60-70% serat dan 30-40% cangkang
C. 100% TKKS
D. 50% batu bara dan 50% cangkang
E. 100% bungkil inti sawit
9. Produk hasil pirolisis selain biochar dan bio-oil adalah...
- A. Kompos
B. Syngas
C. Pupuk NPK
D. Minyak sawit
E. Susu kedelai
10. Cangkang sawit sebagai komoditas ekspor biomassa umumnya digunakan sebagai substitusi bahan bakar...
- A. Gas alam
B. Batu bara
C. Bensin
D. Solar
E. Nuklir

Kunci Jawaban Soal Objektif

1D 2B 3B 4B 5B 6B 7C 8B 9B 10B

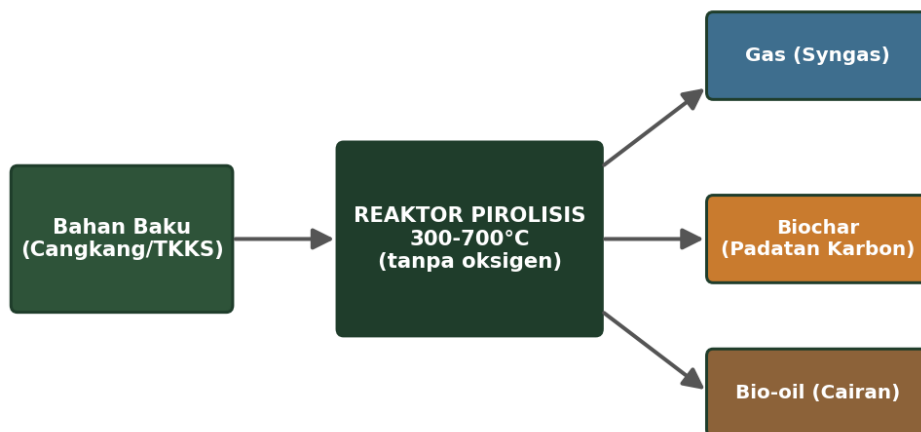
BAB 10. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Menjadi Biochar

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan konsep dan prinsip pembuatan biochar dari limbah kelapa sawit
2. Menjelaskan manfaat biochar bagi perbaikan kualitas tanah dan mitigasi perubahan iklim
3. Menjelaskan pengaruh parameter pirolisis terhadap karakteristik biochar

Diagram Proses Pirolisis dan Produk yang Dihasilkan



Gambar 10.1 Ilustrasi terkait materi Bab 10: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Menjadi Biochar

10.1 Konsep Biochar

Biochar adalah padatan berpori kaya karbon yang dihasilkan melalui proses pirolisis, yaitu pembakaran bahan organik pada suhu tinggi (300-700°C) dengan ketersediaan oksigen yang sangat terbatas (Wibowo & Lestari, 2020). Limbah kelapa sawit seperti cangkang, TKKS, dan pelepah dapat dijadikan bahan baku pembuatan biochar karena kandungan lignoselulosanya yang tinggi.

10.2 Proses Pembuatan Biochar dari Limbah Sawit

Proses pembuatan biochar umumnya melalui tahapan persiapan bahan baku (pengeringan dan pencacahan), pirolisis dalam reaktor tertutup dengan suhu dan waktu tinggal yang dikendalikan, serta pendinginan dan penghalusan biochar sebelum digunakan (Pusat Penelitian Kelapa Sawit, 2020). Semakin tinggi suhu pirolisis, umumnya semakin tinggi kandungan karbon tetap (fixed carbon) pada biochar yang dihasilkan, namun rendemen produk cenderung menurun.

Tabel 10.1 Proses Pembuatan Biochar dari Limbah Sawit

Suhu Pirolisis	Rendemen Biochar	Karakteristik Umum
300-400°C	Tinggi (~40-50%)	Karbon tetap lebih rendah, pori kurang berkembang
400-550°C	Sedang (~30-40%)	Keseimbangan karbon dan porositas
550-700°C	Rendah (~20-30%)	Karbon tetap tinggi, luas permukaan besar

10.3 Manfaat Biochar bagi Tanah dan Lingkungan

Aplikasi biochar ke dalam tanah memberikan berbagai manfaat, antara lain meningkatkan kapasitas tukar kation dan retensi air tanah, menyediakan habitat bagi mikroorganisme tanah yang menguntungkan, serta menurunkan kehilangan hara melalui pencucian (leaching) karena struktur pori biochar yang mampu mengikat unsur hara (Handayani & Pratama, 2014).

Dari sisi lingkungan global, biochar berperan sebagai media penyimpanan karbon jangka panjang (carbon sequestration), karena karbon dalam biochar bersifat stabil dan tidak mudah terurai kembali menjadi CO₂ dalam waktu singkat, sehingga pemanfaatannya turut mendukung upaya mitigasi perubahan iklim.

10.4 Aplikasi Biochar pada Tanaman Kelapa Sawit

Biochar dapat diaplikasikan langsung pada lubang tanam bibit di pembibitan (pre-nursery dan main-nursery), dicampurkan dengan kompos TKKS sebagai media tanam yang diperkaya, maupun diaplikasikan pada piringan tanaman menghasilkan sebagai pembenah tanah jangka panjang (Afrianti, 2023). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi biochar dengan pupuk organik memberikan hasil yang lebih baik

dibandingkan aplikasi tunggal, karena biochar membantu mempertahankan hara dari pupuk organik agar tidak mudah tercuci.

10.5 Karakterisasi Biochar untuk Aplikasi Spesifik

Karakteristik biochar yang dihasilkan perlu disesuaikan dengan tujuan aplikasinya. Biochar untuk perbaikan retensi air pada tanah berpasir umumnya membutuhkan luas permukaan dan porositas tinggi yang dihasilkan dari suhu pirolisis tinggi, sedangkan biochar untuk aplikasi jangka pendek pada media pembibitan dapat menggunakan suhu pirolisis sedang agar tetap menyediakan sejumlah hara yang mudah tersedia bagi tanaman muda.

10.6 Potensi Bio-oil sebagai Produk Samping Pirolisis

Selain biochar, proses pirolisis limbah kelapa sawit juga menghasilkan produk samping berupa bio-oil (cairan pekat berwarna gelap) dan gas non-kondensasi (syngas). Bio-oil berpotensi dimurnikan lebih lanjut menjadi bahan bakar cair alternatif atau bahan baku kimia, meskipun pada praktiknya proses pemurnian bio-oil dari limbah lignoselulosa masih memerlukan pengembangan teknologi lebih lanjut agar dapat digunakan secara komersial secara luas.

Studi Kasus: Pemanfaatan Biochar Cangkang pada Pembibitan Kelapa Sawit

Sebuah pusat pembibitan kelapa sawit melakukan uji coba pencampuran biochar cangkang dengan media tanam top soil dan kompos TKKS dengan perbandingan tertentu untuk bibit pada tahap main-nursery. Hasil pengamatan selama enam bulan menunjukkan pertumbuhan tinggi bibit dan diameter batang yang lebih baik pada media yang mengandung biochar dibandingkan media tanpa biochar, yang diduga berkaitan dengan perbaikan retensi air dan hara pada polybag pembibitan.

Berdasarkan hasil uji coba tersebut, perusahaan kemudian mempertimbangkan penerapan campuran biochar pada skala pembibitan komersial, sekaligus memanfaatkan cangkang sisa produksi yang sebelumnya seluruhnya digunakan sebagai bahan bakar boiler.

Studi Kasus Tambahan: Pengembangan Techno-Park Pengolahan Limbah Sawit Terpadu

Sebuah kawasan techno-park dikembangkan di dekat sentra industri kelapa sawit untuk menampung beberapa unit usaha pengolah produk turunan limbah sekaligus, seperti unit pengolahan kompos skala besar, unit produksi biochar, serta unit pengolahan pakan ternak dari bungkil inti sawit dan batang sawit, yang menerima pasokan bahan baku dari berbagai pabrik kelapa sawit di sekitarnya.

Model kawasan terpadu semacam ini memungkinkan skala ekonomi yang lebih besar dalam pengolahan limbah dibandingkan apabila setiap pabrik mengembangkan unit pengolahan sendiri-sendiri, sekaligus membuka lapangan kerja baru bagi masyarakat di sekitar kawasan techno-park tersebut.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah unit pirolisis mengolah 500 kg cangkang kering per batch dengan rendemen biochar 28%. Hitunglah jumlah biochar yang dihasilkan per batch, dan jika unit tersebut beroperasi 4 batch per hari, hitung produksi biochar harian!

Pembahasan: Biochar per batch = $500 \text{ kg} \times 28\% = 140 \text{ kg}$. Produksi harian = $140 \text{ kg} \times 4 \text{ batch} = 560 \text{ kg/hari}$. Dengan demikian, unit pirolisis tersebut mampu menghasilkan sekitar 560 kilogram biochar setiap harinya dari bahan baku cangkang kering, yang dapat digunakan untuk kebutuhan internal pembibitan maupun dipasarkan sebagai produk pembenah tanah.

Rangkuman

1. Biochar dihasilkan melalui proses pirolisis limbah kelapa sawit pada suhu tinggi dengan oksigen terbatas.
2. Suhu dan waktu pirolisis memengaruhi kandungan karbon tetap dan rendemen biochar yang dihasilkan.
3. Biochar bermanfaat memperbaiki kualitas tanah sekaligus berperan dalam penyimpanan karbon jangka panjang.
4. Kombinasi biochar dengan kompos memberikan hasil pertumbuhan tanaman yang lebih baik dibandingkan aplikasi tunggal.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan pengertian biochar dan proses pembuatannya!
2. Bagaimana pengaruh suhu pirolisis terhadap karakteristik biochar yang dihasilkan?
3. Sebutkan tiga manfaat aplikasi biochar terhadap sifat tanah!
4. Jelaskan peran biochar dalam mitigasi perubahan iklim!
5. Bandingkan proses pembuatan biochar (pirolisis) dengan proses pengomposan dari segi prinsip dasarnya!
6. Berdasarkan studi kasus, jelaskan mengapa kombinasi biochar dan kompos memberikan hasil lebih baik pada pembibitan!
7. Jelaskan tahapan umum dalam pembuatan biochar dari limbah kelapa sawit!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan bagaimana tujuan aplikasi biochar (retensi air vs sumber hara cepat tersedia) memengaruhi pilihan suhu pirolisis.
2. Diskusikan potensi pengembangan bio-oil sebagai produk samping pirolisis limbah kelapa sawit di masa depan.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Biochar adalah padatan kaya karbon hasil pirolisis (pemanasan tanpa oksigen) pada suhu 300-700°C.
2. Semakin tinggi suhu, semakin tinggi karbon tetap dan luas permukaan pori, namun rendemen produk menurun.
3. Meningkatkan KTK dan retensi air, menyediakan habitat mikroorganisme, dan mengurangi kehilangan hara akibat leaching.

4. Karbon dalam biochar bersifat stabil jangka panjang sehingga berperan sebagai media penyimpanan karbon (carbon sequestration).
5. Keduanya menguraikan bahan organik namun pengomposan bersifat biologis-aerobik/anaerobik pada suhu rendah, sedangkan pirolisis bersifat termokimia pada suhu tinggi tanpa oksigen.
6. Biochar membantu mempertahankan hara dari kompos agar tidak mudah tercuci sehingga tersedia lebih lama bagi tanaman.
7. Persiapan bahan baku, pirolisis terkendali, lalu pendinginan dan penghalusan biochar.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Biochar dihasilkan melalui proses...

- A. Fermentasi
- B. Pirolisis
- C. Pengomposan
- D. Hidrolisis enzimatis
- E. Distilasi

2. Rentang suhu umum proses pirolisis untuk menghasilkan biochar adalah...

- A. 50-100°C
- B. 100-200°C
- C. 300-700°C
- D. 1.000-1.500°C
- E. di atas 2.000°C

3. Semakin tinggi suhu pirolisis, umumnya karakteristik biochar yang dihasilkan adalah...

- A. Karbon tetap menurun
- B. Karbon tetap meningkat, rendemen menurun

- C. Rendemen meningkat drastis
 - D. Tidak berpengaruh
 - E. Kadar air meningkat
4. Manfaat biochar bagi lingkungan global adalah sebagai media...
- A. Penghasil pupuk kimia
 - B. Penyimpanan karbon jangka panjang
 - C. Sumber emisi metana baru
 - D. Peningkat suhu global
 - E. Bahan bakar fosil pengganti
5. Produk samping cair hasil pirolisis disebut...
- A. Syngas
 - B. Bio-oil
 - C. Kompos
 - D. Efluen
 - E. Bunch ash
6. Aplikasi biochar pada pembibitan kelapa sawit umumnya dicampurkan dengan...
- A. Pasir laut
 - B. Top soil dan kompos
 - C. Semen
 - D. Air laut
 - E. Minyak solar
7. Bio-oil hasil pirolisis berpotensi dimurnikan lebih lanjut menjadi...
- A. Pupuk organik
 - B. Bahan bakar cair alternatif
 - C. Pakan ternak
 - D. Bahan bangunan

E. Kompos

8. Karakteristik biochar yang dibutuhkan untuk aplikasi retensi air pada tanah berpasir adalah...

- A. Luas permukaan dan porositas rendah
- B. Luas permukaan dan porositas tinggi
- C. Kadar air tinggi
- D. Kandungan logam berat tinggi
- E. Warna terang

9. Biochar untuk aplikasi pada media pembibitan umumnya dibuat pada suhu pirolisis...

- A. Sangat rendah (di bawah 100°C)
- B. Sedang
- C. Sangat tinggi (di atas 1.000°C)
- D. Tidak memerlukan pemanasan
- E. Sama dengan suhu ruangan

10. Manfaat biochar dalam mengikat unsur hara pada tanah terutama disebabkan oleh...

- A. Warna gelapnya
- B. Struktur pori yang mengikat hara
- C. Kandungan airnya
- D. Beratnya yang ringan
- E. Bentuknya yang bulat

Kunci Jawaban Soal Objektif

1B 2C 3B 4B 5B 6B 7B 8B 9B 10B

BAB 11

Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Pupuk dan Pembenah Tanah

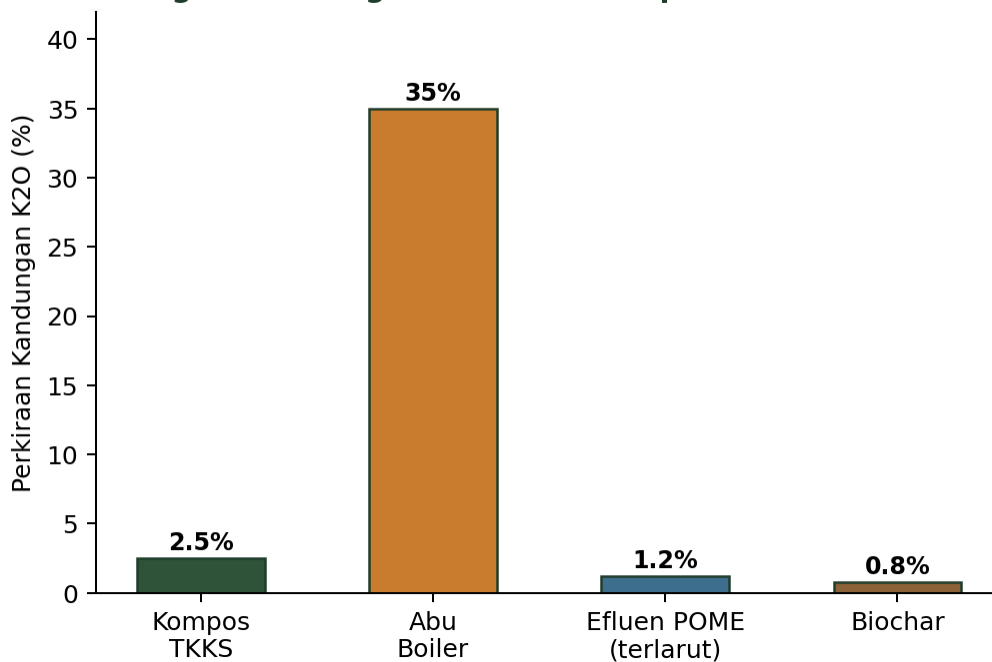
BAB 11. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Pupuk dan Pembenh Tanah

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan jenis pupuk dan pembenh tanah yang dapat dihasilkan dari limbah kelapa sawit
2. Menjelaskan aplikasi pupuk berbahan limbah kelapa sawit pada tanaman
3. Menjelaskan prinsip pemupukan berimbang yang memadukan pupuk organik dan anorganik

Perbandingan Kandungan Kalium (K₂O) pada Produk Limbah Sawit



Gambar 11.1 Ilustrasi terkait materi Bab 11: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Pupuk dan Pembenh Tanah

11.1 Jenis Pupuk Berbahan Limbah Kelapa Sawit

Berbagai jenis limbah kelapa sawit dapat diolah menjadi produk pupuk dan pembenh tanah, antara lain kompos TKKS sebagai pupuk organik padat, pupuk cair dari efluen POME yang telah diolah, abu boiler (bunch ash) hasil pembakaran cangkang dan serat

yang kaya kalium, serta biochar sebagai pembenah tanah (soil amendment) (Kementerian Pertanian, 2019).

11.2 Kandungan Hara Limbah Kelapa Sawit

Kompos TKKS diketahui kaya akan unsur kalium (K) yang merupakan unsur hara makro paling banyak dibutuhkan tanaman kelapa sawit, dengan kandungan K₂O dapat mencapai 2-3% pada basis kering, sementara abu boiler juga memiliki kandungan kalium yang sangat tinggi (dapat mencapai 30-40% K₂O) meskipun perlu diaplikasikan secara hati-hati karena sifatnya yang basa (pH tinggi, dapat mencapai 10-12) (Marbun & Silaen, 2017). Efluen POME kaya akan nitrogen, fosfor, dan kalium dalam bentuk terlarut yang mudah diserap tanaman apabila diaplikasikan dengan dosis yang tepat (Handayani & Pratama, 2014).

Tabel 11.1 Kandungan Hara Limbah Kelapa Sawit

Produk	Kandungan Utama	Catatan Aplikasi
Kompos TKKS	K ₂ O 2-3%, bahan organik tinggi	Aplikasi di piringan/gawangan
Abu boiler	K ₂ O 30-40%, pH basa tinggi	Dosis terbatas, hindari kontak akar langsung
Efluen POME olahan	N, P, K terlarut	Melalui sistem land application
Biochar	Karbon stabil, porositas tinggi	Campuran media tanam/pembenah tanah

11.3 Strategi Aplikasi Pupuk Organik pada Kebun

Aplikasi pupuk dan pembenah tanah berbahan limbah kelapa sawit sebaiknya dipadukan dengan program pemupukan berimbang (integrated nutrient management), yang mengombinasikan pupuk organik dari limbah dengan pupuk anorganik sesuai hasil analisis tanah dan daun, sehingga dapat mengoptimalkan efisiensi pemupukan sekaligus mengurangi biaya produksi dan dampak lingkungan dari penggunaan pupuk anorganik secara berlebihan (Nasution & Harahap, 2017).

Sebagai ilustrasi, apabila suatu blok kebun menerima aplikasi kompos TKKS setara 30-40 kg K₂O per hektare per tahun, maka dosis pupuk kalium anorganik (seperti

MOP/KCl) pada blok tersebut dapat dikurangi secara proporsional berdasarkan hasil perhitungan neraca hara, tanpa mengurangi total kebutuhan hara tanaman.

11.4 Pengemasan dan Pemasaran Pupuk Organik Limbah Sawit

Apabila produksi kompos TKKS atau pupuk cair POME melebihi kebutuhan internal kebun, perusahaan dapat mengembangkan unit pengemasan dan pemasaran pupuk organik kepada petani sekitar atau pasar pupuk organik yang lebih luas. Hal ini memerlukan proses tambahan seperti pengeringan, pengayakan, pengemasan dalam karung berlabel, serta pengujian mutu produk sesuai standar teknis pupuk organik yang berlaku, termasuk registrasi produk pada instansi terkait apabila dipasarkan secara komersial.

11.5 Kombinasi Pupuk Organik dan Pupuk Hayati

Selain dikombinasikan dengan pupuk anorganik, pupuk organik dari limbah kelapa sawit juga dapat dipadukan dengan pupuk hayati (biofertilizer) yang mengandung mikroorganisme fungsional seperti bakteri pelarut fosfat dan mikoriza, untuk meningkatkan efisiensi penyerapan hara oleh tanaman. Kombinasi ini dikenal sebagai pendekatan pemupukan terpadu (integrated fertilization) yang semakin banyak diterapkan pada perkebunan yang menargetkan sertifikasi pertanian berkelanjutan.

Studi Kasus: Substitusi Pupuk Kalium Anorganik dengan Kompos TKKS

Sebuah perkebunan di Sumatera Selatan melakukan uji substitusi pupuk kalium anorganik (MOP) dengan kompos TKKS pada beberapa blok tanaman menghasilkan. Blok yang menerima aplikasi kompos TKKS sebanyak 250 kg/pohon/tahun mengalami pengurangan dosis MOP hingga 40% dibandingkan dosis rekomendasi standar, namun tetap menunjukkan produktivitas TBS yang setara dengan blok kontrol yang menggunakan pupuk anorganik penuh.

Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi pupuk organik dari limbah kelapa sawit dengan program pemupukan anorganik dapat memberikan penghematan biaya pupuk yang signifikan tanpa mengorbankan produktivitas, sekaligus memberikan manfaat tambahan berupa perbaikan struktur dan kandungan bahan organik tanah dalam jangka panjang.

Studi Kasus Tambahan: Evaluasi Kegagalan Awal Proyek Biogas dan Perbaikannya

Sebuah PKS pernah mengalami kegagalan pada tahap awal proyek biogas akibat kebocoran lapisan HDPE pada covered lagoon digester yang menyebabkan gas metana lolos ke atmosfer dan menurunkan efisiensi produksi listrik dari yang direncanakan. Setelah dilakukan investigasi, ditemukan bahwa kebocoran disebabkan oleh kesalahan pemasangan pada sambungan lapisan penutup.

Perusahaan kemudian bekerja sama dengan kontraktor spesialis untuk memperbaiki seluruh sambungan lapisan HDPE serta menerapkan program inspeksi visual rutin, sehingga performa produksi biogas berangsur pulih mendekati kapasitas desain awal dalam beberapa bulan setelah perbaikan dilakukan.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Suatu blok kebun seluas 200 hektare direkomendasikan menerima aplikasi kompos TKKS dengan dosis 35 ton/hektare/tahun. Hitunglah total kebutuhan kompos TKKS untuk blok kebun tersebut dalam satu tahun!

Pembahasan: Total kebutuhan = $200 \text{ ha} \times 35 \text{ ton/ha} = 7.000 \text{ ton per tahun}$. Perusahaan perlu memastikan kapasitas produksi unit kompos mampu memenuhi kebutuhan sebesar 7.000 ton per tahun untuk blok kebun tersebut, atau merencanakan pembelian tambahan dari unit kompos pabrik mitra apabila kapasitas produksi internal belum mencukupi.

Rangkuman

1. Limbah kelapa sawit dapat diolah menjadi berbagai produk pupuk seperti kompos TKKS, pupuk cair POME, abu boiler, dan biochar.
2. Setiap jenis limbah memiliki karakteristik kandungan hara yang berbeda, terutama kaya unsur kalium.
3. Aplikasi pupuk organik limbah sawit sebaiknya dipadukan dengan pemupukan berimbang untuk hasil optimal.
4. Substitusi sebagian pupuk anorganik dengan pupuk organik limbah dapat menghemat biaya tanpa mengurangi produktivitas.

Soal Latihan (Esai)

1. Sebutkan empat jenis produk pupuk atau pembenah tanah yang dapat dihasilkan dari limbah kelapa sawit!
2. Mengapa kompos TKKS dan abu boiler dikenal kaya akan unsur kalium?
3. Jelaskan risiko aplikasi abu boiler secara berlebihan pada tanah!
4. Apa yang dimaksud dengan pemupukan berimbang (integrated nutrient management)?
5. Jelaskan manfaat memadukan pupuk organik limbah sawit dengan pupuk anorganik!
6. Berdasarkan studi kasus, jelaskan manfaat ekonomi dan agronomi dari substitusi pupuk kalium dengan kompos TKKS!
7. Jelaskan mengapa dosis pupuk anorganik perlu dihitung ulang setelah penerapan pupuk organik dari limbah!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan peluang dan tantangan pengembangan unit pengemasan dan pemasaran pupuk organik limbah sawit kepada petani sekitar.
2. Diskusikan manfaat kombinasi pupuk organik dengan pupuk hayati pada program pemupukan terpadu.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Kompos TKKS, pupuk cair POME, abu boiler (bunch ash), dan biochar.
2. Karena TKKS dan abu boiler berasal dari bagian tanaman/proses yang secara alami mengakumulasi kalium dalam jumlah besar.

3. Abu boiler bersifat basa tinggi sehingga aplikasi berlebihan dapat meningkatkan pH tanah secara drastis dan mengganggu ketersediaan hara lain.
4. Pendekatan pemupukan yang memadukan sumber hara organik dan anorganik berdasarkan hasil analisis tanah/daun secara berimbang.
5. Mengurangi biaya pupuk anorganik sekaligus memperbaiki struktur dan kandungan bahan organik tanah dalam jangka panjang.
6. Substitusi pupuk kalium dengan kompos TKKS menghemat biaya MOP hingga 40% tanpa mengurangi produktivitas TBS.
7. Karena kontribusi hara dari pupuk organik perlu diperhitungkan agar total pasokan hara tetap sesuai kebutuhan tanaman.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Unsur hara makro yang paling banyak terkandung dalam kompos TKKS dan abu boiler adalah...
 - A. Nitrogen
 - B. Fosfor
 - C. Kalium
 - D. Kalsium
 - E. Magnesium
2. Sifat abu boiler yang perlu diwaspadai dalam aplikasi ke tanah adalah...
 - A. Terlalu asam
 - B. Bersifat basa tinggi (pH tinggi)
 - C. Mengandung logam berat B3
 - D. Mudah terbakar
 - E. Tidak larut air
3. Pendekatan pemupukan yang memadukan sumber hara organik dan anorganik disebut...

- A. Pemupukan tunggal
 - B. Integrated nutrient management
 - C. Pemupukan darurat
 - D. Pemupukan spot fertilization saja
 - E. Pemupukan foliar eksklusif
4. Substitusi pupuk kalium anorganik dengan kompos TKKS pada studi kasus bab ini mampu menghemat MOP hingga...
- A. 5%
 - B. 10%
 - C. 20%
 - D. 40%
 - E. 90%
5. Pupuk hayati (biofertilizer) yang dipadukan dengan pupuk organik limbah sawit umumnya mengandung...
- A. Logam berat
 - B. Bakteri pelarut fosfat dan mikoriza
 - C. Pestisida sintetis
 - D. Herbisida
 - E. Bahan pengawet kimia
6. Sebelum dipasarkan secara komersial, kompos TKKS perlu melalui proses tambahan berupa...
- A. Pembakaran
 - B. Pengeringan, pengayakan, dan pengemasan
 - C. Pencairan
 - D. Pembekuan
 - E. Sterilisasi radiasi

7. Kombinasi pupuk organik dan pupuk hayati dalam satu program pemupukan dikenal dengan istilah...

- A. Pemupukan tunggal
- B. Pemupukan terpadu (integrated fertilization)
- C. Pemupukan darurat
- D. Pemupukan spot fertilization
- E. Pemupukan foliar eksklusif

8. Dosis rekomendasi umum aplikasi kompos TKKS pada perkebunan berkisar...

- A. 1-2 ton/ha/tahun
- B. 30-40 ton/ha/tahun
- C. 100 ton/ha/tahun
- D. 500 ton/ha/tahun
- E. Tidak ada dosis standar

9. Kandungan protein pada bungkil inti sawit yang bermanfaat sebagai pakan berkisar antara...

- A. 1-3%
- B. 14-18%
- C. 40-50%
- D. 70-80%
- E. 90%

10. Registrasi produk pupuk organik komersial di Indonesia mengacu pada regulasi dari...

- A. Kementerian Perhubungan
- B. Kementerian Pertanian
- C. Kementerian Perindustrian
- D. Kementerian Kesehatan
- E. Kementerian ESDM

Kunci Jawaban Soal Objektif

1C 2B 3B 4D 5B 6B 7B 8B 9B 10B

BAB 12. Pengendalian Pencemaran dan Keselamatan Kerja dalam Pengelolaan Limbah

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan risiko pencemaran lingkungan dalam pengelolaan limbah kelapa sawit
2. Menjelaskan aspek keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dalam pengelolaan limbah
3. Menyusun prosedur tanggap darurat pada unit pengolahan limbah



Paling efektif (atas) hingga paling akhir diandalkan (bawah)

Gambar 12.1 Ilustrasi terkait materi Bab 12: Pengendalian Pencemaran dan Keselamatan Kerja dalam Pengelolaan Limbah

12.1 Risiko Pencemaran dalam Pengelolaan Limbah

Pengelolaan limbah kelapa sawit yang tidak tepat dapat menimbulkan berbagai risiko pencemaran, antara lain pencemaran air akibat kebocoran atau luapan kolam limbah, pencemaran udara akibat emisi metana dan bau dari kolam anaerobik terbuka, serta pencemaran tanah akibat aplikasi limbah cair yang berlebihan pada lahan (over dosage land application) (Firmansyah & Utami, 2021).

12.2 Upaya Pengendalian Pencemaran

Pengendalian pencemaran dapat dilakukan melalui beberapa langkah, antara lain pemasangan sistem penutup pada kolam anaerobik untuk menangkap gas metana, pemantauan kualitas efluen secara rutin sebelum dibuang ke badan air, penerapan sistem tanggap darurat (spill control) untuk mengantisipasi kebocoran kolam, serta pengelolaan dosis dan jadwal land application sesuai dengan kapasitas serap lahan.

12.3 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Kegiatan pengelolaan limbah kelapa sawit memiliki risiko kerja yang perlu diantisipasi, seperti risiko keracunan gas hidrogen sulfida (H_2S) dan risiko kebakaran/ledakan akibat akumulasi gas metana di area kolam anaerobik dan digester biogas, risiko tergelincir atau terjatuh di area kolam yang licin, serta risiko iritasi kulit dan pernapasan akibat paparan bahan kimia pada proses pengolahan (Tampubolon & Sinaga, 2016).

Penerapan K3 dalam pengelolaan limbah kelapa sawit meliputi penyediaan alat pelindung diri (APD) yang sesuai, pemasangan alat deteksi gas dan sistem ventilasi pada area digester tertutup, pelatihan tanggap darurat bagi pekerja, serta penerapan prosedur kerja aman (standard operating procedure/SOP) pada setiap tahapan pengolahan limbah.

12.4 Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko

Setiap unit pengolahan limbah sebaiknya memiliki dokumen identifikasi bahaya dan penilaian risiko (Hazard Identification and Risk Assessment/HIRA) yang mencakup identifikasi sumber bahaya, penilaian tingkat keparahan dan kemungkinan terjadinya insiden, serta penetapan langkah pengendalian pada setiap titik berisiko, mulai dari

area kolam, digester, hingga area penyimpanan bahan bakar boiler (Kementerian Ketenagakerjaan, 2018).

Tabel 12.1 Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko

Area Kerja	Potensi Bahaya	Langkah Pengendalian
Kolam anaerobik	Gas H ₂ S/CH ₄ , tenggelam	Pagar pengaman, rambu, APD gas detector
Digester biogas	Kebakaran/ledakan	Ventilasi, larangan sumber api, prosedur LOTO
Area boiler	Luka bakar, kebakaran	APD tahan panas, sistem pemadam kebakaran
Land application	Paparan efluen, kontaminasi kulit	APD sarung tangan & sepatu boot, SOP dosis

12.5 Prosedur Tanggap Darurat

Prosedur tanggap darurat perlu disusun untuk mengantisipasi berbagai skenario insiden, seperti kebocoran kolam limbah, kebakaran pada area boiler atau digester, maupun paparan gas beracun pada pekerja (Susanto dkk., 2019). Prosedur ini umumnya mencakup jalur evakuasi, titik kumpul, daftar kontak darurat, serta pelatihan simulasi tanggap darurat secara berkala bagi seluruh pekerja yang bertugas di area pengolahan limbah.

12.6 Audit Lingkungan dan Kepatuhan Regulasi

Selain pemantauan rutin, perusahaan perkebunan dan pabrik kelapa sawit perlu melakukan audit lingkungan secara berkala, baik audit internal maupun audit oleh pihak eksternal independen, untuk memastikan kepatuhan terhadap dokumen lingkungan, izin lingkungan, dan baku mutu yang berlaku. Hasil audit menjadi dasar bagi manajemen untuk melakukan perbaikan berkelanjutan pada sistem pengelolaan lingkungan dan limbah perusahaan.

12.7 Pelaporan dan Transparansi Kinerja Lingkungan

Perusahaan yang telah menerapkan sertifikasi keberlanjutan seperti ISPO dan RSPO umumnya diwajibkan menyusun laporan kinerja lingkungan secara berkala, yang

memuat data pemantauan kualitas air, udara, serta capaian program pengelolaan limbah, sebagai bentuk transparansi kepada pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, pembeli produk, dan masyarakat sekitar. Pelaporan yang transparan turut membangun kepercayaan pasar terhadap komitmen keberlanjutan perusahaan.

Studi Kasus: Insiden dan Perbaikan Sistem K3 pada Unit Biogas

Pada sebuah pabrik kelapa sawit, terjadi insiden kebocoran kecil pada sambungan pipa biogas yang menyebabkan bau menyengat di area sekitar digester. Setelah investigasi, ditemukan bahwa kebocoran disebabkan oleh korosi pada sambungan pipa yang tidak terpantau secara rutin. Perusahaan kemudian menyusun program inspeksi berkala terhadap seluruh jalur pipa biogas, memasang detektor gas otomatis dengan alarm di beberapa titik strategis, serta mewajibkan penggunaan alat pelindung pernapasan bagi pekerja yang bertugas di sekitar area digester.

Setelah perbaikan sistem tersebut diterapkan, tidak ditemukan insiden serupa dalam periode operasional berikutnya, dan perusahaan juga mulai menerapkan program pelatihan K3 khusus bagi pekerja unit pengolahan limbah secara rutin setiap enam bulan.

Studi Kasus Tambahan: Pelatihan K3 Berkala bagi Operator Unit Limbah

Sebuah perusahaan menerapkan program pelatihan K3 wajib setiap enam bulan bagi seluruh operator yang bertugas di unit pengolahan limbah, mencakup materi identifikasi bahaya gas, penggunaan APD yang benar, serta simulasi tanggap darurat kebocoran gas dan kebakaran. Pelatihan ini dievaluasi melalui uji kompetensi praktis di lapangan, bukan hanya ujian tertulis.

Setelah program ini diterapkan secara konsisten selama dua tahun, perusahaan mencatat penurunan signifikan pada jumlah nyaris celaka (near-miss incident) yang dilaporkan oleh operator, yang menunjukkan peningkatan kesadaran dan kompetensi K3 di lapangan.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah pabrik menetapkan target penurunan insiden K3 sebesar 50% dalam dua tahun. Jika jumlah insiden pada tahun dasar adalah 18 kejadian per tahun, berapa target maksimum jumlah insiden pada tahun kedua?

Pembahasan: Target penurunan = $50\% \times 18 = 9$ kejadian. Target maksimum pada tahun kedua = $18 - 9 = 9$ kejadian per tahun. Pabrik tersebut perlu menekan jumlah insiden K3 menjadi maksimal 9 kejadian per tahun pada akhir tahun kedua program, melalui penguatan pelatihan, pengawasan, dan perbaikan prosedur kerja aman.

Rangkuman

1. Pengelolaan limbah yang tidak tepat berisiko menimbulkan pencemaran air, udara, dan tanah.
2. Pengendalian pencemaran memerlukan sistem penutup kolam, pemantauan rutin, dan pengelolaan dosis land application.
3. Aspek K3 penting diterapkan mengingat risiko gas beracun, kebakaran, dan kecelakaan kerja di area pengolahan limbah.
4. Dokumen HIRA dan prosedur tanggap darurat penting disusun untuk setiap area kerja pengolahan limbah.

Soal Latihan (Esai)

1. Sebutkan tiga risiko pencemaran lingkungan yang dapat timbul dari pengelolaan limbah kelapa sawit yang tidak tepat!
2. Jelaskan upaya pengendalian pencemaran pada sistem kolam limbah cair!
3. Mengapa gas hidrogen sulfida (H_2S) berbahaya bagi pekerja di area pengolahan limbah?
4. Sebutkan aspek K3 yang perlu diterapkan pada area digester biogas tertutup!
5. Jelaskan pentingnya SOP dalam kegiatan pengelolaan limbah pabrik kelapa sawit!
6. Jelaskan komponen yang perlu ada dalam dokumen HIRA pada unit pengolahan limbah!
7. Berdasarkan studi kasus, jelaskan langkah perbaikan yang dilakukan perusahaan setelah insiden kebocoran biogas!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan manfaat audit lingkungan eksternal independen dibandingkan hanya mengandalkan audit internal perusahaan.
2. Diskusikan pentingnya transparansi pelaporan kinerja lingkungan bagi kepercayaan pasar terhadap produk kelapa sawit.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Pencemaran air (kebocoran kolam), pencemaran udara (bau/metana), dan pencemaran tanah (over dosage land application).
2. Pemasangan penutup kolam, pemantauan efluen rutin, sistem tanggap darurat kebocoran, dan pengelolaan dosis land application.
3. Karena H₂S bersifat toksik pada konsentrasi tinggi dan dapat menyebabkan keracunan bahkan kematian bila terhirup dalam ruang tertutup.
4. Deteksi gas dan ventilasi, larangan sumber api, dan prosedur LOTO saat perawatan peralatan.
5. SOP memastikan konsistensi praktik kerja aman dan meminimalkan variasi human error pada setiap tahapan pengolahan limbah.
6. Identifikasi sumber bahaya, penilaian keparahan/kemungkinan insiden, dan penetapan langkah pengendalian pada setiap titik berisiko.
7. Perusahaan memasang program inspeksi berkala, detektor gas otomatis, dan mewajibkan APD pernapasan di sekitar digester.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Gas yang paling berbahaya bagi pekerja di sekitar kolam anaerobik dan digester biogas adalah...

- A. Oksigen
- B. Nitrogen
- C. Hidrogen sulfida (H_2S)
- D. Argon
- E. Helium

2. Dokumen yang memuat identifikasi bahaya dan penilaian risiko disingkat...

- A. AMDAL
- B. HIRA
- C. RKL-RPL
- D. SOP
- E. ISPO

3. Prosedur penguncian dan pelabelan peralatan saat perawatan dikenal dengan istilah...

- A. LOTO
- B. HIRA
- C. APD
- D. SOP darurat
- E. K3L

4. Upaya pengendalian pencemaran pada kolam anaerobik terbuka dapat dilakukan dengan...

- A. Membiarkan kolam terbuka tanpa penutup
- B. Memasang sistem penutup untuk menangkap gas metana
- C. Menambah volume tanpa pengawasan
- D. Mengurangi frekuensi pemantauan
- E. Menghentikan seluruh pemantauan

5. Tingkat pengendalian risiko K3 yang paling akhir diandalkan dalam hierarki pengendalian adalah...

- A. Eliminasi
- B. Substitusi
- C. Rekayasa teknik
- D. Pengendalian administratif
- E. Alat Pelindung Diri (APD)

6. Dosis dan jadwal land application perlu dikendalikan untuk mencegah...

- A. Peningkatan produktivitas berlebihan
- B. Pencemaran tanah dan air tanah
- C. Penurunan biaya operasional
- D. Peningkatan hasil panen instan
- E. Tidak ada risiko yang perlu dicegah

7. Alat yang wajib digunakan petugas saat memasuki area digester biogas tertutup adalah...

- A. Kacamata renang
- B. Gas detector dan APD lengkap
- C. Payung
- D. Sepatu olahraga biasa
- E. Tidak diperlukan alat khusus

8. Dokumen yang mencatat kronologi kejadian kebocoran limbah dan tindakan yang diambil disebut...

- A. Dokumentasi manajemen lingkungan
- B. Iklan perusahaan
- C. Laporan keuangan
- D. Katalog produk
- E. Brosur pemasaran

9. Tujuan utama survei kepuasan masyarakat sekitar pabrik terkait pengelolaan limbah adalah...

- A. Meningkatkan penjualan CPO
- B. Memantau dampak sosial dan kesehatan masyarakat
- C. Menambah jumlah karyawan
- D. Menurunkan upah pekerja
- E. Mengurangi produksi

10. Root cause analysis dilakukan setelah insiden kebocoran bertujuan untuk...

- A. Menutupi kejadian
- B. Mencari akar penyebab agar tidak terulang
- C. Menambah anggaran promosi
- D. Mempercepat produksi
- E. Mengurangi jumlah pekerja

Kunci Jawaban Soal Objektif

1C 2B 3A 4B 5E 6B 7B 8A 9B 10B

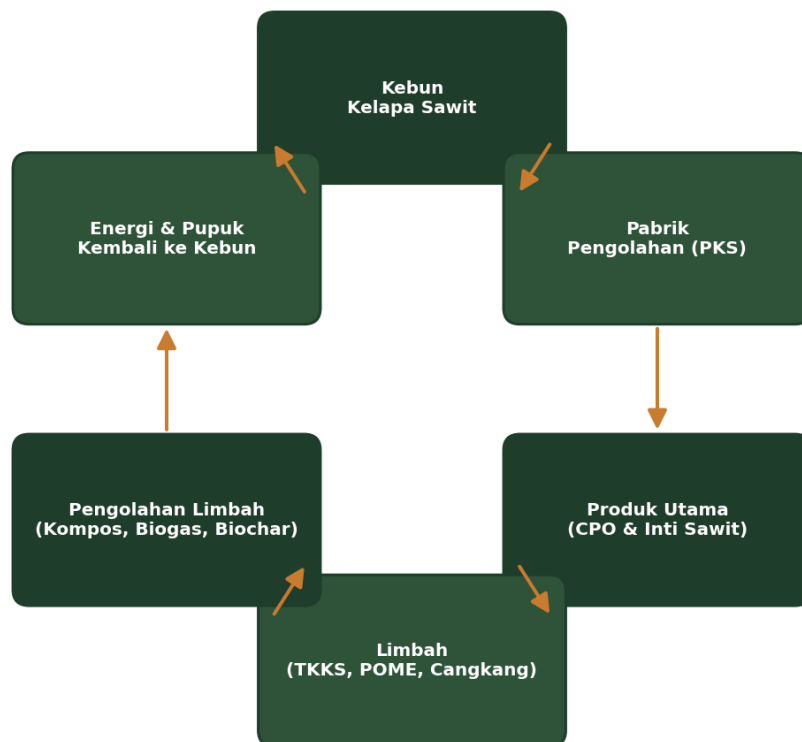
BAB 13. Ekonomi Sirkular dan Industri Kelapa Sawit Berkelanjutan

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan konsep ekonomi sirkular dan relevansinya dengan industri kelapa sawit
2. Menjelaskan penerapan prinsip ekonomi sirkular pada pengelolaan limbah kelapa sawit
3. Menganalisis kontribusi ekonomi sirkular terhadap tiga pilar keberlanjutan

Diagram Sistem Loop Tertutup (Closed-Loop) Ekonomi Sirkular Kelapa Sawit



Gambar 13.1 Ilustrasi terkait materi Bab 13: Ekonomi Sirkular dan Industri Kelapa Sawit Berkelanjutan

13.1 Konsep Ekonomi Sirkular

Ekonomi sirkular adalah model ekonomi yang dirancang untuk meminimalkan limbah dan memaksimalkan pemanfaatan sumber daya melalui siklus penggunaan kembali, perbaikan, dan daur ulang, sebagai lawan dari model ekonomi linear yang berpola ambil-buat-buang (take-make-dispose) (Purwanto & Wardhani, 2019). Dalam konteks industri kelapa sawit, ekonomi sirkular berarti mengubah paradigma limbah dari sekadar produk sisa menjadi sumber daya bernilai tambah yang dapat dimanfaatkan kembali dalam sistem produksi.

13.2 Penerapan Ekonomi Sirkular pada Industri Kelapa Sawit

Penerapan ekonomi sirkular pada industri kelapa sawit dapat dilihat dari berbagai praktik yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya, seperti pemanfaatan TKKS dan efluen POME sebagai pupuk organik yang dikembalikan ke lahan, pemanfaatan cangkang dan serat sebagai bahan bakar boiler yang memenuhi kebutuhan energi pabrik secara mandiri, produksi biogas dari POME sebagai sumber energi listrik, serta pengolahan biochar sebagai media penyimpanan karbon dan pembenah tanah.

Integrasi berbagai praktik pemanfaatan limbah tersebut membentuk apa yang dikenal sebagai sistem loop tertutup (closed-loop system), di mana hampir seluruh limbah yang dihasilkan dari proses produksi dapat dikembalikan ke dalam siklus produksi, baik sebagai input energi, hara, maupun bahan baku produk turunan lainnya (Afrianti, 2023).

13.3 Keberlanjutan Industri Kelapa Sawit

Penerapan ekonomi sirkular pada pengelolaan limbah memberikan kontribusi terhadap pencapaian keberlanjutan industri kelapa sawit dari tiga aspek utama, yaitu aspek lingkungan melalui pengurangan pencemaran dan emisi gas rumah kaca, aspek ekonomi melalui penghematan biaya energi dan pupuk serta peluang pendapatan tambahan dari produk turunan limbah, dan aspek sosial melalui penciptaan lapangan kerja baru pada unit pengolahan limbah.

Sertifikasi keberlanjutan seperti ISPO dan RSPO turut mendorong perusahaan untuk menerapkan prinsip ekonomi sirkular sebagai bagian dari pemenuhan kriteria pengelolaan lingkungan, sehingga penerapan ekonomi sirkular tidak hanya bermanfaat

secara internal, tetapi juga meningkatkan daya saing produk kelapa sawit Indonesia di pasar global yang semakin memperhatikan aspek keberlanjutan (Napitupulu & Br Sitorus, 2018).

13.4 Analisis Nilai Tambah Produk Turunan Limbah

Setiap jenis limbah kelapa sawit memiliki rantai nilai tersendiri apabila diolah menjadi produk turunan (Gultom & Simorangkir, 2015). TKKS dapat diolah menjadi kompos, serat rayon, atau papan partikel; cangkang dapat diolah menjadi arang aktif atau bahan bakar ekspor; sedangkan POME dapat menghasilkan biogas dan pupuk cair. Analisis nilai tambah ini penting bagi manajemen perusahaan dalam menentukan prioritas investasi teknologi pengolahan limbah berdasarkan potensi keuntungan ekonomi dan kesiapan pasar masing-masing produk turunan.

13.5 Indikator Pengukuran Ekonomi Sirkular

Untuk mengukur sejauh mana suatu perusahaan telah menerapkan ekonomi sirkular, dapat digunakan beberapa indikator, seperti tingkat pemanfaatan limbah (waste utilization rate), rasio energi terbarukan terhadap total konsumsi energi pabrik, volume emisi gas rumah kaca yang berhasil dihindari (avoided emission), serta nilai ekonomi produk turunan limbah yang dihasilkan per ton TBS yang diolah. Indikator-indikator ini dapat digunakan sebagai dasar penyusunan laporan keberlanjutan (sustainability report) perusahaan.

13.6 Tantangan Penerapan Ekonomi Sirkular pada Skala Industri

Meskipun konsep ekonomi sirkular menjanjikan berbagai manfaat, penerapannya pada skala industri kelapa sawit masih menghadapi tantangan, seperti kebutuhan investasi awal yang besar untuk membangun unit-unit pengolahan limbah terintegrasi, keterbatasan pasar bagi sebagian produk turunan limbah, serta kebutuhan kompetensi sumber daya manusia yang mumpuni dalam mengoperasikan teknologi pengolahan limbah secara efisien dan aman.

Studi Kasus: Model Bisnis Ekonomi Sirkular Terpadu pada Grup Perusahaan Kelapa Sawit

Sebuah grup perusahaan kelapa sawit dengan beberapa unit pabrik mengembangkan model bisnis terpadu yang menghubungkan seluruh aliran limbah antarunit usaha.

Cangkang dari seluruh pabrik dikumpulkan pada satu unit pengolahan bersama untuk diproses menjadi biochar dan produk ekspor, sementara TKKS diolah menjadi kompos yang didistribusikan ke seluruh kebun inti dan plasma milik grup perusahaan. Unit biogas dari beberapa pabrik terhubung ke jaringan listrik internal grup untuk saling menopang kebutuhan energi antarunit usaha, termasuk pabrik pengolahan hilir seperti pabrik pengolahan minyak goreng.

Model bisnis ini menunjukkan bahwa penerapan ekonomi sirkular dapat dikembangkan tidak hanya pada skala satu pabrik, tetapi juga pada skala grup perusahaan yang lebih luas, sehingga menciptakan efisiensi sumber daya dan nilai tambah ekonomi yang lebih besar melalui skala ekonomi (economies of scale).

Studi Kasus Tambahan: Model Bisnis Karbon Kredit dari Proyek Biogas POME

Sebuah perusahaan mendaftarkan proyek biogas POME miliknya pada skema perdagangan karbon untuk memperoleh sertifikat pengurangan emisi (carbon credit) yang dapat dijual kepada pembeli korporasi yang membutuhkan offset emisi karbon. Proses ini memerlukan verifikasi independen terhadap volume metana yang berhasil ditangkap dan dimanfaatkan dibandingkan skenario baseline tanpa proyek.

Pendapatan tambahan dari penjualan kredit karbon ini membantu mempercepat periode pengembalian modal proyek biogas, sekaligus memberikan insentif tambahan bagi perusahaan lain untuk mengembangkan proyek serupa pada pabrik kelapa sawit mereka.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Suatu pabrik menghasilkan total limbah padat dan cair setara 1.400 ton per hari (basis tertentu), dan dari jumlah tersebut sebanyak 1.260 ton berhasil dimanfaatkan menjadi produk turunan. Hitunglah waste utilization rate pabrik tersebut!

Pembahasan: $\text{Waste utilization rate} = (\text{limbah dimanfaatkan} / \text{total limbah}) \times 100\%$
 $= (1.260 / 1.400) \times 100\% = 90\%$. Pabrik tersebut telah mencapai tingkat pemanfaatan limbah sebesar 90%, sebuah capaian yang tergolong tinggi dan mendekati prinsip ekonomi sirkular yang ideal, meskipun masih terdapat 10% residu yang perlu dikelola lebih lanjut agar dapat dimanfaatkan sepenuhnya.

Rangkuman

5. Ekonomi sirkular mengubah paradigma limbah kelapa sawit dari produk sisa menjadi sumber daya bernilai tambah.
6. Integrasi berbagai praktik pemanfaatan limbah membentuk sistem loop tertutup pada industri kelapa sawit.
7. Penerapan ekonomi sirkular mendukung keberlanjutan industri dari aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial.
8. Analisis nilai tambah produk turunan limbah membantu menentukan prioritas investasi teknologi pengolahan.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara model ekonomi linear dan ekonomi sirkular!
2. Berikan tiga contoh penerapan ekonomi sirkular pada pengelolaan limbah kelapa sawit!
3. Apa yang dimaksud dengan sistem loop tertutup (closed-loop system) pada industri kelapa sawit?
4. Jelaskan kontribusi ekonomi sirkular terhadap tiga aspek keberlanjutan (lingkungan, ekonomi, sosial)!
5. Bagaimana sertifikasi ISPO dan RSPO berperan dalam mendorong penerapan ekonomi sirkular?
6. Berdasarkan studi kasus, jelaskan manfaat penerapan ekonomi sirkular pada skala grup perusahaan dibandingkan skala satu pabrik!
7. Jelaskan mengapa analisis nilai tambah produk turunan limbah penting bagi keputusan investasi perusahaan!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan indikator mana yang paling relevan digunakan untuk mengukur keberhasilan penerapan ekonomi sirkular pada suatu pabrik kelapa sawit.

2. Diskusikan solusi yang dapat ditempuh perusahaan skala kecil dan menengah untuk mengatasi keterbatasan investasi dalam menerapkan ekonomi sirkular.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Linear berpola ambil-buat-buang, sedangkan sirkular memaksimalkan penggunaan kembali dan daur ulang sumber daya termasuk limbah.
2. Pemanfaatan TKKS/POME sebagai pupuk, cangkang/serat sebagai bahan bakar boiler, dan biogas POME sebagai listrik.
3. Sistem di mana output limbah suatu unit menjadi input bagi unit pengolahan lain, meminimalkan residu akhir yang dibuang.
4. Lingkungan: mengurangi pencemaran/emisi; Ekonomi: menghemat biaya energi-pupuk dan membuka pendapatan baru; Sosial: menciptakan lapangan kerja baru.
5. Kedua sertifikasi mensyaratkan praktik pengelolaan lingkungan bertanggung jawab, mendorong perusahaan menerapkan ekonomi sirkular untuk memenuhi kriteria tersebut.
6. Skala grup memungkinkan integrasi lintas unit usaha (economies of scale) yang lebih efisien dibandingkan satu pabrik saja.
7. Membantu manajemen menentukan prioritas investasi berdasarkan potensi keuntungan dan kesiapan pasar masing-masing produk turunan.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Model ekonomi yang meminimalkan limbah melalui reuse dan recycle disebut...
 - A. Ekonomi linear
 - B. Ekonomi sirkular
 - C. Ekonomi ekstraktif
 - D. Ekonomi konsumtif

E. Ekonomi tersembunyi

2. Pola ekonomi linear dicirikan dengan alur...

- A. Ambil-buat-buang
- B. Ambil-olah-kembalikan
- C. Kumpul-daur ulang-jual
- D. Simpan-tunda-manfaatkan
- E. Bagi-pakai-simpan

3. Sistem di mana output satu unit pengolahan menjadi input unit lain disebut...

- A. Open-loop system
- B. Closed-loop system
- C. Linear supply chain
- D. Single-use system
- E. Disposable system

4. Sertifikasi yang mendorong penerapan ekonomi sirkular pada industri kelapa sawit antara lain...

- A. ISO 9001 saja
- B. ISPO dan RSPO
- C. HACCP
- D. SNI pangan
- E. Halal MUI saja

5. Indikator waste utilization rate menunjukkan...

- A. Total produksi CPO
- B. Persentase limbah yang berhasil dimanfaatkan
- C. Harga jual produk turunan
- D. Jumlah karyawan pabrik
- E. Luas areal kebun

6. Manfaat penerapan ekonomi sirkular pada aspek sosial adalah...
- A. Menutup lapangan kerja
 - B. Menciptakan lapangan kerja baru pada unit pengolahan limbah
 - C. Mengurangi kesejahteraan masyarakat
 - D. Meningkatkan konflik sosial
 - E. Tidak berdampak sosial
7. Rantai nilai TKKS yang dapat diolah menjadi produk bernilai tinggi selain kompos adalah...
- A. Serat rayon dan papan partikel
 - B. Bensin
 - C. Susu
 - D. Semen
 - E. Kaca
8. Manfaat ekonomi sirkular bagi daya saing produk kelapa sawit Indonesia di pasar global adalah...
- A. Menurunkan kualitas produk
 - B. Meningkatkan daya saing melalui pemenuhan kriteria keberlanjutan
 - C. Mengurangi ekspor
 - D. Menutup akses pasar
 - E. Tidak berpengaruh
9. Tantangan utama penerapan ekonomi sirkular pada skala industri kelapa sawit meliputi...
- A. Investasi awal besar dan keterbatasan pasar produk turunan
 - B. Tidak ada tantangan
 - C. Kelebihan modal
 - D. Kelebihan SDM terampil
 - E. Permintaan pasar yang menurun drastis

10. Contoh indikator pengukuran keberhasilan ekonomi sirkular pada pabrik kelapa sawit adalah...

- A. Harga saham perusahaan
- B. Waste utilization rate dan rasio energi terbarukan
- C. Jumlah pesaing
- D. Luas kantor pusat
- E. Jumlah kendaraan dinas

Kunci Jawaban Soal Objektif

1B 2A 3B 4B 5B 6B 7A 8B 9A 10B

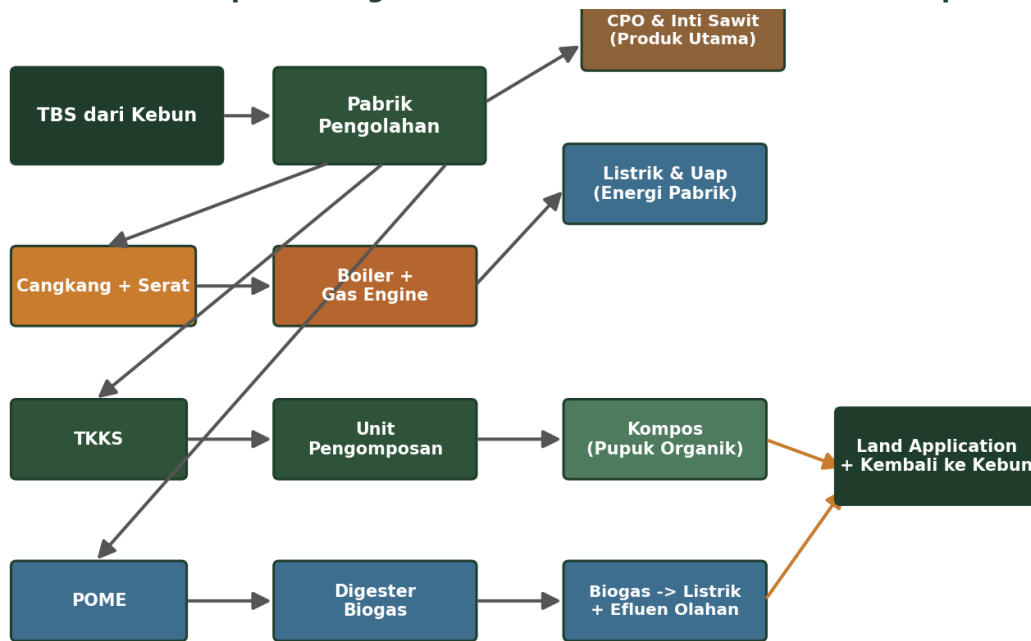
BAB 14. Perancangan Sistem Terpadu Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit

Capaian Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu:

1. Menjelaskan prinsip perancangan sistem terpadu pengelolaan limbah kelapa sawit
2. Menyusun kerangka perencanaan sistem pengelolaan limbah terpadu pada suatu pabrik kelapa sawit
3. Mengevaluasi kinerja sistem pengelolaan limbah terpadu

Skema Sistem Terpadu Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit



Gambar 14.1 Ilustrasi terkait materi Bab 14: Perancangan Sistem Terpadu Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit

14.1 Konsep Sistem Terpadu

Sistem terpadu pengelolaan limbah kelapa sawit adalah suatu pendekatan perencanaan yang mengintegrasikan seluruh jenis limbah (padat, cair, dan gas) beserta teknologi pengolahannya ke dalam satu kesatuan sistem yang saling terhubung, sehingga output dari satu unit pengolahan dapat menjadi input bagi unit pengolahan lainnya, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular yang telah dibahas pada bab sebelumnya (Br Tampubolon & Sagala, 2021).

14.2 Tahapan Perancangan Sistem Terpadu

Perancangan sistem terpadu pengelolaan limbah pada suatu pabrik kelapa sawit umumnya melalui beberapa tahapan, yaitu: (1) inventarisasi dan kuantifikasi seluruh jenis limbah yang dihasilkan berdasarkan kapasitas olah pabrik; (2) identifikasi alternatif teknologi pengolahan dan pemanfaatan untuk setiap jenis limbah; (3) analisis kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan dari setiap alternatif; (4) perancangan tata letak (layout) unit pengolahan limbah yang terintegrasi; dan (5) penyusunan rencana operasional, pemantauan, serta evaluasi kinerja sistem (Br Manik & Purba, 2022).

14.3 Contoh Skema Sistem Terpadu

Sebagai ilustrasi, pada suatu sistem terpadu, TKKS dapat diarahkan untuk diolah menjadi kompos menggunakan efluen POME hasil pengolahan biogas sebagai sumber aktivator sekaligus sumber air dan hara, sehingga mengurangi kebutuhan air bersih dalam proses pengomposan sekaligus mengurangi volume efluen yang harus dibuang. Cangkang dan serat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler, sementara POME diproses melalui digester biogas tertutup yang biogasnya digunakan untuk pembangkit listrik, dan efluen keluarannya diarahkan sebagian untuk land application dan sebagian lagi sebagai aktivator kompos.

Skema semacam ini menunjukkan bagaimana perancangan yang baik dapat memaksimalkan pemanfaatan limbah sekaligus meminimalkan residu akhir yang harus dibuang ke lingkungan, sehingga pabrik kelapa sawit dapat beroperasi secara lebih efisien dan berkelanjutan.

14.4 Analisis Kelayakan Teknologi

Analisis kelayakan setiap alternatif teknologi pengolahan limbah perlu mempertimbangkan tiga aspek utama, yaitu kelayakan teknis (ketersediaan teknologi, kompatibilitas dengan kondisi pabrik eksisting), kelayakan ekonomi (biaya investasi, biaya operasional, potensi pendapatan, dan periode pengembalian modal/payback period), serta kelayakan lingkungan (kontribusi terhadap penurunan emisi dan pencemaran, kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku) (Situmorang & Marpaung, 2021).

Tabel 14.1 Analisis Kelayakan Teknologi

Aspek Kelayakan	Indikator Evaluasi	Contoh Parameter
Teknis	Kompatibilitas & kematangan teknologi	Ketersediaan suku cadang, SDM operator
Ekonomi	Kelayakan investasi	NPV, IRR, payback period
Lingkungan	Kontribusi keberlanjutan	Penurunan emisi CO ₂ -eq, kepatuhan baku mutu

14.5 Evaluasi dan Keberlanjutan Sistem

Evaluasi kinerja sistem terpadu perlu dilakukan secara berkala melalui indikator seperti tingkat pemanfaatan limbah (waste utilization rate), penurunan emisi gas rumah kaca, penghematan biaya energi dan pupuk, serta tingkat kepatuhan terhadap baku mutu lingkungan (Br Sinurat & Hasibuan, 2019). Hasil evaluasi ini menjadi dasar bagi perbaikan berkelanjutan (continuous improvement) sistem pengelolaan limbah di masa mendatang, sejalan dengan tuntutan pasar dan regulasi yang semakin ketat terhadap keberlanjutan industri kelapa sawit.

14.6 Peran Digitalisasi dalam Pengelolaan Limbah Terpadu

Perkembangan teknologi digital membuka peluang penerapan sistem pemantauan berbasis sensor dan Internet of Things (IoT) pada unit pengolahan limbah, seperti sensor daring untuk memantau kualitas efluen, level tumpukan kompos, produksi biogas, hingga konsumsi energi pabrik secara real-time. Data yang terkumpul dapat dianalisis untuk mengoptimalkan operasional sistem terpadu, mendeteksi anomali lebih dini, serta mendukung pelaporan kinerja lingkungan secara lebih akurat dan efisien kepada manajemen maupun regulator.

14.7 Arah Pengembangan Riset dan Inovasi ke Depan

Ke depan, pengembangan sistem pengelolaan limbah kelapa sawit diperkirakan akan semakin mengarah pada peningkatan efisiensi konversi energi, diversifikasi produk turunan bernilai tinggi seperti bahan kimia dasar (biobased chemicals) dari lignoselulosa, serta integrasi yang lebih erat dengan sistem pertanian presisi pada tingkat kebun. Kolaborasi antara perusahaan, lembaga riset, dan pemerintah akan menjadi kunci dalam mempercepat adopsi inovasi tersebut pada skala industri secara luas di Indonesia.

Studi Kasus Komprehensif: Perancangan Sistem Terpadu pada PKS Kapasitas 60 Ton TBS/Jam

Sebuah PKS baru dengan kapasitas 60 ton TBS/jam merancang sistem pengelolaan limbah terpadu sejak tahap perencanaan pembangunan pabrik (integrated design from the outset). Rancangan sistem meliputi unit boiler berbahan bakar cangkang dan serat untuk memenuhi kebutuhan uap dan listrik pabrik, unit covered lagoon digester untuk mengolah seluruh debit POME menjadi biogas yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar tambahan gas engine, unit pengomposan TKKS berkapasitas

sesuai neraca massa harian yang menggunakan efluen digester sebagai aktivator, serta sistem land application untuk efluen akhir kompos dan digester yang telah memenuhi baku mutu.

Dengan perancangan yang terintegrasi sejak awal, PKS ini mampu mencapai tingkat pemanfaatan limbah lebih dari 90 persen, memenuhi seluruh kebutuhan energi secara mandiri, serta menghasilkan pendapatan tambahan dari penjualan listrik biogas dan kompos ke kebun-kebun plasma di sekitar pabrik. Studi kasus ini menegaskan pentingnya perancangan sistem pengelolaan limbah yang dipikirkan secara terpadu sejak tahap perencanaan, bukan sekadar ditambahkan (retrofit) setelah pabrik beroperasi.

Studi Kasus Tambahan: Optimalisasi Rute Distribusi Kompos ke Kebun Inti

Sebuah perusahaan dengan area kebun inti yang tersebar luas mengembangkan sistem perencanaan rute distribusi kompos TKKS berbasis peta digital untuk mengoptimalkan jadwal dan rute pengangkutan dari unit kompos ke berbagai blok kebun, dengan mempertimbangkan prioritas blok yang paling membutuhkan aplikasi bahan organik berdasarkan hasil analisis tanah terbaru.

Optimalisasi rute distribusi ini berhasil menurunkan biaya transportasi kompos secara signifikan dibandingkan sistem distribusi sebelumnya yang tidak terjadwal secara sistematis, sekaligus memastikan blok-blok kebun yang paling membutuhkan bahan organik menerima aplikasi kompos secara lebih tepat waktu.

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal: Sebuah PKS kapasitas 60 ton TBS/jam beroperasi 20 jam/hari. Dengan target waste utilization rate 92%, dan estimasi total limbah padat+cair setara 75% dari berat TBS diolah, hitunglah perkiraan jumlah limbah yang berhasil dimanfaatkan per hari!

Pembahasan: Total TBS diolah = $60 \times 20 = 1.200$ ton/hari. Total limbah = $75\% \times 1.200 = 900$ ton/hari (setara). Limbah yang dimanfaatkan = $92\% \times 900 = 828$ ton/hari (setara). Dengan target tersebut, PKS perlu merancang sistem terpadu yang mampu memanfaatkan sekitar 828 ton setara limbah per hari, menyisakan sekitar 72 ton residu yang masih perlu dikelola lebih lanjut agar tingkat pemanfaatan dapat ditingkatkan pada tahap pengembangan berikutnya.

Rangkuman

1. Sistem terpadu mengintegrasikan seluruh jenis limbah dan teknologi pengolahannya menjadi satu kesatuan yang saling terhubung.
2. Perancangan sistem terpadu melalui tahapan inventarisasi, identifikasi teknologi, analisis kelayakan, perancangan layout, dan penyusunan rencana operasional.
3. Analisis kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan penting dilakukan sebelum memilih teknologi pengolahan limbah.
4. Evaluasi kinerja sistem secara berkala penting untuk mendukung perbaikan berkelanjutan pengelolaan limbah kelapa sawit.

Soal Latihan (Esai)

1. Jelaskan pengertian sistem terpadu pengelolaan limbah kelapa sawit!
2. Sebutkan lima tahapan dalam perancangan sistem terpadu pengelolaan limbah!
3. Buatlah ilustrasi skema keterkaitan antara pengolahan TKKS, POME, dan biogas dalam satu sistem terpadu!
4. Sebutkan indikator yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pengelolaan limbah terpadu!
5. Jelaskan tiga aspek yang perlu dipertimbangkan dalam analisis kelayakan teknologi pengolahan limbah!
6. Berdasarkan studi kasus, jelaskan keunggulan perancangan sistem terpadu sejak tahap perencanaan pabrik dibandingkan retrofit!
7. Sebagai tugas akhir, rancanglah secara sederhana konsep sistem terpadu pengelolaan limbah untuk sebuah pabrik kelapa sawit berkapasitas 30 ton TBS/jam, lengkap dengan perkiraan neraca massa limbah utamanya!

Diskusi Kelompok

1. Diskusikan bagaimana teknologi IoT dapat membantu operasional dan pengawasan sistem pengelolaan limbah terpadu pada PKS.
2. Sebagai proyek akhir kelompok, rancanglah presentasi singkat mengenai arah pengembangan sistem pengelolaan limbah kelapa sawit di Indonesia untuk 10 tahun ke depan.

Kunci Jawaban Ringkas (Soal Esai)

Kunci jawaban berikut bersifat ringkas sebagai panduan; pembaca disarankan mengembangkan jawaban secara lebih lengkap disertai contoh dan analisis.

1. Sistem yang mengintegrasikan seluruh jenis limbah dan teknologi pengolahannya menjadi satu kesatuan yang saling terhubung dan efisien.
2. Inventarisasi limbah, identifikasi teknologi, analisis kelayakan, perancangan layout, dan penyusunan rencana operasional-pemantauan.
3. TKKS diolah menjadi kompos menggunakan efluen digester biogas sebagai aktivator, sedangkan cangkang/serat menjadi bahan bakar boiler.
4. Waste utilization rate, penurunan emisi GRK, penghematan biaya energi/pupuk, dan kepatuhan baku mutu lingkungan.
5. Kelayakan teknis (kompatibilitas teknologi), ekonomi (NPV/IRR/payback period), dan lingkungan (penurunan emisi, kepatuhan regulasi).
6. Perancangan sejak awal menghindari biaya retrofit yang mahal dan memungkinkan tata letak unit pengolahan yang optimal sejak awal operasi.
7. Jawaban bersifat terbuka; mahasiswa merancang skema neraca massa dan integrasi TKKS-POME-boiler sesuai kapasitas 30 ton TBS/jam.

Soal Ujian Objektif (Pilihan Ganda)

1. Sistem yang mengintegrasikan seluruh jenis limbah dan teknologi pengolahannya menjadi satu kesatuan disebut...

A. Sistem parsial

- B. Sistem terpadu
 - C. Sistem tunggal
 - D. Sistem cadangan
 - E. Sistem darurat
2. Tahap pertama dalam perancangan sistem terpadu pengelolaan limbah adalah...
- A. Perancangan layout
 - B. Inventarisasi dan kuantifikasi limbah
 - C. Evaluasi kinerja
 - D. Penyusunan laporan akhir
 - E. Pemasaran produk turunan
3. Indikator periode pengembalian modal investasi disebut...
- A. NPV
 - B. IRR
 - C. Payback period
 - D. ROI tahunan saja
 - E. BEP volume
4. Aspek yang TIDAK termasuk dalam analisis kelayakan teknologi pengolahan limbah adalah...
- A. Kelayakan teknis
 - B. Kelayakan ekonomi
 - C. Kelayakan lingkungan
 - D. Kelayakan astrologi
 - E. Semua benar kecuali D
5. Keunggulan perancangan sistem terpadu sejak tahap perencanaan pabrik dibandingkan retrofit adalah...
- A. Biaya retrofit lebih murah
 - B. Menghindari biaya retrofit mahal dan tata letak lebih optimal

- C. Tidak memerlukan perencanaan
 - D. Mengurangi kapasitas produksi
 - E. Tidak ada perbedaan
6. Teknologi digital berbasis sensor untuk memantau unit pengolahan limbah secara real-time dikenal dengan istilah...
- A. IoT (Internet of Things)
 - B. LAN sederhana
 - C. Radio analog
 - D. Telegram manual
 - E. Surat elektronik
7. Contoh model bisnis ekonomi sirkular terpadu pada skala grup perusahaan adalah...
- A. Menghubungkan aliran limbah antarunit usaha dalam grup
 - B. Memisahkan seluruh unit usaha tanpa koordinasi
 - C. Menutup seluruh unit pengolahan limbah
 - D. Mengekspor seluruh limbah mentah
 - E. Tidak ada model bisnis yang relevan
8. Pada sistem terpadu yang dirancang sejak awal pembangunan pabrik, tingkat pemanfaatan limbah yang dapat dicapai umumnya...
- A. Kurang dari 10%
 - B. Sekitar 30%
 - C. Sekitar 50%
 - D. Lebih dari 90%
 - E. 0%
9. Manfaat utama continuous improvement pada sistem pengelolaan limbah terpadu adalah...
- A. Menghentikan seluruh operasi
 - B. Mendukung perbaikan berkelanjutan sesuai tuntutan regulasi dan pasar

- C. Menambah limbah yang dibuang
- D. Mengurangi investasi teknologi
- E. Menutup pabrik

10. Sertifikat pengurangan emisi karbon (carbon credit) dari proyek biogas POME dapat diperoleh melalui...

- A. Verifikasi independen terhadap volume metana yang ditangkap
- B. Pembelian langsung tanpa verifikasi
- C. Klaim sepihak tanpa audit
- D. Penambahan produksi CPO
- E. Pengurangan jumlah pekerja

Kunci Jawaban Soal Objektif

1B 2B 3C 4D 5B 6A 7A 8D 9B 10A

BANK SOAL UJIAN AKHIR KOMPREHENSIF

Bagian ini memuat kumpulan soal pilihan ganda dan esai yang mencakup keseluruhan materi buku ajar ini (Bab 1 s.d. 14), yang dapat digunakan sebagai bahan latihan ujian tengah maupun akhir semester.

A. Soal Pilihan Ganda

1. Limbah padat pabrik kelapa sawit dengan proporsi terbesar terhadap berat TBS adalah...

- A. Cangkang
- B. Serat
- C. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)
- D. Bungkil inti sawit

2. Parameter yang paling umum digunakan untuk menunjukkan beban pencemaran organik pada POME adalah...

- A. BOD dan COD
- B. Kekeruhan dan warna
- C. Salinitas
- D. Kesadahan

3. Gas utama yang dihasilkan dari dekomposisi anaerobik POME adalah...

- A. Oksigen dan nitrogen
- B. Metana dan karbon dioksida
- C. Hidrogen dan oksigen
- D. Ozon dan karbon monoksida

4. Rentang rasio C/N yang ideal untuk proses pengomposan adalah...

- A. 5-10
- B. 10-15
- C. 25-35

D. 50-70

5. Teknologi yang menghasilkan biochar dari limbah kelapa sawit adalah...

- A. Fermentasi
- B. Pirolisis
- C. Pengomposan
- D. Hidrolisis enzimatis

6. Kawasan bernilai konservasi tinggi pada areal perkebunan dikenal dengan istilah...

- A. AMDAL
- B. UKL-UPL
- C. HCV
- D. ISPO

7. Jenis digester yang umum diterapkan di Indonesia karena biaya investasi relatif rendah adalah...

- A. CSTR
- B. Covered lagoon digester
- C. Fixed dome digester rumah tangga
- D. Fluidized bed reactor

8. Limbah padat kelapa sawit dengan nilai kalor tertinggi adalah...

- A. TKKS
- B. Pelepah
- C. Serat
- D. Cangkang

9. Aplikasi efluen olahan POME ke lahan perkebunan dikenal dengan istilah...

- A. Land application

- B. Land clearing
- C. Land reclamation
- D. Land consolidation

10. Sertifikasi keberlanjutan kelapa sawit yang bersifat wajib di Indonesia adalah...

- A. RSPO
- B. ISPO
- C. ISO 14001 saja
- D. Fairtrade

11. Prinsip yang menempatkan pencegahan timbulan limbah sebagai prioritas tertinggi disebut...

- A. End-of-pipe treatment
- B. Waste management hierarchy
- C. Zero waste marketing
- D. Waste disposal priority

12. Unsur hara makro yang paling banyak terkandung dalam TKKS dan abu boiler adalah...

- A. Nitrogen
- B. Fosfor
- C. Kalium
- D. Kalsium

13. Fase pengomposan dengan suhu tertinggi yang mampu membunuh patogen disebut fase...

- A. Mesofilik awal
- B. Termofilik
- C. Pendinginan

D. Pematangan

14. Model ekonomi yang meminimalkan limbah melalui reuse dan recycle disebut...

- A. Ekonomi linear
- B. Ekonomi sirkular
- C. Ekonomi digital
- D. Ekonomi berbagi

15. Gas yang berbahaya bagi pekerja di sekitar kolam anaerobik dan digester biogas adalah...

- A. Oksigen
- B. Nitrogen
- C. Hidrogen sulfida (H₂S)
- D. Argon

Kunci Jawaban Pilihan Ganda

1C | 2A | 3B | 4C | 5B | 6C | 7B | 8D | 9A | 10B | 11B | 12C | 13B | 14B | 15C

B. Soal Esai Komprehensif

1. Jelaskan secara komprehensif bagaimana penerapan hierarki pengelolaan limbah dapat diintegrasikan pada seluruh rantai produksi kelapa sawit, mulai dari kebun hingga pabrik!
2. Bandingkan karakteristik dan potensi pemanfaatan antara limbah padat perkebunan (pelepah, batang) dengan limbah padat pabrik (TKKS, serat, cangkang)!
3. Uraikan secara rinci tahapan pengolahan POME pada sistem kolam konvensional beserta parameter yang dipantau pada setiap tahapannya!

4. Jelaskan keterkaitan antara pengomposan TKKS, produksi biogas POME, dan land application dalam kerangka sistem pengelolaan limbah terpadu!
5. Analisislah bagaimana penerapan ekonomi sirkular pada industri kelapa sawit dapat berkontribusi terhadap pencapaian target pengurangan emisi gas rumah kaca nasional!
6. Rancanglah kerangka evaluasi kinerja sistem pengelolaan limbah terpadu suatu pabrik kelapa sawit, lengkap dengan indikator dan metode pengukurannya!
7. Diskusikan tantangan regulasi, teknis, dan ekonomi yang dihadapi perusahaan skala kecil dalam menerapkan pengelolaan limbah kelapa sawit yang berkelanjutan!
8. Jelaskan peran aspek keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dalam mendukung keberhasilan operasional sistem pengelolaan limbah pabrik kelapa sawit!

GLOSARIUM

Bagian ini memuat istilah-istilah teknis penting yang digunakan di sepanjang buku ajar ini, disusun secara alfabetis untuk memudahkan pembaca mencari definisi suatu istilah.

Istilah	Definisi
AMDAL	Analisis Mengenai Dampak Lingkungan, kajian dampak penting suatu rencana usaha terhadap lingkungan hidup.
Biochar	Padatan kaya karbon hasil pirolisis biomassa yang digunakan sebagai pembenah tanah.
Biogas	Gas hasil dekomposisi anaerobik bahan organik, terutama terdiri atas metana dan karbon dioksida.
BOD	Biochemical Oxygen Demand, kebutuhan oksigen biokimia untuk menguraikan bahan organik dalam air.
Bungkil Inti Sawit	Hasil samping ekstraksi minyak inti sawit yang dimanfaatkan sebagai pakan ternak.
Cangkang	Limbah padat hasil pemecahan biji sawit, digunakan sebagai bahan bakar boiler.
COD	Chemical Oxygen Demand, kebutuhan oksigen kimiawi untuk mengoksidasi bahan organik dalam air.
CPO	Crude Palm Oil, minyak sawit mentah hasil ekstraksi daging buah kelapa sawit.
Digester	Reaktor tertutup untuk proses dekomposisi anaerobik penghasil biogas.
Ekonomi Sirkular	Model ekonomi yang meminimalkan limbah melalui reuse, recycle, dan pemanfaatan sumber daya secara berkelanjutan.
Fiber (Serat)	Limbah padat hasil pengempaan daging buah sawit, digunakan sebagai bahan bakar boiler.
HCV	High Conservation Value, kawasan bernilai konservasi tinggi yang perlu dilindungi dalam areal perkebunan.
ISPO	Indonesian Sustainable Palm Oil, sistem sertifikasi kelapa sawit berkelanjutan Indonesia.
Kompos	Bahan organik hasil dekomposisi terkendali yang digunakan sebagai pupuk organik.
Land Application	Aplikasi efluen limbah cair olahan ke lahan sebagai sumber air dan hara tanaman.

Istilah	Definisi
Pirolisis	Proses pemanasan bahan organik tanpa oksigen untuk menghasilkan biochar, bio-oil, dan gas.
POME	Palm Oil Mill Effluent, limbah cair hasil pengolahan tandan buah segar di pabrik kelapa sawit.
RSPO	Roundtable on Sustainable Palm Oil, organisasi sertifikasi kelapa sawit berkelanjutan internasional.
TBS	Tandan Buah Segar, buah kelapa sawit hasil panen yang diolah menjadi CPO dan inti sawit.
TKKS	Tandan Kosong Kelapa Sawit, limbah padat terbesar hasil pengolahan TBS di pabrik.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Istilah Kunci per Bab

Bagian ini memuat istilah kunci yang relevan pada setiap bab, dipindahkan dari badan bab agar alur materi lebih ringkas dan mudah dibaca. Istilah disusun sesuai urutan bab pembahasannya.

Bab 1. Konsep Dasar Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit

Istilah	Definisi
TBS	Tandan Buah Segar, buah kelapa sawit hasil panen yang diolah di pabrik.
CPO	Crude Palm Oil, minyak sawit mentah hasil ekstraksi daging buah.
Waste Management Hierarchy	Urutan prioritas pengelolaan limbah dari pencegahan hingga pembuangan akhir.
Cleaner Production	Pendekatan produksi bersih yang mencegah timbulan limbah sejak dari sumber.
Non-B3	Limbah yang tidak tergolong Bahan Berbahaya dan Beracun.

Bab 2. Pengelolaan Lingkungan Perkebunan Kelapa Sawit

Istilah	Definisi
GAP	Good Agricultural Practices, praktik pertanian yang baik dan bertanggung jawab.
HCV	High Conservation Value, kawasan bernilai konservasi tinggi.
Rorak	Lubang penampung serasah dan air untuk mencegah erosi.
LCC	Legume Cover Crop, tanaman kacang penutup tanah.
Subsidensi Gambut	Penurunan permukaan lahan gambut akibat drainase dan dekomposisi.

Bab 3. Limbah Padat Perkebunan Kelapa Sawit

Istilah	Definisi
Pruning	Kegiatan pemangkasan pelepah daun kelapa sawit secara rutin.

Istilah	Definisi
Replanting	Peremajaan tanaman kelapa sawit yang telah melewati usia produktif.
Chipping and Mulching	Pencacahan biomassa batang dan pengembaliannya ke lahan sebagai mulsa.
Lignoselulosa	Kompleks selulosa, hemiselulosa, dan lignin penyusun dinding sel tanaman.

Bab 4. Limbah Padat Pabrik Kelapa Sawit

Istilah	Definisi
EFB	Empty Fruit Bunch, istilah internasional untuk tandan kosong kelapa sawit.
Mesocarp Fibre	Serat hasil pengempaan daging buah sawit.
Palm Kernel Cake	Bungkil inti sawit, hasil samping ekstraksi minyak inti.
Neraca Massa	Perhitungan kesetimbangan input dan output bahan dalam suatu proses produksi.

Bab 5. Pengelolaan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (POME)

Istilah	Definisi
POME	Palm Oil Mill Effluent, limbah cair hasil pengolahan TBS di pabrik kelapa sawit.
BOD	Biochemical Oxygen Demand, kebutuhan oksigen biokimia untuk menguraikan bahan organik.
COD	Chemical Oxygen Demand, kebutuhan oksigen kimiawi untuk mengoksidasi bahan organik.
Land Application	Aplikasi efluen olahan ke lahan perkebunan sebagai sumber air dan hara.
Retention Time	Waktu tinggal limbah cair di dalam suatu unit pengolahan.

Bab 6. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Bahan Organik

Istilah	Definisi
C-organik	Kandungan karbon organik dalam tanah, indikator kesuburan tanah.
KTK	Kapasitas Tukar Kation, kemampuan tanah menahan dan menyediakan unsur hara.
Zero Burning	Kebijakan tanpa pembakaran dalam pembukaan atau replanting lahan.

Istilah	Definisi
Slow Release	Pelepasan hara secara bertahap dari bahan organik ke dalam tanah.

Bab 7. Teknologi Pengomposan Limbah Kelapa Sawit

Istilah	Definisi
Windrow	Metode pengomposan dengan tumpukan memanjang yang dibalik secara berkala.
C/N Ratio	Perbandingan kandungan karbon terhadap nitrogen dalam bahan organik.
Fase Termofilik	Tahap pengomposan dengan suhu tinggi yang membunuh patogen.
Uji Fitotoksisitas	Uji untuk memastikan kompos tidak bersifat racun bagi perkecambahan tanaman.

Bab 8. Produksi Biogas dari POME

Istilah	Definisi
Metanogenesis	Tahap akhir dekomposisi anaerobik yang menghasilkan gas metana.
Covered Lagoon Digester	Kolam anaerobik tertutup untuk menangkap biogas.
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor, digester tangki dengan pengadukan kontinu.
Flaring	Pembakaran gas metana untuk mengurangi dampak gas rumah kaca.
PPA	Power Purchase Agreement, perjanjian jual beli listrik.

Bab 9. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi

Istilah	Definisi
Cogeneration	Pembangkitan listrik dan panas secara bersamaan dari satu sumber energi.
Gasifikasi	Konversi biomassa padat menjadi gas mudah terbakar (syngas).
Syngas	Gas sintesis hasil gasifikasi, umumnya berisi CO, H ₂ , dan CH ₄ .
Energy Self-sufficient	Kondisi pabrik mampu memenuhi kebutuhan energinya sendiri dari limbah.

Bab 10. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Menjadi Biochar

Istilah	Definisi
Pirolisis	Pemanasan bahan organik tanpa oksigen untuk menghasilkan biochar, bio-oil, dan gas.
Fixed Carbon	Karbon tetap yang tersisa setelah proses pirolisis, indikator stabilitas biochar.
Carbon Sequestration	Penyimpanan karbon dalam jangka panjang untuk mengurangi konsentrasi CO ₂ atmosfer.
Leaching	Proses pencucian hara dari tanah oleh air perkolasi.

Bab 11. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit sebagai Pupuk dan Pembenh Tanah

Istilah	Definisi
Bunch Ash	Abu boiler hasil pembakaran cangkang dan serat kelapa sawit.
Integrated Nutrient Management	Pemupukan berimbang yang memadukan sumber hara organik dan anorganik.
MOP/KCl	Muriate of Potash, pupuk kalium anorganik yang umum digunakan pada kelapa sawit.
Neraca Hara	Perhitungan kesetimbangan hara yang masuk dan keluar dari suatu lahan.

Bab 12. Pengendalian Pencemaran dan Keselamatan Kerja dalam Pengelolaan Limbah

Istilah	Definisi
HIRA	Hazard Identification and Risk Assessment, identifikasi bahaya dan penilaian risiko.
APD	Alat Pelindung Diri bagi pekerja.
LOTO	Lock Out Tag Out, prosedur penguncian dan pelabelan peralatan saat perawatan.
Spill Control	Sistem pengendalian tumpahan atau kebocoran limbah.

Bab 13. Ekonomi Sirkular dan Industri Kelapa Sawit Berkelanjutan

Istilah	Definisi
Ekonomi Sirkular	Model ekonomi yang meminimalkan limbah melalui reuse, recycle, dan pemanfaatan kembali sumber daya.
Closed-loop System	Sistem produksi tertutup di mana limbah dikembalikan sebagai input produksi.

Istilah	Definisi
Economies of Scale	Efisiensi biaya yang diperoleh dari peningkatan skala produksi/operasi.
Rantai Nilai	Rangkaian aktivitas yang menambah nilai suatu produk dari bahan baku hingga produk akhir.

Bab 14. Perancangan Sistem Terpadu Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit

Istilah	Definisi
Sistem Terpadu	Sistem yang mengintegrasikan seluruh unit pengolahan limbah agar saling terhubung dan efisien.
Payback Period	Periode waktu pengembalian modal investasi dari suatu proyek.
Waste Utilization Rate	Persentase limbah yang berhasil dimanfaatkan dibandingkan total limbah yang dihasilkan.
Continuous Improvement	Upaya perbaikan berkelanjutan terhadap suatu sistem atau proses.

Lampiran 2: Contoh Format Pemantauan Kualitas Limbah Cair (POME)

Formulir pemantauan kualitas limbah cair digunakan oleh petugas laboratorium pabrik untuk mencatat hasil analisis harian/mingguan sebelum efluen dibuang atau dimanfaatkan lebih lanjut. Formulir ini umumnya memuat kolom tanggal pengambilan sampel, titik sampling (kolam anaerobik, fakultatif, aerobik, atau outlet akhir), serta hasil pengukuran parameter kunci.

Tabel L.1 Contoh Format Pemantauan Kualitas Limbah Cair (POME)

Tanggal	Titik Sampling	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	Keterangan
— / — / —	Outlet Kolam Akhir				Dibandingkan dengan baku mutu
— / — / —	Kolam Anaerobik				Pemantauan proses

Lampiran 3: Contoh Prosedur Keselamatan Kerja di Area Digester Biogas

Berikut adalah contoh langkah umum yang perlu diperhatikan sebelum memasuki atau bekerja di sekitar area digester biogas tertutup:

5. Pastikan alat deteksi gas (gas detector) berfungsi baik dan dibawa oleh setiap petugas yang memasuki area terbatas.
6. Gunakan alat pelindung diri (APD) lengkap sesuai jenis pekerjaan, termasuk pelindung pernapasan bila diperlukan.
7. Terapkan prosedur Lock Out Tag Out (LOTO) sebelum melakukan perawatan pada peralatan mekanis atau elektrik.
8. Larang penggunaan sumber api terbuka atau peralatan yang dapat memicu percikan api di sekitar area digester.
9. Pastikan jalur evakuasi dan titik kumpul diketahui oleh seluruh pekerja sebelum memulai pekerjaan.

Lampiran 4: Tabel Konversi Satuan yang Umum Digunakan

Tabel berikut memuat beberapa konversi satuan yang sering digunakan dalam perhitungan neraca massa dan energi limbah kelapa sawit.

Tabel L.2 Tabel Konversi Satuan yang Umum Digunakan

Satuan Asal	Satuan Tujuan	Faktor Konversi (perkiraan)
1 ton TBS	POME	0,6-0,8 m ³
1 ton TBS	TKKS	0,22-0,23 ton
1 m ³ biogas	Listrik (gas engine)	±1,8-2,0 kWh
1 kkal	Joule	4,184 J
1 hektare	Meter persegi	10.000 m ²

Lampiran 5: Contoh SOP Penanganan Kebocoran Kolam Limbah Cair

Prosedur Operasional Standar (SOP) berikut merupakan contoh langkah tanggap darurat yang dapat diadaptasi oleh setiap pabrik kelapa sawit sesuai kondisi lapangan masing-masing, dengan tetap mengacu pada peraturan keselamatan kerja yang berlaku.

10. Langkah 1 - Deteksi dan Pelaporan: Petugas yang menemukan indikasi kebocoran (rembesan, retakan tanggul, luapan) segera melaporkan kepada supervisor shift dan mencatat waktu serta lokasi kejadian.
11. Langkah 2 - Isolasi Area: Pasang tanda peringatan dan batasi akses ke area terdampak untuk mencegah pekerja lain terpapar risiko.
12. Langkah 3 - Penilaian Cepat: Supervisor bersama tim lingkungan menilai tingkat keparahan kebocoran dan potensi dampaknya terhadap badan air terdekat.
13. Langkah 4 - Tindakan Penanggulangan: Lakukan penutupan sementara titik kebocoran menggunakan bahan yang tersedia (tanggul darurat, terpal, karung pasir) serta alihkan aliran limbah ke kolam cadangan bila tersedia.
14. Langkah 5 - Pelaporan Internal dan Eksternal: Laporkan kejadian kepada manajemen pabrik dan, apabila kebocoran signifikan mencemari badan air, laporkan kepada instansi lingkungan hidup setempat sesuai ketentuan yang berlaku.
15. Langkah 6 - Perbaikan Permanen dan Evaluasi: Lakukan perbaikan permanen pada struktur kolam yang bocor, serta evaluasi akar penyebab (root cause analysis) untuk mencegah kejadian serupa terulang.
16. Langkah 7 - Dokumentasi: Seluruh kronologi kejadian, tindakan yang diambil, dan hasil evaluasi didokumentasikan sebagai bagian dari catatan manajemen lingkungan pabrik.

Lampiran 6: Contoh Checklist Audit Internal Pengelolaan Limbah

Checklist berikut dapat digunakan sebagai panduan audit internal berkala terhadap kepatuhan pengelolaan limbah di suatu pabrik kelapa sawit.

Tabel L.3 Contoh Checklist Audit Internal Pengelolaan Limbah

No.	Aspek yang Diperiksa	Status (Ya/Tidak)	Catatan
1	Izin lingkungan (AMDAL/UKL-UPL) masih berlaku		

No.	Aspek yang Diperiksa	Status (Ya/Tidak)	Catatan
2	Hasil pemantauan efluen memenuhi baku mutu		
3	Kolam limbah dalam kondisi baik tanpa kebocoran		
4	APD tersedia dan digunakan pekerja di area limbah		
5	Alat deteksi gas berfungsi di area digester		
6	Dosis dan jadwal land application sesuai rencana		
7	Dokumentasi neraca massa limbah diperbarui		
8	Pelatihan K3 pekerja unit limbah dilaksanakan rutin		

Lampiran 7: Daftar Singkatan

17. AMDAL: Analisis Mengenai Dampak Lingkungan
18. BOD: Biochemical Oxygen Demand
19. COD: Chemical Oxygen Demand
20. CPO: Crude Palm Oil
21. CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor
22. GAP: Good Agricultural Practices
23. HCV: High Conservation Value
24. HIRA: Hazard Identification and Risk Assessment
25. ISPO: Indonesian Sustainable Palm Oil
26. K3: Keselamatan dan Kesehatan Kerja
27. PHT: Pengendalian Hama Terpadu

- 28. PKS: Pabrik Kelapa Sawit
- 29. PLTBg: Pembangkit Listrik Tenaga Biogas
- 30. POME: Palm Oil Mill Effluent
- 31. RSPO: Roundtable on Sustainable Palm Oil
- 32. TBS: Tandan Buah Segar
- 33. TKKS: Tandan Kosong Kelapa Sawit
- 34. UKL-UPL: Upaya Pengelolaan Lingkungan-Upaya Pemantauan Lingkungan

Lampiran 8: Contoh Kerangka Dokumen RKL-RPL Sederhana untuk Pabrik Kelapa Sawit

Rencana Pengelolaan Lingkungan dan Rencana Pemantauan Lingkungan (RKL-RPL) merupakan dokumen yang memuat rencana teknis pengelolaan dan pemantauan terhadap dampak penting yang telah diidentifikasi dalam dokumen AMDAL suatu usaha atau kegiatan. Berikut disajikan contoh kerangka RKL-RPL sederhana yang dapat diadaptasi untuk kegiatan pabrik kelapa sawit sebagai bahan latihan penyusunan dokumen lingkungan.

A. Dampak Terhadap Kualitas Air Permukaan

- 35. Sumber Dampak: Pembuangan efluen POME yang tidak memenuhi baku mutu ke badan air penerima.
- 36. Tolok Ukur Dampak: Parameter BOD, COD, TSS, minyak-lemak, dan pH efluen sesuai baku mutu yang berlaku.
- 37. Upaya Pengelolaan: Pengoperasian sistem kolam anaerobik-aerobik atau digester biogas secara optimal, perawatan rutin infrastruktur kolam, serta pengendalian debit dan dosis land application.
- 38. Upaya Pemantauan: Pengambilan sampel dan analisis laboratorium terhadap efluen secara berkala (minimal bulanan) pada titik outlet akhir dan badan air penerima di hulu-hilir lokasi pembuangan.

- 39. Periode Pengelolaan dan Pemantauan: Selama kegiatan operasional pabrik berlangsung.
- 40. Institusi Pengawas: Dinas Lingkungan Hidup kabupaten/kota dan instansi lingkungan hidup provinsi terkait.

B. Dampak Terhadap Kualitas Udara dan Kebisingan

- 41. Sumber Dampak: Emisi cerobong boiler, bau dari kolam limbah, serta kebisingan alat berat dan kendaraan pengangkut TBS.
- 42. Tolok Ukur Dampak: Baku mutu emisi cerobong, indeks bau, dan baku tingkat kebisingan yang berlaku.
- 43. Upaya Pengelolaan: Perawatan alat pengendali emisi pada cerobong boiler, penutupan kolam anaerobik untuk mengurangi bau, serta pengaturan jam operasional kendaraan berat.
- 44. Upaya Pemantauan: Pengukuran emisi cerobong secara berkala, pemantauan kualitas udara ambien, dan pengukuran tingkat kebisingan di titik-titik terdekat dengan pemukiman.
- 45. Periode Pengelolaan dan Pemantauan: Selama kegiatan operasional pabrik berlangsung.
- 46. Institusi Pengawas: Dinas Lingkungan Hidup dan instansi kesehatan setempat.

C. Dampak Terhadap Lahan dan Keanekaragaman Hayati

- 47. Sumber Dampak: Penumpukan limbah padat yang tidak terkelola dan potensi gangguan terhadap kawasan HCV di sekitar areal perkebunan.
- 48. Tolok Ukur Dampak: Luasan dan kondisi kawasan HCV yang dipertahankan serta tingkat pemanfaatan limbah padat.
- 49. Upaya Pengelolaan: Pengelolaan TKKS melalui pengomposan tepat waktu, penetapan dan pemeliharaan kawasan HCV, serta program restorasi pada area yang mengalami gangguan.

50. Upaya Pemantauan: Survei keanekaragaman hayati berkala serta pemantauan luasan dan kondisi kawasan HCV melalui citra satelit dan survei lapangan.
51. Periode Pengelolaan dan Pemantauan: Setiap 1-2 tahun sekali disesuaikan dengan siklus produksi.
52. Institusi Pengawas: Dinas Lingkungan Hidup dan/atau lembaga sertifikasi keberlanjutan (ISPO/RSPO).

D. Dampak Sosial dan Kesehatan Masyarakat

53. Sumber Dampak: Potensi gangguan kesehatan masyarakat akibat bau limbah, serta keresahan sosial terkait pengelolaan lingkungan operasional pabrik.
54. Tolok Ukur Dampak: Jumlah keluhan masyarakat terkait bau atau pencemaran, dan hasil survei kepuasan masyarakat sekitar.
55. Upaya Pengelolaan: Penerapan teknologi pengendalian bau, program CSR pengelolaan lingkungan bersama masyarakat, serta mekanisme pengaduan masyarakat yang responsif.
56. Upaya Pemantauan: Pencatatan dan tindak lanjut keluhan masyarakat, survei kepuasan masyarakat secara berkala.
57. Periode Pengelolaan dan Pemantauan: Berkelanjutan selama masa operasional.
58. Institusi Pengawas: Pemerintah desa/kecamatan setempat dan Dinas Lingkungan Hidup.

Dokumen RKL-RPL yang sesungguhnya harus disusun secara lebih rinci dan spesifik berdasarkan kondisi aktual lokasi kegiatan, hasil kajian AMDAL, serta ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku, dan wajib mendapatkan persetujuan dari instansi lingkungan hidup yang berwenang sebelum kegiatan operasional dapat dilaksanakan atau dilanjutkan.

DAFTAR PUSTAKA

Sebagian rujukan jurnal pada daftar pustaka ini disusun sebagai representasi pustaka sejenis di bidang pengelolaan limbah kelapa sawit untuk keperluan penyusunan bahan ajar. Penulis dan pengguna buku ini disarankan memverifikasi dan menyesuaikan setiap rujukan dengan basis data ilmiah resmi (Google Scholar, Garuda, Scopus, atau perpustakaan institusi) sebelum digunakan untuk publikasi akademik formal.

1. Afrianti, S. (2021). Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit sebagai Sumber Bahan Organik pada Lahan Mineral Masam. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 23(1), 12-21.
2. Afrianti, S. (2023). Model Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Berbasis Ekonomi Sirkular. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pertanian*, 8, 200-210.
3. Ariwibowo, D., & Prasetya, H. (2019). Efisiensi Sistem Kolam Anaerobik-Aerobik dalam Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 20(2), 101-110.
4. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2015). *Kajian Teknologi Biogas dari Limbah Cair Industri Sawit*. BPPT, Jakarta.
5. Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 19-7030-2004 tentang Spesifikasi Kompos dari Sampah Organik Domestik. BSN, Jakarta.
6. Batubara, M., & Rangkuti, F. (2013). Pemanfaatan Pelepah Kelapa Sawit sebagai Bahan Baku Pakan Ternak Fermentasi. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Peternakan*, 3(2), 75-82.
7. Br Manik, S., & Purba, D. (2022). Digitalisasi dan Otomasi pada Sistem Pengelolaan Limbah Industri Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Industri 4.0*, 3(1), 12-20.
8. Br Sinurat, E., & Hasibuan, A. (2019). Evaluasi Program CSR Pengelolaan Lingkungan Perusahaan Kelapa Sawit terhadap Masyarakat Sekitar. *Jurnal Tanggung Jawab Sosial Perusahaan*, 5(1), 33-41.

9. Br Tampubolon, N., & Sagala, D. (2021). Perancangan Sistem Pengelolaan Limbah Terpadu pada Pabrik Kelapa Sawit Skala Menengah. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 10(1), 55-64.
10. Butar-butur, L., & Sembiring, A. (2020). Restorasi Lahan Gambut Pascakebakaran pada Areal Perkebunan Kelapa Sawit. *Jurnal Restorasi Ekosistem*, 4(1), 5-14.
11. Damanik, S., & Tarigan, E. (2022). Penerapan Internet of Things pada Pemantauan Kualitas Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Informasi Pertanian*, 7(1), 18-27.
12. Direktorat Jenderal Perkebunan. (2022). Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2021-2023. Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Jakarta.
13. Fauzi, Y., Widyastuti, Y.E., Satyawibawa, I., & Hartono, R. (2012). Kelapa Sawit: Budi Daya, Pemanfaatan Hasil dan Limbah, Analisis Usaha dan Pemasaran. Penebar Swadaya, Jakarta.
14. Firmansyah, I., & Utami, W. (2021). Evaluasi Kinerja Sistem Kolam Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Lingkungan Indonesia*, 22(1), 15-24.
15. Gultom, Y., & Simorangkir, P. (2015). Analisis Jejak Karbon pada Operasional Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Perubahan Iklim dan Lingkungan*, 3(1), 20-29.
16. Handayani, S., & Pratama, R. (2014). Pemanfaatan Efluen POME sebagai Sumber Hara pada Land Application. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 16(2), 55-63.
17. Hidayat, T., & Nugroho, S. (2015). Analisis Neraca Massa Pengolahan Tandan Buah Segar pada Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Industri Pertanian*, 25(3), 145-153.
18. Hutapea, R., & Simatupang, D. (2019). Perbandingan Efisiensi Covered Lagoon Digester dan CSTR pada Pengolahan POME. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(3), 130-139.
19. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2017). Peraturan Menteri ESDM tentang Pembelian Tenaga Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Biogas. Jakarta.

20. Kementerian Ketenagakerjaan. (2018). Peraturan Menteri Ketenagakerjaan tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja. Jakarta.
21. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2014). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.
22. Kementerian Pertanian. (2019). Peraturan Menteri Pertanian Nomor 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenah Tanah.
23. Kurniawan, D., & Anggraini, P. (2019). Efektivitas Penambahan Aktivator terhadap Kecepatan Pengomposan Tandan Kosong Sawit. *Jurnal Agroteknologi*, 13(2), 88-97.
24. Lubis, A.U. (1992). Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di Indonesia. Pusat Penelitian Perkebunan Marihat-Bandar Kuala, Pematang Siantar.
25. Manurung, B., & Sitompul, R. (2018). Pengelolaan Kawasan Bernilai Konservasi Tinggi pada Perkebunan Kelapa Sawit. *Jurnal Konservasi Sumberdaya Alam*, 14(1), 25-34.
26. Marbun, R., & Silaen, T. (2017). Kajian Teknis Pemanfaatan Abu Boiler sebagai Sumber Kalium pada Tanaman Kelapa Sawit. *Jurnal Ilmu Pemupukan*, 9(2), 60-68.
27. Naibaho, P.M. (1996). Teknologi Pengolahan Kelapa Sawit. Pusat Penelitian Kelapa Sawit, Medan.
28. Napitupulu, H., & Br Sitorus, M. (2018). Kajian Sertifikasi ISPO dan RSPO terhadap Praktik Pengelolaan Limbah Perusahaan Kelapa Sawit. *Jurnal Kebijakan Pertanian*, 12(2), 95-104.
29. Nasution, M., & Harahap, Y. (2017). Pengaruh Aplikasi Kompos Tandan Kosong terhadap Sifat Kimia Tanah pada Perkebunan Kelapa Sawit. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 45(3), 210-218.
30. Pahan, I. (2018). Panduan Lengkap Kelapa Sawit: Manajemen Agribisnis dari Hulu hingga Hilir. Penebar Swadaya, Jakarta.

31. Panggabean, R., & Aritonang, J. (2016). Studi Kelayakan Ekonomi Pengolahan Limbah Sawit Menjadi Pelet Biomassa untuk Ekspor. *Jurnal Bisnis dan Ekonomi Terapan*, 11(2), 80-89.
32. Pemerintah Republik Indonesia. (2009). Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
33. Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
34. Purwanto, E., & Wardhani, N. (2019). Kajian Ekonomi Sirkular pada Industri Pengolahan Kelapa Sawit. *Jurnal Manajemen Agribisnis*, 19(1), 60-70.
35. Pusat Penelitian Kelapa Sawit. (2020). Warta Pusat Penelitian Kelapa Sawit: Perkembangan Teknologi Pengolahan Limbah. PPKS, Medan.
36. Rachmawati, I., & Suryadi, A. (2020). Pemanfaatan Bungkil Inti Sawit sebagai Bahan Pakan Ternak Ruminansia. *Jurnal Ilmu Peternakan Tropis*, 8(2), 120-128.
37. Ramadhani, F., & Saputra, B. (2016). Produksi Biogas dari Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Digester Anaerobik. *Jurnal Rekayasa Proses*, 10(1), 22-30.
38. Risza, S. (1994). Kelapa Sawit, Upaya Peningkatan Produktivitas. Kanisius, Yogyakarta.
39. Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). (2018). Principles and Criteria for Sustainable Palm Oil Production. RSPO, Kuala Lumpur.
40. Sari, M., & Wijaya, K. (2017). Teknologi Gasifikasi Biomassa sebagai Alternatif Energi Terbarukan pada Industri Sawit. *Jurnal Teknik Energi*, 9(2), 66-74.
41. Setyamidjaja, D. (2006). Kelapa Sawit: Teknik Budidaya, Panen, dan Pengolahan Hasil. Kanisius, Yogyakarta.
42. Silalahi, F., & Br Ginting, T. (2014). Analisis Kandungan Hara Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Substitusi Pupuk Anorganik. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 38(1), 10-18.

43. Simanjuntak, H., & Purnama, E. (2018). Potensi Energi Biomassa Cangkang dan Serat Sawit sebagai Bahan Bakar Boiler. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 14(2), 77-85.
44. Siregar, T., & Panjaitan, R. (2013). Analisis Ekonomi Investasi Pembangkit Listrik Tenaga Biogas pada Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis*, 5(2), 99-108.
45. Sistem Sertifikasi Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO). (2020). Pedoman Perkebunan Kelapa Sawit Berkelanjutan Indonesia. Kementerian Pertanian, Jakarta.
46. Situmorang, A., & Marpaung, C. (2021). Optimalisasi Rute Distribusi Kompos pada Perkebunan Kelapa Sawit Skala Luas. *Jurnal Logistik dan Rantai Pasok*, 6(1), 44-52.
47. Sunarko. (2014). Budi Daya Kelapa Sawit di Berbagai Jenis Lahan. AgroMedia Pustaka, Jakarta.
48. Susanto, A., dkk. (2019). Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit untuk Mendukung Pertanian Berkelanjutan. IPB Press, Bogor.
49. Tampubolon, S., & Sinaga, L. (2016). Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko pada Unit Pengolahan Limbah Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Keselamatan dan Kesehatan Kerja*, 8(1), 30-38.
50. Wibowo, A., & Lestari, D. (2020). Karakterisasi Biochar dari Cangkang Kelapa Sawit pada Berbagai Suhu Pirolisis. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 12(1), 40-49.
51. Wulandari, R., & Santoso, A. (2017). Karakteristik Fisik dan Kimia Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Bahan Baku Kompos. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 18(1), 33-42.
52. Yacob, S., et al. (2006). Baseline Study of Methane Emission from Anaerobic Ponds of Palm Oil Mill Effluent Treatment. *Science of the Total Environment*.

TENTANG PENULIS

Dr. Suratni Afrianti, S.T., M.Si.

Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana Teknik dan melanjutkan studi magister pada bidang ilmu lingkungan/agroindustri, serta meraih gelar doktor dengan fokus penelitian pada pengelolaan dan pemanfaatan limbah industri perkebunan. Penulis memiliki pengalaman mengajar, meneliti, dan terlibat dalam berbagai kegiatan pengabdian masyarakat yang berkaitan dengan pengelolaan lingkungan industri kelapa sawit.

Ketertarikan penulis pada isu keberlanjutan industri kelapa sawit bermula dari pengamatan langsung terhadap tantangan pengelolaan limbah di lapangan, yang kemudian mendorong penulis untuk mendalami teknologi pemanfaatan limbah, mulai dari pengomposan, produksi biogas, hingga penerapan prinsip ekonomi sirkular pada skala industri.

Selain aktif menulis bahan ajar dan artikel ilmiah, penulis juga kerap menjadi narasumber pelatihan bagi praktisi perkebunan dan mahasiswa terkait pengelolaan lingkungan berkelanjutan. Buku ini disusun sebagai wujud kontribusi penulis dalam menyebarkan pengetahuan mengenai pengelolaan dan pemanfaatan limbah kelapa sawit secara sistematis kepada dunia pendidikan dan industri.

Kritik, saran, maupun masukan atas buku ini sangat penulis harapkan sebagai bahan penyempurnaan pada edisi berikutnya.