

**ANALISIS POTENSI *REUSE SLUDGE* IPAL DARI INDUSTRI MINUMAN
FERMENTASI GANDUM SEBAGAI PUPUK ORGANIK UNTUK Mendukung
Efisiensi Industri dan Pertanian Berkelanjutan**

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan



SAPRIAN, ST., M.Sc

22927012

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2024

PENGESAHAN

**ANALISIS POTENSI REUSE SLUDGE IPAL DARI INDUSTRI MINUMAN
FERMENTASI GANDUM SEBAGAI PUPUK ORGANIK UNTUK MENDUKUNG
EFISIENSI INDUSTRI DAN PERTANIAN BERKELANJUTAN**

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh
Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan



Disetujui,
Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Kasam, MT.

NIK. 925110102

Tanggal: Juni 2024

Ir. Eko Siswoyo, ST., M.Sc.ES., Ph.D

NIK. 025100406

Tanggal: Juni 2024

Mengetahui,

Ketua Program Studi Magister FTSP UII



Dr. Andik Yulianto, ST., M.T.

NIK. 025100407

Tanggal: Juni 2024

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS POTENSI *REUSE SLUDGE* IPAL
INDUSTRI MINUMAN FERMENTASI GANDUM
SEBAGAI PUPUK ORGANIK UNTUK MENDUKUNG
EFISIENSI INDUSTRI DAN PERTANIAN
BERKELANJUTAN**

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

**Hari : Kamis
Tanggal : 27 Juni 2024**

Disusun Oleh:

**SAPRIAN, ST., M.Sc
22927012**

Tim Penguji :

Dr. Ir. Kasam, M.T.

()

Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D.

()

Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T.

()

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (magister), baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 26 Juni 2024

Yang membuat pernyataan

Saprian, S.T., M.Sc.

NIM: 22927012

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "**Analisis Potensi *Reuse Sludge* IPAL dari Industri Minuman Fermentasi Gandum Sebagai Pupuk Organik untuk Mendukung Efisiensi Industri dan Pertanian Berkelanjutan**" ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister (S2) Teknik Lingkungan di Program Studi Magister Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Tesis ini disusun dengan tujuan untuk mengkaji potensi *sludge* Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dari industri minuman fermentasi gandum sebagai pupuk organik yang dapat mendukung efisiensi industri dan pertanian berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif bagi pengelolaan lingkungan yang lebih baik dan mendukung praktik pertanian yang ramah lingkungan.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan bimbingan selama proses penyusunan tesis ini:

1. Bapak Dr. Ir. Kasam, MT., dan Bapak Ir. Eko Siswoyo, ST., M.Sc.Es., Ph.D. sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, saran, dan motivasi yang sangat berarti selama penyusunan tesis ini. Tidak lupa Ibu Dr. Suphia Rahmawati, S.T, M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan yang berarti bagi penyempurnaan tesis ini.
2. Bapak Dr. Andik Yulianto, ST., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, atas dukungan dan fasilitasi yang diberikan selama masa studi.
3. Nurul Maulidiya, S.Pd., M.Pd., istri tercinta, Ananda Shahreen Shaqueena Sanum dan King Kaif Uzair Sanum atas segala cinta, doa, dan dukungannya yang tiada henti. Kehadirannya menjadi sumber inspirasi dan motivasi terbesar bagi peneliti.

4. Seluruh tim hebat di Environesia Group, yang telah memberikan dukungan moral dan material serta fleksibilitas waktu yang sangat membantu dalam proses penelitian dan penulisan tesis ini.
5. Seluruh kawan dan sahabat mahasiswa di Program Studi Magister Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia atas kerjasama, dukungan, dan kebersamaan yang telah terjalin selama masa studi. Kehadiran kalian semua menambah semangat dan motivasi bagi peneliti.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif demi perbaikan dan penyempurnaan penelitian ini di masa mendatang.

Akhir kata, semoga tesis ini bermanfaat bagi pembaca dan dapat memberikan kontribusi nyata bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang Teknik Lingkungan.

Yogyakarta, 21 Juni 2024

Ir. Saprian, S.T., M.Sc.

DAFTAR ISI

PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN.....	ii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
ABSTRAK.....	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Ruang Lingkup Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Minuman Fermentasi Gandum	8
2.2. Limbah B3.....	14
2.3. Sistem Pengelolaan Limbah B3.....	18
2.4. Penentuan Status Limbah B3 Menjadi Limbah Non-B3.....	20
2.5. Nilai Ekonomi <i>Sludge</i> IPAL	21
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1. Desain Penelitian.....	25
3.2. Alat dan Bahan.....	25
3.3. Pengumpulan Data	25
3.4. Metode Pengambilan Uji dan Deskripsi Metode	25
3.5. Alat Utama dan Alat Pendukung Pengambilan Contoh Uji	26
3.6. Pelaksanaan Pengambil Contoh Uji	30
3.7. Metode Uji Karakteristik untuk Masing-masing Karakteristik Limbah.....	33
3.8. Metode Pengolahan Data.....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1. GAMBARAN UMUM PRODUKSI	37
4.1.1. Proses Kegiatan Utama (Produksi).....	37
4.1.2. Proses Kegiatan Pendukung	41
4.2. BAHAN DAN PENGUJIAN	44

4.2.1.	Bahan Baku dan Bahan Penolong.....	44
4.2.2.	Pelaksanaan Pengambilan Contoh Uji.....	45
4.2.3.	Hasil Uji Sampel di Laboratorium.....	47
4.2.4.	Evaluasi Hasil Uji.....	50
4.3.	EFISIENSI PEMANFAATAN <i>SLUDGE</i> IPAL	53
4.3.1.	Potensi Pemanfaatan <i>Sludge</i> IPAL sebagai Pupuk Organik	53
4.3.2.	Biaya Pengelolaan Limbah B3 jika dikategori sebagai Limbah B3	55
4.3.3.	Efisiensi Pemanfaatan Limbah <i>Sludge</i> sebagai Pupuk Organik	56
4.3.4.	Potensi Nilai Tambah Pemanfaatan <i>Sludge</i> sebagai Pupuk Organik	58
BAB V KESIMPULAN		60
5.1.	Kesimpulan	60
5.2.	Saran	61
5.3.	Rekomendasi.....	62
DAFTAR PUSTAKA.....		63

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Limbah B3 dari proses pembuatan minuman fermentasi gandum	12
Tabel 3. 1 Penggunaan Peralatan Pengambil Contoh Uji Limbah B3	26
Tabel 3. 2 Jenis Wadah Contoh Uji berdasarkan Parameter.....	31
Tabel 4. 1 Jenis bahan baku dan bahan penolong proses produksi	44
Tabel 4. 2 Identifikasi Sumber dan Karakteristik Air Limbah	45
Tabel 4. 3 Hasil uji karakteristik	47
Tabel 4. 4 Hasil uji TCLP	48
Tabel 4. 5 Hasil Uji LD ₅₀	50
Tabel 4. 6 Kelas Ketoksikan LD ₅₀	51
Tabel 4. 7 Rincian Biaya Pengelolaan Limbah B3 selama 1 (satu) Tahun	55
Tabel 4. 8 Tabel harga kompos di lokapasar	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Contoh Alat	27
Gambar 3. 2 Alur pengujian dan analisis penelitian	36
Gambar 4. 1 Diagram alur proses produksi	37
Gambar 4. 2 Dokumentasi Pengambilan Contoh Uji.....	46
Gambar 4. 3 Proses pengemasan hasil contoh uji	46
Gambar 4. 4 Analisa efisiensi biaya pemanfaatan <i>Sludge</i> IPAL sebagai Kompos	57

ABSTRAK

Problematika limbah industri semakin menjadi perhatian global, khususnya di Indonesia, termasuk dalam industri minuman fermentasi gandum yang memiliki nilai ekonomi signifikan dan kontribusi besar terhadap pendapatan negara. Industri ini menghasilkan limbah padat berupa *sludge* yang memerlukan pengolahan khusus untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik dan jumlah *sludge* IPAL yang dihasilkan, mengevaluasi tingkat toksisitasnya, serta menganalisis potensinya sebagai pupuk organik. Data uji karakteristik menunjukkan bahwa *sludge* ini tidak mudah meledak, tidak mudah nyala, tidak reaktif, dan tidak korosif, sehingga aman dalam konteks lingkungan. Hasil uji toksisitas menunjukkan bahwa *sludge* ini memenuhi baku mutu untuk seluruh parameter uji TCLP A dan TCLP B. Namun demikian, untuk parameter uji LD₅₀ meski termasuk dalam kelas kategori *slightly toxic* dengan nilai >5g/KgBB, namun tidak cukup untuk memenuhi standar Relatif Kurang Berbahaya karena tidak >15g/KgBB. Untuk dapat ditetapkan status limbah menjadi Limbah nonB3 perlu dilakukan uji tahap akhir, yaitu uji toksikologi subkronis guna memastikan keamanan pupuk organik dalam penggunaan jangka panjang. Dari segi ekonomi, penggunaan *sludge* sebagai pupuk organik dapat menghemat biaya pengelolaan limbah hingga 86%, mengurangi biaya dari Rp 3.053.270.000 menjadi Rp 416.355.000 per tahun, serta menghasilkan keuntungan dari penjualan pupuk kompos yang diproyeksikan mencapai Rp 4.024.765.000, dan bisa meningkat hingga Rp 5.412.615.000 jika *sludge* dikecualikan dari kategori Limbah B3. Penelitian ini mengusulkan bahwa pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik tidak hanya mendukung efisiensi industri dan pertanian berkelanjutan tetapi juga berkontribusi pada pengelolaan limbah yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

ABSTRACT

The issue of industrial waste is becoming a global concern, particularly in Indonesia, including in the wheat fermentation beverage industry, which has significant economic value and a substantial contribution to national income. This industry produces solid waste in the form of sludge that requires special treatment to reduce its negative environmental impact. This study aims to identify the characteristics and quantity of sludge produced by wastewater treatment plants (WWTP), evaluate its toxicity levels, and analyze its economic potential as organic fertilizer. Characterization test data indicate that this sludge is not explosive, not easily flammable, non-reactive, and non-corrosive, making it environmentally safe. Toxicity test results show that this sludge meets quality standards for all TCLP A and TCLP B test parameters. However, for the LD₅₀ test parameter, although it falls within the slightly toxic category with a value >5g/KgBW, it does not sufficiently meet the Relatively Less Harmful standard as it is not >15mg/KgBW. To determine the waste status as non-hazardous, a final test, specifically a subchronic toxicology test, needs to be conducted to ensure the safety of organic fertilizers for long-term use. Economically, the use of sludge as organic fertilizer can save up to 86% in waste management costs, reducing expenses from Rp3,053,270,000 to Rp416,355,000 per year, and generate profits from compost fertilizer sales projected to reach Rp4,024,765,000, potentially increasing to Rp5,412,615,000 if the sludge is excluded from the hazardous waste category. This study proposes that utilizing WWTP sludge as organic fertilizer not only supports industrial and agricultural sustainability but also contributes to more effective and environmentally friendly waste management.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Problematika lingkungan hidup khususnya terkait limbah industri semakin mendapat perhatian global, termasuk di Indonesia. Salah satu jenis industri yang perlu mendapatkan perhatian khusus terkait pengelolaan limbahnya yaitu industri yang bergerak di bidang produksi minuman hasil fermentasi gandum. Pemilihan jenis industri ini sebagai fokus penelitian disebabkan karena industri ini memiliki nilai ekonomi yang signifikan dan kontribusi yang besar terhadap pendapatan pajak negara. Selain itu, naiknya permintaan terhadap produk minuman fermentasi gandum, baik untuk pemasaran pada wilayah domestik maupun permintaan global, yang menjadikan industri ini sebagai sektor strategis bagi perekonomian Indonesia. Namun demikian, pada fakta di lapangan yang menyebutkan bahwa industri minuman fermentasi gandum menghasilkan limbah padat berupa *Sludge* dengan jumlah yang besar sehingga memerlukan pengolahan khusus untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan (Agustina et al, 2024). *Sludge* ini umumnya berasal dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) yang digunakan dalam proses produksi.

Kesalahan dan ketidaktepatan pengolahan *Sludge* IPAL dapat menyebabkan kerusakan pada kondisi air dan tanah, terlebih dapat berdampak pada kesehatan manusia dan ekosistem. Menurut Kunasheva et al (2023) Industri yang tidak baik dalam mengelola limbah yang dihasilkan dapat mencemari sumber daya air, merusak kualitas tanah serta mengancam kesehatan manusia dan ekosistem. Maka dari itu, jalan keluar atas permasalahan limbah industri diperlukan, tidak hanya efektif dalam mengelola limbah, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan lingkungan dan ekonomi.

Salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengelola limbah *sludge* adalah pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik. Agustina et al (2024) menyatakan bahwa pupuk organik dari *sludge* IPAL berpotensi memperbaiki kualitas unsur hara dalam tanah dan menyediakan nutrisi penting bagi tanaman. Hal ini sejalan dengan tujuan pertanian berkelanjutan yang mengutamakan penggunaan sumber daya secara efisien dan ramah lingkungan.

Namun perlu diperhatikan bahwa sebelum *sludge* IPAL dapat diaplikasikan sebagai pupuk organik, harus dilakukan evaluasi toksisitas untuk memastikan bahwa penggunaannya aman bagi lingkungan dan tidak menimbulkan risiko kesehatan. Evaluasi ini mencakup pengujian terhadap kandungan logam berat, senyawa organik berbahaya, dan mikroorganisme patogen yang mungkin terdapat dalam *sludge*. Menurut World Health Organization (2018), penting untuk mematuhi pedoman penggunaan limbah agar aman bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Di Indonesia, pengelolaan limbah diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Peraturan ini memberikan pedoman mengenai pengelolaan limbah, termasuk pengelolaan limbah industri seperti *sludge* dari IPAL, untuk memastikan bahwa pengolahan limbah dilakukan dengan cara yang aman dan sesuai dengan standar lingkungan yang berlaku. Proses pengecualian limbah B3 juga diatur dalam peraturan ini, yang meliputi pengajuan permohonan, evaluasi oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), uji laboratorium, penilaian teknis dan administratif, serta penerbitan keputusan pengecualian.

Selain aspek lingkungan, analisis potensi ekonomi dari penggunaan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik juga penting untuk dilakukan. Dengan memahami nilai ekonomis dari *sludge* ini, industri dapat melihat peluang penghematan biaya dan peningkatan efisiensi produksi melalui pendekatan *circular economy*. Hal ini tidak hanya mengurangi biaya pengolahan limbah, tetapi juga menciptakan produk bernilai tambah yang dapat meningkatkan keuntungan perusahaan. Kolaborasi terkait ekonomi dan lingkungan diungkapkan Burhanuddin (2016) mencerminkan pentingnya kolaborasi antara perspektif ekonomi dan lingkungan hidup dalam pembangunan yang berkelanjutan.

Potensi pemanfaatan *sludge* beragam, tergantung pada komposisi dan perlakuan yang diterapkan. Salah satu penggunaan utama adalah sebagai pupuk organik, mengingat *sludge* sering kali kaya akan bahan organik dan nutrisi seperti

nitrogen dan fosfor yang bermanfaat untuk pertanian dan hortikultura (Ulayya, 2020). Selain itu, sludge dapat diolah melalui proses anaerobik digestasi untuk menghasilkan biogas, yang merupakan sumber energi terbarukan (Mbani, & Sudarma, 2022). Proses komposting juga memungkinkan sludge diubah menjadi kompos, yang bisa digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah. Di sektor konstruksi, sludge yang memiliki kandungan mineral tertentu bisa dicampur dengan tanah liat untuk membuat batu bata atau bahan bangunan lainnya. Selain itu, penggunaan sludge sebagai soil conditioner dapat membantu memperbaiki struktur dan kesuburan tanah di lahan pertanian atau lahan kritis (Lestari, 2020).

Di bidang energi, sludge bisa diolah lebih lanjut melalui teknologi pembakaran atau gasifikasi untuk menghasilkan listrik, atau dicampur dengan bahan lain untuk membuat briket sebagai bahan bakar alternatif. Tidak hanya itu, sludge juga bisa diolah untuk diekstraksi bahan-bahan kimia tertentu yang berguna dalam industri (Putra et al, 2022). Salah satu potensi *sludge* IPAL terbesar pada bidang pertanian di mana Indonesia sebagai negara agraris dapat menjadi solusi atas permasalahan limbah dan ketahanan pangan.

Konsep ini menekankan perlunya menggabungkan kepentingan ekonomi dengan kelestarian lingkungan sebagai satu kesatuan. Dengan demikian, konsep pembangunan yang berkelanjutan tidak hanya mencakup pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan, tetapi juga perlindungan terhadap lingkungan hidup, yang akan menghasilkan manfaat jangka panjang bagi masyarakat serta kelangsungan hidup alam dan sumber daya yang dimilikinya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi toksisitas dan menganalisis potensi ekonomi *sludge* IPAL dari industri minuman fermentasi gandum sebagai pupuk organik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan strategi pengelolaan limbah yang lebih efektif dan berkelanjutan, serta mendukung praktik pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang sebelumnya, terkait permasalahan limbah, maka dapat dirancang rumusan masalah dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Bagaimana karakteristik dan jumlah timbulan *sludge* IPAL yang dihasilkan oleh industri minuman fermentasi gandum?
- b. Bagaimana toksisitas *sludge* IPAL dari industri minuman fermentasi gandum dan dampaknya terhadap lingkungan dan manusia?
- c. Bagaimana potensi ekonomi pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik untuk mendukung efisiensi industri dan pertanian berkelanjutan?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditentukan, maka tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Mengidentifikasi karakteristik dan jumlah timbulan *sludge* IPAL dari industri minuman fermentasi gandum
- b. Mengevaluasi tingkat toksisitas *sludge* IPAL dari industri minuman fermentasi gandum
- c. Menganalisis potensi ekonomi pemanfaatan *sludge* sebagai pupuk organik untuk mendukung efisiensi industri dan pertanian berkelanjutan

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan, di mana penelitian yang dilakukan akan menghadirkan kontribusi, berupa pandangan ilmiah terhadap bidang pengelolaan limbah industri dan pertanian berkelanjutan. Hasil dari evaluasi toksisitas *sludge* IPAL dan analisis potensi ekonominya sebagai pupuk organik akan memperkaya literatur ilmiah terkait pengelolaan limbah dan keberlanjutan lingkungan. Selain itu, penelitian yang dilakukan ini, diharapkan menjadi referensi bagi mahasiswa, akademisi, dan peneliti yang tertarik mendalami isu-isu lingkungan dan pengelolaan limbah industri. Dengan demikian, penelitian ini akan mendukung upaya pendidikan dalam menciptakan generasi yang lebih sadar lingkungan dan berpengetahuan luas dalam bidang keberlanjutan.

Selain itu, bagi dunia industri dan pertanian berkelanjutan, khususnya bagi sektor industri, terutama industri minuman fermentasi gandum, penelitian ini menawarkan solusi pengelolaan limbah yang tidak hanya efektif tetapi juga ekonomis. Pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik dapat mengurangi

biaya pengelolaan limbah dan meningkatkan efisiensi produksi. Selain itu, penggunaan pupuk organik dari *sludge* dapat meningkatkan kualitas tanah dan hasil pertanian, yang pada gilirannya mendukung pertanian berkelanjutan. Dengan pendekatan *circular economy* yang diusulkan dalam penelitian ini, industri dapat mengurangi jejak lingkungannya dan menciptakan produk bernilai tambah, sekaligus mendukung praktek pertanian yang lebih ramah lingkungan.

Tidak kalah penting penelitian ini diharapkan juga dapat memberikan manfaat bagi pemerintah dan *stakeholder* terkait. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam perumusan kebijakan dan regulasi pengelolaan limbah industri yang lebih efektif dan berkelanjutan. Data dan temuan dari penelitian ini dapat digunakan untuk memperbarui dan memperkuat peraturan yang ada, seperti Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Selain itu, penelitian ini dapat membantu pemerintah dalam mengawasi dan memastikan bahwa industri mematuhi standar lingkungan yang berlaku. Stakeholder lainnya, seperti organisasi non-pemerintah (NGO) dan masyarakat, juga akan mendapatkan manfaat dari penelitian ini melalui peningkatan kesadaran dan pengetahuan tentang pentingnya pengelolaan limbah yang bertanggung jawab dan berkelanjutan.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini meliputi beberapa aspek penting yang akan diuraikan sebagai berikut:

a. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini hanya mencakup industri minuman fermentasi gandum di Indonesia, sehingga hasil dan rekomendasi yang diberikan mungkin tidak dapat diterapkan secara langsung pada jenis industri lain atau di negara lain.

b. Jenis Limbah

Penelitian ini terbatas pada *sludge* yang dihasilkan dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di industri minuman fermentasi gandum. Limbah lain

yang dihasilkan oleh industri ini atau oleh industri lain tidak termasuk dalam studi ini.

c. Karakteristik *Sludge*

Analisis karakteristik *sludge* dalam penelitian ini hanya mencakup parameter yang dianggap paling relevan seperti reaktivitas, korosivitas, inflamabilitas dan toksisitas. Pada ruang lingkup uji toksisitas, parameter yang menjadi objek kajian yaitu TCLP A dan TCLP B dan LD₅₀. Ada pun parameter lain lain yang mungkin juga relevan, seperti Uji Toksikologi Subkronis berdasarkan hasil pengamatan terhadap tumbuhan, akumulasi atau biokonsentrasi, studi perilaku respon antar perilaku hewan uji dan histopatologis serta parameter lain yang mungkin berpengaruh atau relevan dikecualikan atau tidak masuk dalam penelitian.

d. Metode Pengujian

Pengujian toksisitas *sludge* menggunakan metode TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) A dan B serta pengujian LD₅₀. Metode pengujian lainnya tidak digunakan, sehingga hasil mungkin berbeda jika metode lain diterapkan.

e. Kualitas dan Efektivitas Pupuk

Penelitian ini tidak mendalami faktor kualitas pupuk organik yang dihasilkan dari *sludge* IPAL. Analisis mendalam mengenai kandungan nutrisi, kestabilan kompos, dan dampak jangka panjang pada kualitas tanah dan tanaman tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini.

f. Potensi Ekonomi

Analisis potensi ekonomi terbatas pada penghematan biaya pengelolaan limbah dan keuntungan dari penjualan pupuk kompos. Aspek ekonomi lainnya seperti biaya implementasi teknologi pengolahan dan potensi pasar internasional tidak dibahas secara mendetail.

g. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam kurun waktu tertentu yang mungkin mempengaruhi hasil analisis. Perubahan kondisi lingkungan, regulasi, dan teknologi pengolahan limbah yang terjadi setelah periode penelitian tidak dipertimbangkan dalam studi ini.

h. Regulasi dan Kebijakan

Penelitian ini mempertimbangkan regulasi dan kebijakan yang berlaku pada saat penelitian dilakukan. Perubahan atau perkembangan regulasi dan kebijakan di masa mendatang yang mungkin mempengaruhi pengelolaan *sludge* tidak termasuk dalam analisis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Minuman Fermentasi Gandum

Industri fermentasi minuman gandum telah berkembang pesat selama beberapa dekade terakhir, dipengaruhi oleh peningkatan permintaan akan produk minuman alami dan fungsional. Butir gandum utuh mengandung tiga bagian utama, yaitu endosperma, dedak, dan kecambah. Endosperma menyumbang 82-83% dari butir dan terutama mengandung pati dan protein gluten. Sebaliknya, dedak dan kecambah menyumbang masing-masing 13-14% dan 3% dari butir. Biasanya, endosperma bertepung diekstraksi untuk menghasilkan fraksi tepung dengan menghilangkan lapisan kernel luar, dedak, dan kecambah sebagai produk sampingan (Dapčević-Hadnađev *et al.*, 2018) melalui (Black & Walker, 2023).

Vargas Perucca *et al.* (2024) membahas penggunaan ragi *Saccharomyces cerevisiae* residu dari produksi minuman fermentasi sebagai biofertilizer untuk bibit hortikultura. Penelitian ini mengevaluasi efek konsentrasi ragi yang berbeda pada pertumbuhan bibit selada dan tomat, menunjukkan bahwa dosis 10^7 cells mL⁻¹ efektif dalam meningkatkan parameter pertumbuhan seperti tinggi tanaman, jumlah daun, serta berat segar dan kering. Penggunaan ragi ini tidak hanya membantu dalam meningkatkan performa tanaman, tetapi juga berfungsi sebagai alternatif organik yang lebih ramah lingkungan dibandingkan produk komersial, sehingga mengurangi pencemaran lingkungan yang dihasilkan dari pembuangan limbah ragi ke badan air publik.

Industri fermentasi dalam prosesnya setidaknya melewati lima proses dasar (Aung & Kim, 2023), diantaranya adalah:

- a) Pengecambahan (maltasi): gandum direndam dalam air hingga berkecambah dan menghasilkan enzim yang diperlukan untuk mengubah pati menjadi gula.
- b) Pengeringan dan Penggilingan: gandum berkecambah dikeringkan dan digiling menjadi malt.
- c) Pemasakan (*mashing*): *malt* dicampur dengan air panas untuk mengaktifkan enzim yang mengubah pati menjadi gula.

- d) Fermentasi: ragi ditambahkan ke dalam campuran untuk memfermentasi gula menjadi alkohol dan karbon dioksida. Proses ini, pada umumnya berlangsung dengan durasi sekian hari bahkan sampai beberapa pekan tergantung pada jenis minuman yang dihasilkan.
- e) Pemurnian dan pengemasan: minuman yang telah difermentasi kemudian disaring dan dikemas untuk distribusi.

Perkembangan teknologi dan industri minuman fermentasi gandum terus berkembang dengan inovasi teknologi yang mempermudah proses produksi dan meningkatkan kualitas produk. Beberapa teknologi terbaru termasuk penggunaan bioreaktor yang lebih efisien, kultur ragi yang lebih tahan terhadap kondisi fermentasi yang ekstrem, serta teknik penyaringan dan pengemasan yang lebih baik (Black & Walker, 2023). Pengembangan minuman probiotik dari tepung roti yang dibuang. Studi ini mengevaluasi pertumbuhan bakteri asam laktat (LAB) dan *Bifidobacterium* pada substrat tepung roti dengan atau tanpa penambahan enzim dan perlakuan desalinasi. Hasilnya menunjukkan bahwa semua minuman mencapai pH di bawah 4.1 setelah 24 jam fermentasi, dengan sampel yang diberi enzim mencapai tingkat keasaman lebih tinggi lebih cepat (Sigüenza-Andrés *et al.*, 2023).

Proses pembuatan minuman fermentasi gandum melibatkan beberapa tahap yang masing-masing menghasilkan limbah. Berikut adalah penjelasan mengenai jenis limbah yang dihasilkan pada setiap tahap:

a. Pengecambahan (maltasi)

Proses maltasi menghasilkan sejumlah besar produk sampingan. Mayoritas produk sampingan ini biasanya digunakan sebagai pupuk di lapangan, dibakar, atau dibuang ke saluran pembuangan sebagai limbah. Penggunaan produk sampingan seperti ini menimbulkan masalah lingkungan yang serius dan perlu diatasi karena pengembangan teknologi baru dapat mempengaruhi dan mengarahkan kembali penyalahgunaan produk sampingan yang penting secara bioteknologi ini (Karlović *et al.*, 2020). Pengurangan produk sampingan hingga seminimal mungkin, atau penggabungan kembali ke dalam proses produksi sebagai bahan baku dapat membantu mencapai keberlanjutan ekologis. Mengingat bahwa beberapa produk sampingan yang berasal dari industri maltasi

bersifat bergizi dan bernilai, tetapi murah dan terjangkau, produk tersebut dapat dimasukkan ke dalam berbagai industri yang berorientasi pada produksi makanan, farmasi, atau bioteknologi.

- 1) Air Perendaman: air yang digunakan untuk merendam gandum selama proses peneceambahan mengandung sisa-sisa pati, protein, dan enzim. Air ini dapat menjadi limbah cair yang perlu diolah sebelum dibuang.
- 2) Sisa Gandum: sebagian kecil gandum yang tidak berhasil berkecambah dapat dianggap sebagai limbah padat.

b. Pengeringan dan Penggilingan

- 1) Debu dan partikel halus: pengeringan dan penggilingan gandum menghasilkan debu dan partikel halus yang dapat menyebabkan polusi udara jika tidak ditangani dengan baik.
- 2) Kulit gandum: proses penggilingan juga menghasilkan kulit gandum (*bran*) yang terpisah dari endosperma. Meskipun sering digunakan kembali sebagai pakan ternak atau bahan bakar, ini tetap bisa dianggap sebagai limbah jika tidak dimanfaatkan.

c. Pemasakan (*mashing*)

Pemasakan dapat seperti yang diungkapkan oleh Black & Walker (2023) dapat mempengaruhi karakteristik fisikokimia, struktural, dan sensorik produk serta pencernaan dan ketersediaan hayati komponen. Secara umum, pemanggangan melibatkan perlakuan termal intens yang dilakukan pada suhu antara 150-300°C selama 8-25 menit di oven atau pemanggang. Kondisi pemanggangan spesifik, termasuk waktu dan suhu, sangat mempengaruhi komponen yang ada dalam produk biji-bijian. Para peneliti telah berfokus pada studi tentang bagaimana kondisi pemanggangan menyebabkan perubahan dalam karakteristik fisikokimia, profil struktural, komponen bioaktif, aktivitas antioksidan, dan ketersediaan hayati komponen biji-bijian. Peralatan dan protokol pemanggangan juga dapat menghasilkan produk akhir dengan kualitas yang berbeda. Pemanasan dengan pengadukan terus menerus adalah bagian umum dari metode pemanggangan konvensional, termasuk pemanggangan dalam panci, oven, dan pasir, serta bentuk pemanggangan yang lebih teknis, termasuk pemanggangan gelombang mikro, pemanggangan terus menerus konveksi paksa,

pemanggangan RevTech, pemanggangan uap super panas, dan pemanggangan inframerah.

- 1) *Spent grain*: Bahan sisa dari *mashing*, yang dikenal sebagai *spent grain*, terdiri dari serat, protein, dan sisa pati. *Spent grain* sering dimanfaatkan sebagai bahan pakan di industri peternakan, bahan bakar biomassa, atau bahkan dimanfaatkan untuk bahan baku dalam produksi makanan hewan peliharaan.
- 2) Air sisa: Air yang digunakan dalam proses *mashing* juga mengandung nutrisi terlarut dan partikel padat yang perlu diolah sebelum dibuang.

d. Fermentasi

Fermentasi banyak digunakan dalam produksi minuman sereal dan melibatkan konversi karbohidrat menjadi metabolit sekunder (misalnya, peptida, fenolik, hidrokarbon, senyawa siklik, dan asam) oleh mikroorganisme seperti bakteri, ragi, dan jamur. Selain menghasilkan metabolit sekunder, fermentasi juga meningkatkan atribut sensorik minuman termasuk warna, rasa, dan aroma. Fermentasi juga dapat mengurangi keberadaan antinutrien dalam biji-bijian sereal, termasuk asam fitat, tanin, dan polifenol. Fermentasi sereal juga telah ditemukan memperpanjang umur simpan minuman karena tingkat keasaman yang lebih tinggi menghambat pertumbuhan mikroba dan pembusukan (Black & Walker, 2023).

- 1) Ragi bekas (*Spent Yeast*): setelah fermentasi, ragi yang telah digunakan dianggap sebagai limbah. Ragi ini dapat digunakan kembali dalam industri makanan atau sebagai sumber nutrisi dalam pakan ternak, namun jika tidak dimanfaatkan, akan menjadi limbah organik.
- 2) Karbon dioksida (CO₂): Dari fermentasi yang dilakukan terdapat produk sampingan yang merupakan karbon dioksida. Karbon dioksida ini biasanya dilepaskan ke atmosfer, meskipun beberapa pabrik mengumpulkannya untuk digunakan kembali dalam proses karbonasi minuman atau dijual untuk keperluan industri lainnya.

e. Pemurnian dan pengemasan

- 1) Lumpur: selama proses penyaringan, lumpur yang terdiri dari sisa ragi, hop, dan partikel padat lainnya dihasilkan sebagai limbah. Lumpur ini bisa

digunakan sebagai pupuk atau dalam produksi biogas, tetapi tetap memerlukan pengelolaan yang tepat.

- 2) Air limbah: air yang digunakan dalam proses pencucian peralatan dan tangki fermentasi mengandung sisa produk fermentasi, bahan kimia pembersih, dan partikel padat. Air limbah ini memerlukan pengolahan sebelum dibuang.
- 3) Kemasan: limbah kemasan berupa botol kaca, kaleng, dan kertas sering kali dihasilkan dalam jumlah besar. Program daur ulang dan pengelolaan limbah kemasan sangat penting untuk mengurangi dampak lingkungan.

Timbulan limbah dari proses pembuatan minuman fermentasi gandum sebagian besar telah bersifat organik dan sebagian besar dapat didaur ulang. Hal ini tidak memastikan limbah atas proses pembuatan minuman gandum bebas limbah B3. Beberapa limbah B3 yang dihasilkan dari proses pembuatan minuman fermentasi gandum tertuang dalam Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Limbah B3 dari Proses Pembuatan Minuman Fermentasi Gandum

Proses penghasil limbah B3	Jenis limbah B3	Sumber limbah	Sifat limbah
Proses pembersihan secara kimiawi	Menggunakan pembersih asam (asam fosfat, asam asetat), basa (natrium hidroksida), deterjen	Pembersihan peralatan produksi, tangki fermentasi, dan pipa	Korosif dan dapat mencemari tanah
Bahan kimia sisa laboratorium	Limbah kimia berupa reagen kimia, pelarut organik, dan bahan kimia berbahaya lainnya	Limbah laboratorium dari pengujian dan analisis kualitas bahan baku dan produk akhir	Kontaminasi lingkungan
Sisa ragi dan bahan pembantu fermentasi	Sisa ragi dan bahan pembantu fermentasi yang mengandung aditif kimia atau kontaminan mikroba berbahaya dapat dikategorikan sebagai limbah B3	Sisa proses fermentasi dan produk pembersihan	Berpotensi mengandung mikroorganisme patogen dan kontaminasi lingkungan

Sumber: olah data peneliti berdasarkan Lampiran I Kep MENLHK

No : SK.10306/MENLHK-PKTL/PDLUK/PLA.4/9/2023

Pengelolaan limbah dari industri fermentasi minuman gandum memerlukan pendekatan terpadu. Langkah awal sebelum pengelolaan yang menentukan keberhasilan pengelolaan limbah B3 timbulan industri minuman fermentasi gandum adalah identifikasi dan klasifikasi jenis limbah. Kemudian pengelolaan dapat dijalankan lebih efisien, beberapa metode pengelolaan dilakukan proses sebagai berikut:

- a. Daur Ulang dan Reutilisasi: Menggunakan kembali *spent grain*, *spent yeast*, dan kulit gandum dalam industri lain seperti pakan ternak atau produksi biogas.
- b. Pengolahan Air Limbah: Instalasi pengolahan air limbah (IPAL) yang efektif untuk mengolah air sisa proses sehingga memenuhi standar lingkungan sebelum dibuang.
- c. Pengurangan Emisi CO₂: Mengumpulkan dan menggunakan kembali CO₂ yang dihasilkan selama fermentasi.
- d. Program Daur Ulang Kemasan: Mendorong program daur ulang botol, kaleng, dan kemasan lainnya untuk mengurangi volume limbah padat.

Produksi dan karakterisasi minuman fermentasi bebas gluten dari tepung gandum tumbuh. Penelitian ini menunjukkan bahwa fermentasi asam laktat meningkatkan karakteristik sensorik, kualitas nutrisi, dan keamanan minuman yang mengandung pati. Gandum yang ditumbuhkan digunakan sebagai substrat, dan kondisi perkecambahan dioptimalkan untuk meningkatkan kandungan protein, asam amino esensial, vitamin, mineral, asam lemak tak jenuh ganda, senyawa fenolik, GABA, dan aktivitas antioksidan (Aparicio-García *et al.*, 2021). Karakteristik minuman beralkohol dengan variasi kadar ekstrak buah bit dan lama fermentasi. Studi ini menemukan bahwa kandungan alkohol dan karakteristik sensorik minuman dipengaruhi oleh kadar ekstrak dan durasi fermentasi. Penelitian ini menunjukkan potensi variasi bahan dan proses fermentasi dalam mempengaruhi hasil akhir produk minuman fermentasi berbasis gandum (Ovihapsany *et al.*, 2018)

2.2. Limbah B3

Limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) adalah limbah yang mengandung bahan-bahan yang berbahaya atau beracun bagi manusia, hewan, dan lingkungan. Menurut Permen LHK No. 6 Tahun 2021 limbah B3 adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan kesehatan manusia. Limbah B3 diklasifikasikan berdasarkan sumber dan karakteristiknya, seperti berikut:

- 1) Berdasarkan sumbernya:
 - a. Limbah industri, misalnya limbah dari proses pabrik kimia, tekstil, elektroplating, minyak dan gas, farmasi, dan sebagainya.
 - b. Limbah rumah tangga, berupa baterai bekas, lampu neon, pestisida, cat, dan produk pembersih rumah tangga.
 - c. Limbah medis, berupa limbah dari rumah sakit, klinik, laboratorium, termasuk jarum suntik, obat-obatan kadaluarsa, dan bahan kimia laboratorium.
- 2) Berdasarkan karakteristiknya:
 - a. Korosif, yaitu bahan yang dapat menyebabkan kerusakan pada kulit atau logam, seperti asam kuat dan basa kuat.
 - b. Reaktif, yaitu bahan yang dapat menyebabkan ledakan atau reaksi kimia berbahaya, seperti peroksida organik dan logam alkali.
 - c. Beracun, yaitu bahan yang dapat menyebabkan keracunan jika terhirup, tertelan, atau terserap melalui kulit, seperti sianida, merkuri, dan pestisida.
 - d. Mudah terbakar, yaitu bahan yang mudah menyala pada suhu rendah, seperti pelarut organik (bensin, toluena) dan gas mudah terbakar (propana, butana).

Limbah B3 memiliki sifat-sifat tertentu yang menjadikannya berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia:

- a) Toksisitas: kemampuan limbah untuk menyebabkan keracunan atau efek merugikan pada organisme hidup. Toksisitas ini dapat bersifat akut (efek jangka pendek) atau kronis (efek jangka panjang).

- b) Persistensi: kemampuan limbah untuk tetap ada dalam lingkungan untuk waktu yang lama tanpa terurai, seperti senyawa organik persisten (*pops*) dan logam berat.
- c) Bioakumulasi: kemampuan bahan berbahaya untuk terakumulasi dalam jaringan organisme hidup, terutama di sepanjang rantai makanan, misalnya merkuri dan ddt.
- d) Mobilitas: kemampuan limbah untuk berpindah dalam lingkungan, baik melalui air, udara, atau tanah. Limbah dengan mobilitas tinggi dapat menyebar luas dan mencemari area yang lebih luas.
- e) Reaktivitas: kemampuan bahan untuk bereaksi secara cepat dan hebat dengan air, udara, atau bahan kimia lain, yang dapat menyebabkan ledakan, kebakaran, atau pelepasan gas beracun.

Limbah B3 dapat mempengaruhi lingkungan dalam berbagai cara, tergantung pada sifat fisik, kimia, dan biologisnya. Berikut adalah beberapa karakter limbah B3 di lingkungan:

1. Air

Menyebabkan pencemaran air: limbah B3 yang larut ke badan air dapat mencemari sumber air minum, sungai, dan danau, serta membahayakan ekosistem akuatik. Contohnya adalah logam berat sebagai contoh merkuri dan kadmium yang memiliki dampak dapat menyebabkan kerusakan pada kehidupan akuatik dan kesehatan manusia.

2. Tanah

Mengakibatkan degradasi tanah: limbah B3 yang terdeposit di tanah dapat mengubah komposisi kimia tanah, mengurangi kesuburannya, dan mempengaruhi organisme tanah. Misalnya, kontaminasi tanah oleh pestisida dan herbisida dapat membahayakan mikroorganisme tanah yang penting untuk kesehatan ekosistem.

3. Udara

Menimbulkan polusi udara: emisi gas berbahaya dari limbah B3 dapat mencemari udara dan berkontribusi terhadap masalah kesehatan seperti penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Bahan seperti gas klorin dan sulfur dioksida adalah contoh polutan udara yang berbahaya.

4. Efek pada ekosistem

Gangguan ekosistem: limbah B3 dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dengan merusak habitat alami dan mengurangi keanekaragaman hayati. Polutan organik persisten, misalnya, dapat menyebabkan efek jangka panjang pada populasi hewan dan tumbuhan.

Limbah B3 merupakan problematika serius bagi kualitas lingkungan hidup dan kesehatan manusia karena sifat toksisitas, persistensi, bioakumulasi, mobilitas, dan reaktivitasnya. Pengelolaan limbah B3 yang efektif dan sesuai dengan peraturan sangat penting untuk mencegah dan meminimalkan dampak negatifnya. Langkah-langkah pengelolaan yang meliputi: identifikasi, klasifikasi, pengumpulan, penyimpanan, pengangkutan, pengolahan, dan pemusnahan limbah B3 harus dilakukan dengan hati-hati untuk melindungi lingkungan dan kesehatan manusia.

Indrayati & Joko Susanto (2019) memberikan informasi tentang penggunaan teknologi pengolahan aerobik, yaitu *Oxydation Ditch*, sebagai alternatif untuk mengelola limbah air limbah organik dari minuman ringan. Penelitian ini menyoroti penggunaan parameter operasional, seperti BOD, COD, TSS, minyak & lemak, TDS, Total N, dan pH, untuk memantau sistem tersebut. Hasil observasi selama tiga bulan menunjukkan kestabilan dalam proses operasionalnya. Sistem ini berhasil mencapai efisiensi yang signifikan, sekitar 96,875% untuk BOD, 96% untuk COD, 80% untuk TSS, 75% untuk minyak & lemak, 76,92% untuk Total N, dan 41% untuk pH.

Limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) merupakan salah satu isu krusial dalam industri, termasuk industri minuman fermentasi gandum. Salah satu kelompok bahan kimia yang sering menjadi perhatian dalam konteks ini adalah ester ftalat (PAEs), yang digunakan untuk meningkatkan fleksibilitas dan daya tahan plastik (Iannone *et al.*, 2024). Sifat kimia PAEs yang tahan terhadap suhu tinggi mempromosikan degradasi dan pelepasannya ke lingkungan. Makanan dan minuman dapat terkontaminasi oleh PAEs melalui migrasi dari bahan kemasan karena PAEs tidak terikat kovalen pada plastik, serta melalui berbagai sumber lingkungan atau selama proses pengolahan.

Sebagai contoh, minuman beralkohol dalam wadah plastik memiliki risiko tertentu karena kandungan etanol yang ada memberikan kelarutan yang baik untuk PAEs. Menurut perannya sebagai senyawa pengganggu endokrin dan efek merugikannya pada hati, ginjal, serta sistem reproduksi dan pernapasan, International Agency on Research Cancer (IARC) mengklasifikasikan di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) sebagai karsinogen manusia yang mungkin (Iannone *et al.*, 2024). Oleh karena itu, untuk mengendalikan paparan manusia terhadap PAEs, banyak negara melarang penggunaannya dalam makanan sebagai zat non-pangan.

Sebagai contoh, di Eropa, Peraturan Komisi (EU) 2018/2005 membatasi penggunaan DEHP, dibutyl phthalate (DBP), benzyl butyl phthalate (BBP), dan diisobutyl phthalate (DiBP) hingga konsentrasi sama dengan atau di bawah 0.1 berat dalam plasticizers pada artikel yang digunakan oleh konsumen atau di area dalam ruangan. Laporan dari US Food and Drug Administration (FDA) menunjukkan bahwa beberapa minuman (dan makanan), terutama jus buah, mengandung kadar ftalat yang tinggi. Dalam beberapa kasus, pemalsuan minuman ringan dengan ester ftalat secara sengaja telah dilaporkan (Iannone *et al.*, 2024).

Penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi *Oxydation Ditch* mampu menghasilkan efisiensi yang tinggi dalam mengurangi parameter limbah organik yang diukur. Efisiensi tinggi dalam parameter BOD dan COD menandakan kemampuan sistem dalam mendegradasi bahan organik yang signifikan dalam limbah air minuman ringan. Penggunaan parameter operasional seperti TSS, minyak & lemak, Total N, dan pH menunjukkan keseluruhan aspek pengelolaan limbah yang teramati dalam sistem ini. Stabilitas proses yang diamati selama periode tiga bulan menunjukkan konsistensi dalam performa sistem aerobik *Oxydation Ditch* dalam mengelola limbah organik.

Hasil Tinjauan Pustaka ini memberikan wawasan tentang potensi penggunaan teknologi *Oxydation Ditch* dalam mengelola limbah organik dari minuman ringan. Efisiensi tinggi dalam mengurangi parameter limbah organik menjadi poin penting, karena mengindikasikan kemampuan sistem dalam mengelola limbah dengan efektif. Studi ini memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang penggunaan

teknologi yang dapat diterapkan dalam industri minuman ringan untuk meminimalkan dampak limbah organiknya terhadap lingkungan.

Tinjauan Pustaka yang diungkapkan oleh Bayu Anggara Sipayung (2021) mengulas praktik pengelolaan limbah padat non-B3 yang dilakukan di PT. Wahana Graha Makmur, sebuah perusahaan agroindustri di Sumatera Utara, Indonesia, yang terletak di daerah Sidikalang, yang terkenal sebagai salah satu daerah penghasil kopi terkemuka di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menhadirkan identifikasi sumber, jumlah, dan karakteristik limbah padat serta menganalisis pengelolaan limbah padat nonB3 PT. Wahana Graha Makmur. Metode pada penelitian tersebut dapat yang digunakan melibatkan pendekatan kuantitatif untuk menghitung timbulan limbah padat berdasarkan standar SNI 19-964-1994 dan pendekatan kualitatif terhadap pengelolaan limbah padat nonB3.

Sumber limbah padat dari PT. Wahana Graha Makmur dihasilkan dari dari kulit kopi, sisa ubi ungu, dan sisa lobak, dengan jumlah rata-rata limbah padat yang diolah mencapai 20 ton/hari. Pengelolaan limbah padat dilakukan dengan prinsip *reuse* melalui metode pengomposan. Limbah padat dari kulit kopi dan sisa olahan ubi ungu serta lobak diolah menjadi kompos. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya prinsip penggunaan kembali limbah padat melalui metode pengomposan, yang memungkinkan pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan dengan mengubahnya menjadi produk bernilai tambah seperti kompos yang dapat digunakan kembali dalam kegiatan pertanian.

Studi tersebut memberikan pemahaman mendalam tentang praktik pengelolaan limbah padat nonB3 di industri agroindustri kopi. Penggunaan metode pengomposan untuk mengolah limbah padat menjadi kompos menggambarkan strategi pengelolaan limbah yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Informasi ini menjadi penting dalam mengilustrasikan pendekatan inovatif dalam mengelola limbah, yang tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga menciptakan nilai tambah dari limbah yang dihasilkan.

2.3. Sistem Pengelolaan Limbah B3

Limbah terbanyak dalam proses pembuatan minuman fermentasi gandum adalah *sludge* yang mengalami multiproses produksi sehingga digolongkan limbah

B3. Limbah B3 *sludge* adalah lumpur yang mengandung bahan berbahaya dan beracun yang dihasilkan dari berbagai proses industri. *Sludge* ini bisa berasal dari berbagai sumber, seperti pengolahan air limbah domestik dan industri, proses produksi di industri kimia, farmasi, dan metalurgi, serta pengolahan air minum yang menggunakan bahan kimia koagulan dan flokulan (Agustina *et al*, 2024).

Limbah B3 *sludge* memiliki beberapa karakteristik yang membuatnya berbahaya, antara lain:

- a) Toksisitas: mengandung bahan kimia beracun seperti logam berat (merkuri, timbal, kadmium), senyawa organik berbahaya (PCB, pestisida), dan senyawa anorganik (asam kuat, basa kuat).
- b) Korosif: bisa mengandung bahan yang dapat merusak atau mengikis bahan lain, termasuk logam dan jaringan biologis.
- c) Reaktivitas: dapat bereaksi dengan bahan lain, air, atau udara untuk menghasilkan gas beracun atau ledakan.
- d) Inflamabilitas: beberapa *sludge* mungkin mengandung bahan yang mudah terbakar atau meledak.

Pengelolaan limbah B3 *sludge* melibatkan berbagai langkah untuk memastikan bahwa limbah tersebut diolah dan dibuang dengan aman. Berikut adalah tahapan utama dalam pengelolaan limbah B3 *sludge*:

- 1) Identifikasi dan Klasifikasi:
 - a. Pengujian laboratorium: menentukan komposisi kimia dan sifat fisik *sludge* untuk mengklasifikasikannya sebagai limbah B3.
 - b. Dokumentasi: menyimpan catatan rinci tentang sumber, jenis, dan jumlah limbah yang dihasilkan.
- 2) Pengumpulan dan penyimpanan
 - a. Pengumpulan: mengumpulkan *sludge* dalam wadah yang tahan bocor dan sesuai standar untuk mencegah kontaminasi.
 - b. Penyimpanan: menyimpan limbah dalam fasilitas yang aman, dengan label yang jelas untuk mengidentifikasi jenis dan bahaya limbah tersebut.
- 3) Pengangkutan

- a. Perizinan: menggunakan transportasi yang memiliki izin resmi untuk mengangkut limbah B3.
 - b. Keamanan: mengikuti prosedur keamanan yang ketat untuk mencegah kecelakaan atau kebocoran selama pengangkutan.
- 4) Pengolahan
- a. Stabilisasi dan solidifikasi: menambahkan bahan pengikat untuk mengurangi mobilitas dan toksisitas limbah.
 - b. Netralisasi: menggunakan bahan kimia untuk menetralkan sifat asam atau basa dari *sludge*.
 - c. Pengolahan biologis: menggunakan mikroorganisme untuk memecah bahan organik berbahaya dalam limbah.
 - d. Pengolahan termal: membakar *sludge* dalam insinerator khusus untuk mengurangi volume dan mengubah bahan berbahaya menjadi abu yang lebih aman.
 - e. Pengolahan kimia: memanfaatkan reaksi kimiawi untuk mengolah limbah berbahaya menjadi bentuk yang lebih aman.
- 5) Pembuangan akhir
- a. *Landfilling*: menempatkan *sludge* yang telah diolah di tempat pembuangan akhir yang dilengkapi dengan lapisan pelindung untuk mencegah pencemaran tanah dan air.
 - b. Pemanfaatan kembali: menggunakan kembali *sludge* yang telah diolah menjadi bahan baku pada industri lain atau sebagai bahan konstruksi.

2.4. Penentuan Status Limbah B3 Menjadi Limbah Non-B3

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, Bab II Pasal 3, penetapan status limbah B3 dilakukan terhadap limbah B3 dari sumber spesifik. Ini mencakup pengecualian dari Pengelolaan Limbah B3 atau penggolongan sebagai produk samping, serta limbah yang terindikasi memiliki karakteristik limbah B3, baik sebagai limbah B3 maupun limbah nonB3.

Rekomendasi penetapan Limbah sebagai Limbah nonB3 diatur pada ayat (1) huruf c diterbitkan jika hasil uji karakteristik Limbah B3 menunjukkan bahwa Limbah:

- a. Tidak memiliki karakteristik mudah meledak, mudah menyala, reaktif, infeksius, dan/atau korosif
- b. Memiliki nilai konsentrasi zat pencemar sama dengan atau lebih kecil dari nilai konsentrasi zat pencemar TCLP-B, untuk karakteristik beracun melalui uji TCLP
- c. Memiliki nilai LD₅₀ lebih besar dari 5000 mg/kg (lima ribu miligram per kilogram) berat badan hewan uji, untuk karakteristik beracun melalui Uji Toksikologi LD₅₀; dan
- d. Tidak memiliki karakteristik beracun melalui uji toksikologi sub-kronis berdasarkan hasil pengamatan terhadap pertumbuhan, akumulasi atau biokonsentrasi, studi perilaku respon antar individu hewan uji, dan histopatologis

2.5. Nilai Ekonomi *Sludge* IPAL

Penelitian oleh dos Santos et al. (2023) meninjau potensi dan tantangan penggunaan Brewery Spent Grain (BSG), yaitu limbah utama dari produksi minuman fermentasi, dalam skema biorefinery terintegrasi. Pendekatan ini melibatkan berbagai teknologi seperti digestasi anaerobik, fermentasi gelap, dan pirolisis untuk menghasilkan produk bernilai tambah. Studi ini menekankan pentingnya integrasi jalur teknologi untuk mengubah pabrik minuman fermentasi menjadi biorefineri yang menguntungkan, dengan memaksimalkan penggunaan bahan baku, diversifikasi produk, peningkatan efisiensi proses, dan pengurangan jejak karbon.

Chen et al. (2023) berfokus pada pemulihan dan pemanfaatan limbah filtrat dari fermentasi biologis industri sebagai biofertilizer cair. Studi ini menemukan bahwa *Bacillus cereus* adalah mikroorganisme fungsional yang efisien dalam memanfaatkan limbah filtrat untuk produksi biofertilizer. Dengan mengoptimalkan parameter proses material, penelitian ini menunjukkan bahwa filtrat limbah dapat dikembangkan secara efisien menjadi biofertilizer cair yang memenuhi standar biofertilizer di Cina. Selain itu, beberapa senyawa dalam filtrat limbah yang

memiliki potensi untuk mendukung pertumbuhan dan pertahanan tanaman dapat ditingkatkan melalui penggunaan *Bacillus cereus*

Sludge merupakan lumpur hasil dari proses pengendapan dalam pengolahan air limbah. *Sludge* dapat mengandung bahan organik, anorganik, nutrisi, logam berat, dan mikroorganisme patogen (Agustina *et al*, 2024). Karakteristik *sludge* bervariasi tergantung pada sumber dan jenis limbah yang diolah (Rulkens, 2008). *Sludge* dapat dimanfaatkan dalam berbagai cara yang memberikan nilai ekonomi, antara lain:

- 1) Pupuk dan amandemen tanah
 - a. Bahan organik: *sludge* mengandung bahan organik yang tinggi yang bermanfaat sebagai pupuk atau amandemen tanah, meningkatkan kesuburan dan struktur tanah.
 - b. Nutrien: mengandung nutrisi penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang dibutuhkan tanaman.
- 2) Produksi energi
 - a. Biogas: melalui proses anaerobik, *sludge* dapat diubah menjadi biogas (terutama metana) yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan.
 - b. Pembakaran: *sludge* yang telah dikeringkan dapat dibakar untuk menghasilkan energi panas atau listrik.
- 3) Bahan baku industri
 - a. Bahan bangunan: *sludge* dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan batu bata, semen, dan bahan bangunan lainnya.
 - b. Bahan kimia: ekstraksi logam berharga atau bahan kimia tertentu dari *sludge*.

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengolah *sludge* dan meningkatkan nilai ekonominya:

- 1) Pengolahan anaerobik
 - a. Digestasi anaerobik: proses biologis di mana mikroorganisme menguraikan bahan organik dalam kondisi anaerobik untuk menghasilkan biogas.

- 2) Pengolahan termal
 - a. Insinerasi: pembakaran *sludge* untuk menghasilkan energi, meskipun memerlukan investasi awal yang tinggi dan pengendalian emisi yang ketat.
 - b. Pirolisis: pemanasan *sludge* dalam kondisi tanpa oksigen untuk menghasilkan minyak pirolisis, gas sintetis, dan biochar.
- 3) Stabilisasi dan kompos
 - a. Kompos: pencampuran *sludge* dengan bahan organik lain dan pengomposan untuk menghasilkan kompos yang berguna sebagai pupuk organik.
 - b. Stabilisasi kimia: penambahan bahan kimia untuk menstabilkan *sludge* dan mengurangi patogen.
- 4) Teknologi pemisahan
 - a. Teknologi *dewatering*: mengurangi kandungan air dalam *sludge* menggunakan teknologi seperti *filter press*, *centrifuge*, atau *belt press* untuk mempermudah pengangkutan dan pemrosesan lanjutan.
 - b. Ekstraksi logam: menggunakan metode kimia atau biologis untuk mengekstrak logam berharga dari *sludge*.

Di Indonesia, dengan populasi yang mencapai 270 juta, limbah domestik menjadi salah satu kontributor utama limbah yang dihasilkan dari aktivitas manusia (Widyarani *et al.*, 2022). Dalam konteks ini, *sludge* yang dihasilkan dari pengolahan air limbah domestik dan industri dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik, mengingat tingginya kandungan nutrisi yang diperlukan oleh tanaman. Pemanfaatan *sludge* dapat memberikan berbagai manfaat ekonomi, antara lain:

- 1) Pengurangan biaya pengelolaan
 - a. Efisiensi pengolahan: mengurangi volume dan berat *sludge* sehingga menurunkan biaya pengangkutan dan pengolahan.
 - b. Penghematan energi: produksi energi dari *sludge* dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional.

2) Pendapatan tambahan

- a. Penjualan produk: menjual produk hasil pengolahan *sludge* seperti pupuk, kompos, biogas, atau bahan bangunan.
- b. Inovasi dan teknologi: pengembangan teknologi baru untuk pengolahan *sludge* dapat menjadi lahan sebagai peluang adanya industri baru.

3) Dampak lingkungan positif

- a. Pemanfaatan limbah: mengurangi pembuangan limbah ke lingkungan dan memanfaatkan bahan yang ada.
- b. Pengurangan emisi: pengolahan *sludge* yang efisien dapat menekan angka emisi gas rumah kaca dan polusi lainnya.

Pemanfaatan *sludge* sebagai pupuk organik tidak hanya membantu mengurangi biaya pengelolaan limbah, tetapi juga memberikan nilai tambah ekonomi dengan mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia yang lebih mahal dan berpotensi merusak lingkungan. Selain itu, penggunaan *sludge* sebagai pupuk organik juga dapat mendukung keberlanjutan pertanian dan efisiensi industri. Sebagai contoh, di Indonesia, *grey water* atau air limbah domestik yang belum diolah sering kali menyebabkan pencemaran lingkungan yang signifikan (Widyarani *et al.*, 2022).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini memiliki sifat pendekatan eksperimental dengan pendekatan data dan analisis secara kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi data toksisitas dan potensi ekonomi *sludge* IPAL. Penelitian tentang bagaimana efisiensi dalam pengelolaan limbah nonB3 pada industri minuman fermentasi gandum mengadopsi pendekatan kuantitatif. Penelitian dilakukan pada salah satu industri minuman fermentasi gandum dengan kapasitas produksi minuman fermentasi gandum tersebut mencapai 63.388 m³/tahun yang tidak dapat disebutkan secara spesifik dikarenakan pertimbangan bisnis.

3.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang dioperasikan yaitu alat-alat laboratorium Spektrofotometer, ICP-MS, peralatan uji toksisitas. Sementara bahan yang digunakan yaitu reagen kimia, wadah pengambilan sampel, bahan pendukung laboratorium.

3.3. Pengumpulan Data

Data primer yang digunakan pada penelitian ini yaitu hasil pengujian laboratorium atas *sludge* IPAL. Adapun data sekunder yang digunakan yaitu data terkait biaya pengelolaan limbah, harga pasar pupuk organik, dan literatur terkait.

3.4. Metode Pengambilan Uji dan Deskripsi Mengenai Metode Pelaksanaan Pengambilan Uji

Metode dalam pengambilan sampel uji dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 8520:2018 tentang Cara Pengambilan Sampel Uji Limbah Padat B3. Uji pengambilan sampel limbah padat B3 wajib dilaksanakan secara representatif berdasarkan standar pengendalian mutu dan jaminan mutu di lapangan. Sebelum proses pengambilan sampel uji, petugas di lapangan harus mempunyai informasi lengkap terkait sampel uji dan parameter yang akan dianalisis. Pengambilan contoh uji sedimen untuk mengetahui kualitas sedimen, dapat dilakukan secara *grab* atau menggunakan metode penentuan titik sampling tanah secara *systematic random sampling* untuk memastikan sampel yang diambil mewakili populasi. Penggunaan yang tepat dari *grab sampler* dapat memberikan

data yang akurat dan andal untuk analisis lebih lanjut, membantu memastikan bahwa pengelolaan limbah *sludge* dilakukan sesuai dengan standar lingkungan dan regulasi yang berlaku.

Petugas juga perlu menyiapkan alat pelindung diri yang sesuai dengan karakteristik sampah yang akan diambil. Informasi tersebut dapat diperoleh dari dokumen limbah seperti lisensi, *Material and Safety Data Sheet* (MSDS), serta informasi dari penghasil, pengangkut, pembuang, dan pengolah limbah. Peralatan pengambilan sampel uji harus terbuat dari bahan yang tidak mempengaruhi sifat sampel uji, mudah dibersihkan dari kontaminan, aman, praktis, dan memungkinkan sampel uji mudah dipindahkan ke dalam wadah sampel uji.

3.5. Alat Utama dan Alat Pendukung Pengambilan Contoh Uji

Ragam dan penerapan instrumen pengambil sampel untuk uji limbah B3 padat yang akan diterapkan berserta jenis sampel yang akan diambil dan lokasi di mana limbah B3 padat berada, dijelaskan dalam Tabel 3.1.

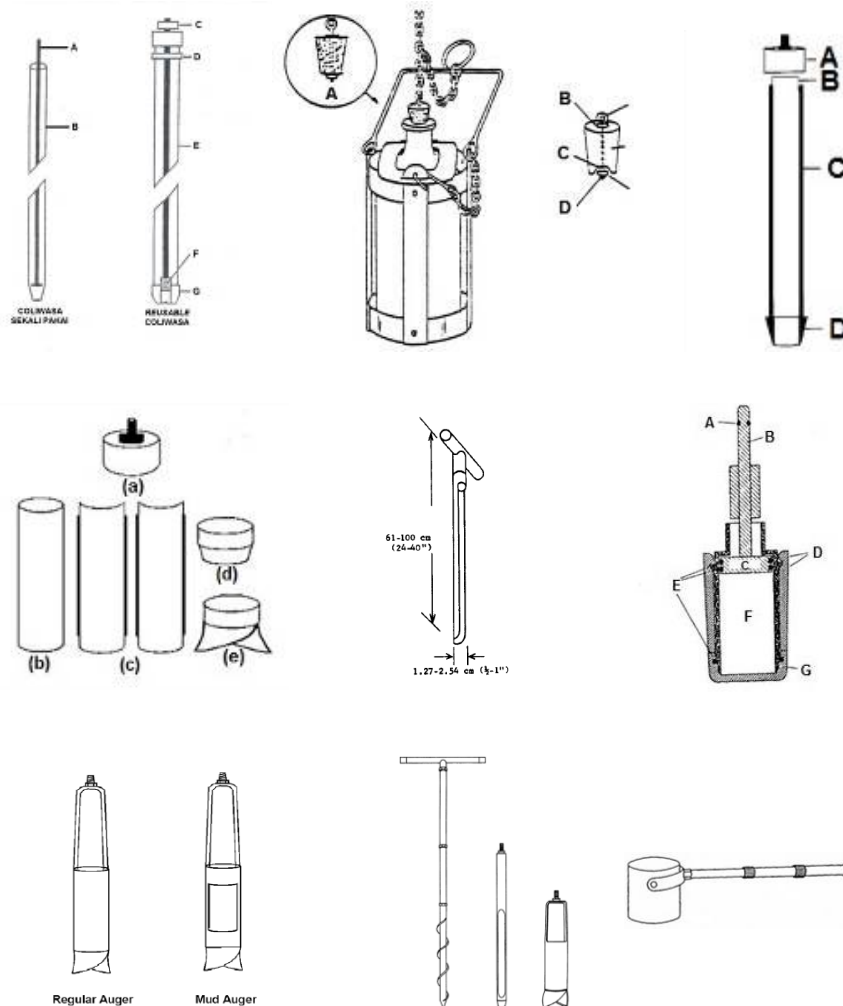
Tabel 3.1 Penggunaan Peralatan Pengambil Contoh Uji Limbah B3 pada Jenis Limbah Padat

Jenis Limbah Padat	Lokasi dan atau tempat limbah								
	Drum	Karung	Bak Terbuka	Bak Tertutup	Tangki Penyimpanan	TPS	Kolam	Conveyor	Pipa
Slurry	Coliwasa	N/A	N/A	Coliwasa	Wighted Bottle	N/A	Dipper	N/A	Dipper
Lumpur (<i>Sludge</i>)	Trier	N/A	Trier	Trier	Trier	B	B	-	-
Padatan granul berair	Trier	Trier	Trier	Trier	Trier	Trier	Trier	Shovel	Dipper
Padatan granul kering	Thief	Thief	Thief	Thief	A	Thief	Thief	Shovel	Dipper
Pasir, granul, serbuk padat	Auger	Auger	Auger	Auger	Thief	Thief	B	Dipper	Dipper
Padatan butiran besar	Large Trier	Large Trier	Large Trier	Large Trier	Large Trier	Large Trier	Large Trier	Trier	Dipper

Sumber: olah data peneliti berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 8520:2018

Keterangan:

N/A	Not applicable
A	Applicable
B	Memerlukan peralatan khusus
Shovel	Sekop kecil
TPS	Tempat penampungan sementara



Gambar 3. 1 Contoh Alat dari kiri atas ke kanan 1. Coliwasa, 2. Weighted Bottle Sampler, 3. Weighted Penetrating Probe Sampler, 4. Split Barrel Sampler, 5. Concentric Tube Thief, 6. Trier, 7. Miniature Core Sampler, 8. Bucket Auger dan Thin Wall-Tube S

Sumber: Standar Nasional Indonesia (SNI) 8520:2018

Berikut merupakan penjelasan detail terkait alat-alat yang digunakan untuk pengambilan contoh uji:

(a) Coliwasa (*Composite liquid waste sampler*)

Alat berikut merupakan perangkat bentuk tabung panjang dengan material bahan dari gelas, plastik, atau logam. Alat tersebut umumnya memiliki penutup yang dapat dibuka dan ditutup ketika dibutuhkan serta dapat dibenamkan ke dalam masa limbah. Alat ini digunakan untuk mengambil sampel uji limbah dalam bentuk *slurry* atau lumpur dari drum atau wadah serupa.

Komponen alat:

- | | | | |
|---|--------------------------------|---|---------------------|
| A | <i>glass rod</i> | E | <i>sampler body</i> |
| B | <i>glass body</i> | F | <i>piston valve</i> |
| C | <i>mur pengunci (lock nut)</i> | G | <i>valve body</i> |
| D | <i>indicator/scrapper ring</i> | | |

(b) *Weighted bottle sampler*

Alat ini terdiri dari botol gelas atau plastik yang dilengkapi dengan pemberat dan penutup. Tali yang terpasang pada alat ini memungkinkan untuk mengatur kedalaman pengambilan sampel. Alat ini cocok untuk mengambil sampel *slurry* dari kolam limbah (*lagoon, pond*) atau tangki pengolahan air limbah.

Komponen alat:

- A sumbat (*cork*)
- B *washer*
- C *pin*
- D *nut*

(c) *Penetrating probe sampler*

Alat ini ditujukan untuk pengambilan sampel tanah yang memiliki sifat keras dan sampel berupa padatan lainnya. Volume sampel yang biasanya diambil dengan alat ini berkisar antara 0,2 liter hingga 2 liter.

Komponen alat:

- A tutup atas berulir
- B *removable liner*
- C *one piece probe body*
- D *coring tip*

(d) *Split Barrel Sampler*

Alat ini dapat digunakan sebagai pengambilan sampel tanah basah yang berpasir dan sampel padatan lainnya. Volume sampel yang dapat diambil berkisar antara 0,5 liter hingga 30 liter. Panjang alat ini berkisar antara 18 inci hingga 30 inci (45 cm hingga 75 cm), dengan diameter bagian dalam 1,5 inci hingga 2,5 inci (3,75 cm hingga 6,25 cm).

Komponen alat:

- (a) tutup atas berulir (*threaded top cap*)
- (b) *optional liner*
- (c) *split barrels*, diperpanjang dengan sambungan *set barrel* tambahan
- (d) *coring tip*
- (e) *auger tip*

(e) *Concentric Tube Thief*

Alat ini digunakan untuk pengambilan sampel limbah padat dalam bentuk serbuk atau granula, serta limbah yang menumpuk atau yang terdapat dalam karung dan/atau drum (sesuai Tabel 1). Volume sampel yang dapat diambil berkisar antara 0,5 liter hingga 1 liter. Panjang alat ini berkisar antara 24 inci hingga 40 inci (61 cm hingga 100 cm), dengan diameter bagian dalam 0,5 inci hingga 1 inci (1,27 cm hingga 2,54 cm).

(f) *Trier*

Alat ini dapat digunakan sebagai alat untuk mengambil sampel tanah dan material padat lainnya. Terbuat dari *stainless steel* atau logam yang dilapisi PTFE/plastik, alat ini dapat mengambil sampel dengan volume berkisar antara 0,1 liter hingga 0,5 liter. Panjang alat ini berkisar antara 24 inci hingga 40 inci (61 cm hingga 100 cm), dengan diameter bagian dalam 0,5 inci hingga 1 inci (1,27 cm hingga 2,54 cm).

(g) *Miniature core sampler*

Alat ini dapat digunakan ketika dibutuhkan untuk pengambilan sampel tanah dan/atau limbah padat yang mengandung senyawa organik mudah menguap (*volatile*). Terbuat dari *stainless steel*, alat ini dapat mengambil sampel dengan volume berkisar antara 0,01 liter hingga 0,05 liter.

Komponen alat:

- | | | | |
|---|----------------------|---|----------------------|
| A | <i>O-ring</i> | E | <i>Viton O-Rings</i> |
| B | <i>plunger rod</i> | F | <i>coring body</i> |
| C | <i>plunger</i> | G | <i>cap</i> |
| D | mekanisme penguncian | | |

(h) *Bucker Auger* dan *Thin Wall-Tube Sampler*

Alat ini direkomendasikan untuk pengambilan sampel tanah, sedimen, atau limbah padat yang tidak menyatu (granula). Terbuat dari *stainless steel*, alat ini dapat mengambil sampel dengan volume berkisar antara 0,2 liter hingga 1,0 liter.

(i) *Dipper*

Alat yang memiliki susunan yang terdiri dari gelas piala atau wadah plastik yang diapit dengan klem dan dapat dihubungkan dengan gagang aluminium atau serat kaca yang dapat diperpanjang, menyerupai gayung plastik. Alat ini cocok untuk mengambil sampel *slurry* dari kolam limbah (*lagoon, pond*), drum, atau tangki pengolahan air limbah.

3.6. Pelaksanaan Pengambil Contoh Uji dan Sertifikasi Pelatihan Pengambilan Contoh Uji oleh Pelaksana

Mengingat jenis sampel adalah *sludge*, maka pelaksana pengambilan contoh uji diutamakan yang sudah berkompeten dan tersertifikasi kompetensi kerja petugas pengambil contoh uji yang tersertifikasi dari lembaga resmi akreditasi nasional.

3.6.1. Jumlah contoh uji yang diambil

Jumlah contoh uji yang diambil seharusnya mewakili dari total *sludge* di bak penyimpanan. Secara umum sampel contoh uji yang diambil minimal ± 500 gram untuk 1x pengambilan di 1 botol sampel

3.6.2. Wadah atau kemasan penyimpanan contoh uji

Wadah contoh uji dapat menggunakan satu atau lebih jenis wadah yang memiliki persyaratan wadah contoh uji sebagai berikut:

- a) Botol mulut lebar terbuat dari bahan gelas, plastik *Polipropilen* (PP), *High Density Polietilen* (HDPE) atau *Politetrafluorotilena* (PTFE).
- b) Dapat ditutup dengan rapat dan kuat.
- c) Bersih dan bebas dari kontaminan.
- d) Tidak bereaksi dengan contoh uji.

Tabel 3. 2 Jenis Wadah Contoh Uji berdasarkan Parameter

No.	Parameter	Jenis Wadah	Lama Penyimpanan	Kondisi Penyimpanan
1.	Bahan organik semi volatil	Botol gelas gelap (amber)	14 hari	Lemari pendingin dengan suhu 0°C – 6°C
2.	Bahan organik volatil	Botol gelas gelap (amber)	14 hari	
3.	Logam-logam berat	HDPE	6 bulan	
	Logam berat merukri (Hg)	Botol gelas gelap (amber)	28 hari	
4.	TCLP-semi volatil/volatil	Botol gelas gelap (amber)	14 hari	
	TCLP-logam	HDPE	6 bulan	
5.	Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)	Botol gelas gelap (amber)	7 hari (14 hari sesudah diekstraksi)	
6.	Karakteristik mudah menyala	Botol gelas gelap (amber)	secepatnya	Suhu ruang
7.	Karakteristik mudah meledak	Botol gelas gelap (amber)	secepatnya	
8.	Karakteristik reaktif	Botol gelas gelap (amber)	secepatnya	
9.	Karakteristik korosif	Botol gelas gelap (amber)	secepatnya	

Sumber: Standar Nasional Indonesia (SNI) 8520:2018

3.6.3. Metode pengawetan contoh uji

Pengawetan contoh uji untuk parameter karakteristik mudah menyala, mudah meledak, reaktif, dan korosif mengacu pada metode pengujian yang digunakan.

a. Mudah menyala

Berdasarkan SNI 7184.3 – 2011 tentang Karakteristik Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) – Bagian 3, Cara Uji Titik Nyala dalam limbah cair dan semi padat, semua contoh uji dikumpulkan sesuai urutan pengambilan contoh uji yang tercantum dalam *Test Method for Evaluating Solid Waste* (USEPA SW 846, 1994). Selanjutnya, contoh uji yang mengandung air dikeringkan dengan melewati bahan melalui CaCl₂.

b. Mudah meledak

Berdasarkan *Methods of Evaluating Explosive Reactivity of Explosive-Contaminated Solid Waste Substances*, sampel ditempatkan dalam pipa baja yang ditutup di kedua ujungnya. Untuk sampel padat, dimuat dengan kerapatan yang dicapai dengan mengetuk silinder sampai tidak terlihat pengendapan lebih lanjut.

c. Reaktif

Pada Method 1050 tentang *Test Methods to Determine Substance Likely to Spontaneously Combust* di mana sampel harus dikumpulkan, diangkut dan disimpan sedemikian rupa untuk menghindari semua kontak dengan udara. Berdasarkan metode ini, tidak diperlukan pengawetan sampel kimia untuk pengujian ini.

d. Korosif

Untuk karakter korosif, berdasarkan Method 9045D – United States Environmental Protection Agency (US-EPA): Soil and Waste pH untuk Limbah B3 padat, bahwasannya sampel harus segera dianalisis lebih cepat lebih baik sehingga tidak membutuhkan pengawetan contoh uji.

3.6.4. Sistem kontrol mutu dan jaminan mutu dalam pengambilan contoh uji

Pengendalian mutu dapat dilakukan dengan cara:

- 1) Mamanfaatkan pelatant dan wadah yang bebas kontaminasi
- 2) Menggunakan alat ukur yang telah terkalibrasi
- 3) Ddilakukan oleh petugas yang kompeten
- 4) Evaluasi atau terkait kontrol atas mutu dapat dilaksanakn minimal dengan cara berikut ini:
 - a) Blanko Peralatan
 - a. Blanko ini dsisediakan sebagai kontrol kontaminasi pada alat-alat pengambil contoh uji yang digunakan;
 - b. Membersihkan dengan cara mencuci seluruh peralatan yang akan digunakan dengan sabun yang terbebas dari fosfat serta air bebas mineral, kemudian dapat keringkan;
 - c. Membilah kembali alat yang digunakan dengan air bebas mineral, kemudian tampung bilasan ke dalam botol wadah contoh uji;
 - d. Air bilasan adalah blanko peralatan yang akan diuji sesuai parameter untuk kontrol kontaminasi dari peralatan;
 - e. Lakukan pengujian terhadap parameter yang sesuai dengan parameter uji terhadap contoh uji.

- b) **Blanko Lapangan**
 - a. Siapkan air bebas mineral di dalam botol wadah;
 - b. Bawa ke lapangan, dan botol dibuka selama saat pengambilan contoh uji dilaksanakan;
 - c. Tutup kembali dan perlakukan sama dengan contoh uji
- c) **Duplikat Contoh Uji**
 - a. Contoh uji diambil dari titik yang sama pada waktu yang hampir bersamaan.
 - b. Bila contoh uji kurang dari lima, contoh uji duplikat tidak diperlukan
 - c. Bila contoh uji diambil 5 contoh sampai dengan 10 contoh, satu contoh uji duplikat harus diambil
 - d. Bila contoh uji diambil lebih dari 10 contoh, contoh uji duplikat adalah minimal 5% per kelompok parameter matriks yang diambil

3.7. Metode Uji Karakteristik untuk Masing-masing Karakteristik Limbah

Uji karakteristik Limbah B3 meliputi:

a) Mudah meledak

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran X tentang Parameter Uji Karakteristik Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, limbah B3 yang mudah meledak adalah limbah yang pada suhu dan tekanan standar, yaitu 25°C (dua puluh lima derajat Celsius) atau 760 mmHg (tujuh ratus enam puluh milimeter air raksa), dapat meledak, atau melalui reaksi kimia dan/atau fisika menghasilkan gas dengan suhu dan tekanan tinggi yang dapat merusak lingkungan sekitarnya dengan cepat. Pengukuran ini dilakukan dengan metode ASTM D93-10, yang digunakan untuk mendeteksi kontaminasi bahan yang relatif tidak mudah menguap atau terbakar dengan bahan yang mudah menguap atau terbakar. Dalam metode ASTM D93, sejumlah sampel dipanaskan dengan kecepatan tertentu sambil diaduk dalam cup tertutup. Pengujian penyalan dilakukan saat sampel mencapai suhu tertentu dengan mendekatkan api ke permukaan sampel hingga *flash point* terdeteksi.

b) Mudah menyala

Berdasarkan regulasi oleh Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran X, limbah B3 yang mudah menyala adalah limbah cair yang mengandung alkohol kurang dari 24% volume dan/atau memiliki titik nyala tidak lebih dari 60°C (enam puluh derajat Celsius) atau 140°F (seratus empat puluh derajat Fahrenheit) yang menyala jika terkena api, percikan api, atau sumber nyala lainnya pada tekanan udara 760 mmHg (tujuh ratus enam puluh milimeter air raksa). Pengujian ini dilakukan menggunakan metode *closed tester*, pensky martens closed cup, atau metode setara dan terbaru, seperti metode 1030 EPA – *United States Environmental Protection Agency (US-EPA): Ignitability of Solids*.

c) Reaktif

Dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran X, limbah B3 yang reaktif adalah limbah yang pada kondisi normal tidak stabil dan dapat menyebabkan perubahan tanpa peledakan, serta menunjukkan tanda-tanda seperti gelembung gas, asap, dan perubahan warna. Limbah yang bereaksi dengan air sehingga menimbulkan ledakan atau menghasilkan gas, uap, atau asap, juga termasuk dalam kategori ini. Sifat reaktif dapat diketahui tanpa pengujian laboratorium. *Metode 1050 – United States Environmental Protection Agency (US-EPA): Test Methods to Determine Substances Likely to Spontaneously Combust* digunakan untuk menguji padatan piroforik, yang menyala spontan saat diuji sesuai prosedur metode ini. Pengapian ditandai oleh asap, nyala api, atau pijaran.

d) Korosif

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran X, limbah B3 yang korosif memiliki salah satu atau lebih sifat berikut: pH kurang dari atau sama dengan 2 untuk limbah asam dan lebih dari atau sama dengan 12,5 untuk limbah basa. Uji korosif pada limbah padat dilakukan dengan mencampurkan limbah dengan air sesuai metode yang berlaku. Selain itu, limbah yang menyebabkan iritasi yang ditandai dengan kemerahan atau eritema dan pembengkakan atau edema juga dianggap korosif. Pengujian ini dilakukan pada hewan uji mencit dengan metode yang berlaku.

e) **Beracun**

Limbah B3 beracun ditentukan melalui uji TCLP, Uji Toksikologi LD₅₀, dan uji sub-kronis.

1. **Uji TCLP:** Limbah dikategorikan sebagai limbah B3 kategori 1 jika konsentrasi zat pencemar lebih besar dari TCLP-A sebagaimana tercantum dalam Lampiran XI Peraturan Pemerintah ini. Limbah dikategorikan sebagai limbah B3 kategori 2 jika konsentrasi zat pencemar sama dengan atau lebih kecil dari TCLP-A dan lebih besar dari TCLP-B.
2. **Uji Toksikologi LD₅₀:** Limbah dikategorikan sebagai limbah B3 kategori 1 jika nilai LD₅₀ oral 7 hari kurang dari atau sama dengan 50 mg/kg berat badan mencit. Limbah dikategorikan sebagai limbah B3 kategori 2 jika nilai LD₅₀ lebih dari 50 mg/kg dan kurang dari atau sama dengan 5000 mg/kg berat badan mencit. Nilai LD₅₀ diperoleh dari analisis probit pada hewan uji.
3. **Uji Toksikologi Sub-Kronis:** Limbah dikategorikan sebagai limbah B3 kategori 2 jika uji sub-kronis selama 90 hari pada mencit menunjukkan sifat racun sub-kronis, berdasarkan pengamatan terhadap pertumbuhan, akumulasi, biokonsentrasi, studi perilaku, dan/atau histopatologis.

Sistem kontrol mutu dan jaminan mutu dalam pelaksanaan uji karakteristik di antaranya:

- a. Gunakan alat yang bebas kontaminan.
- b. Dikerjakan oleh analis yang kompeten.
- c. Gunakan termometer dan seluruh alat yang terkalibrasi atau terverifikasi.
- d. Pastikan proses analisis seluruh uji karakteristik berlangsung bertingkat secara perlahan dengan memverifikasi fungsi regulator pemanas secara berkala

Sedangkan untuk pengendalian mutu yaitu:

- a. Lakukan uji terhadap bahan yang sudah diketahui batas standar untuk masing-masing parameter uji karakteristik.
- b. Lakukan preparasi duplo untuk kontrol ketelitian analisis. Perbedaan hasil analisis duplo adalah lebih kecil atau sama dengan 10%.

3.8. Metode Pengolahan Data

Pada penelitian ini data yang diperoleh dari analisis laboratorium dan efisiensi ekonomi merupakan landasan utama dalam studi ini. Proses pengolahan data dimulai dengan penggunaan teknik statistik dan perangkat lunak khusus untuk menganalisis karakteristik kimia dan fisik *sludge*, serta efisiensi ekonomi yang terkait. Statistik deskriptif digunakan untuk merangkum data dalam bentuk yang lebih terstruktur, sementara statistik inferensial membantu dalam membuat generalisasi terhadap populasi yang lebih besar.

Selanjutnya, dilakukan analisis korelasi dan regresi untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi hubungan antara berbagai variabel yang diuji. Interpretasi hasil ini merupakan tahap akhir yang krusial dalam menyimpulkan dampak praktis dari penelitian ini terhadap berbagai sektor ekonomi dan lingkungan.

Secara keseluruhan, proses pengolahan data ini tidak hanya menghasilkan informasi yang bermanfaat, tetapi juga memungkinkan pemahaman yang lebih dalam tentang potensi penggunaan sisa-sisa industri dalam mendukung keberlanjutan dan efisiensi ekonomi yang berkelanjutan. Lebih lanjut terkait alur pengujian dan proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Alur pengujian dan analisis penelitian

BAB IV

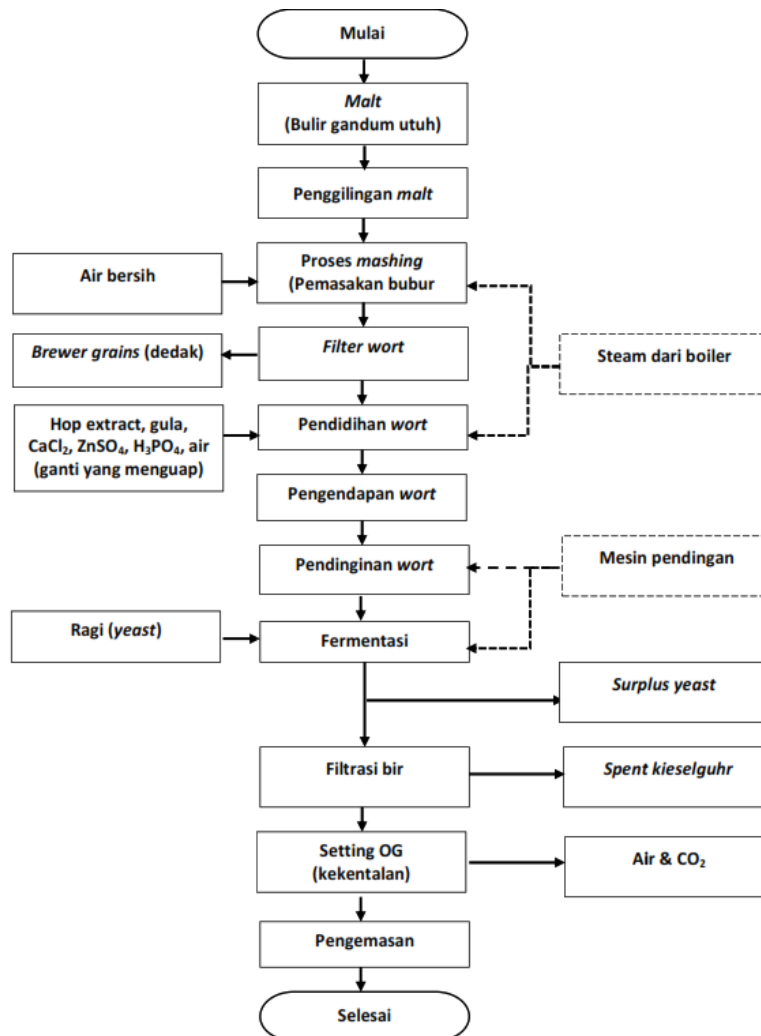
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. GAMBARAN UMUM PRODUKSI

Proses kegiatan produksi khususnya dalam Industri Pengolahan Minuman Fermentasi Gandum diuraikan meliputi proses kegiatan utama (produksi) dan proses lain mendukung proses produksi tersebut yang diuraikan sebagai berikut (Black, K., & Walker, G., 2023).

4.1.1. Proses Kegiatan Utama (Produksi)

Kegiatan operasional produksi dimulai dengan penerimaan bahan baku dan bahan penolong dari *supplier*, kemudian disimpan di gudang dengan perlakuan



Gambar 4. 1 Diagram alur proses produksi

Sumber: Olahan data peneliti

tertentu untuk masing-masing jenis bahan setelah memenuhi kualitas standar perusahaan. Diagram alir proses produksi ditampilkan pada gambar Gambar 4. 1.

a. Penyediaan Bahan Baku *Malt* (Bulir Gandum Utuh)

Malt adalah bulir gandum utuh yang disimpan di dalam silo. Proses penyimpanan secara otomatis ditransfer dari kontainer melalui elevator dan pipa penyaluran ke dalam silo.

b. Penggilingan *Malt*

Sebelum dilakukan proses penggilingan, *malt* dari silo masing-masing dibersihkan terlebih dahulu untuk menghilangkan debu, kotoran, dan benda berbahaya, seperti batu dan logam. *Malt* digiling beserta sekamnya dengan *Malt Mill*. Penggilingan bertujuan untuk memperkecil ukuran menjadi fraksi-fraksi tertentu, serta memudahkan kerja enzim-enzim selama proses.

c. Proses *Mashing*

Proses *Mashing* (pemasakan) bertujuan untuk mendapatkan ekstrak yang sebanyak-banyaknya, yaitu dari proses hidrolisis karbohidrat dan protein dari tepung malt sehingga diperoleh suatu larutan berkadar ekstrak tinggi yang disebut wort. Wort terdiri atas gula, protein, dan kandungan zat lain yang berasal dari malt (Black., & Walker, 2023). Proses pemasakan berlangsung ada satu buah bejana pemasakan, yaitu *mash tun* dengan menggunakan metode difusi. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Campuran malt dan air bersuhu 58°C dimasukkan ke dalam mash tun dan dibiarkan pada angka suhu tersebut selama 35 menit, selanjutnya angka suhu dinaikkan menjadi 64°C
- 2) Tahan angka suhu pada 64°C selama 5 menit, kemudian tingkatkan suhu hingga 77°C . Setelah itu, langsung transfer ke Filtrasi Wort.

d. Proses *Filter Wort*

Proses ini bertujuan untuk memisahkan ekstrak hasil proses mashing dari ampasnya yang kemudian dihasilkan wort jernih sesuai standar. Proses ini berlangsung sebagai berikut:

- 1) Filtrasi ekstrak utama, pada proses ini dapat berlangsung dari awal filtrasi dimulai hingga saat pembilasan ekstrak.

2) Pembilasan dilakukan dengan air panas bersuhu 76OC dan sisa ekstrak dengan kondisi banyak tersisa di filter media akan terbilas dan turut dialirkan ke wort copper. Filtrasi dianggap selesai apabila sisa kadar ekstrak mempunyai nilai 1^{Op} (Plato). Derajat Plato menyatakan besaran persentase kadar gula dalam 1 gram wort.

e. Pendidihan *Wort*

Proses pendidihan wort menyebabkan perubahan struktur atau komposisi kimia dari wort. Pendidihan wort dilakukan dalam *wort copper* yang bertujuan untuk mensterilkan wort, mengekstraksi flavor dari hop dan pemanasan wort, mengeluarkan zat-zat volatil yang tidak diinginkan, terutama dimetil sulfide (DMS) dan mengkoagulasikan sebagian protein. Pada pendidihan wort ini ditambahkan hop dan gula untuk memberikan aroma.

f. Pengendapan

Setelah dididihkan, wort dipompakan ke dalam whirlpool untuk mengendapkan protein yang telah terkoagulasi pada waktu pendidihan. Whirlpool merupakan suatu bejana dengan pipa masukan menempel pada bagian dalam dinding whirlpool membentuk sudut tertentu sehingga aliran wort yang masuk akan membentuk arah tangensial terhadap dinding bejana dan dihasilkan gaya sentrifugal. Gaya sentrifugal ini akan membantu mengendapkan gumpalan protein dan kotoran lain dalam wort sehingga akan mengumpul dan mengendap pada bagian tengah dasar whirlpool. Endapan ini disebut trub. Pengendapan berlangsung selama 15 menit (Black., & Walker, 2023).

g. Pendinginan

Wort dari whirlpool dengan suhu 98°C dilewatkan pada suatu *heat exchanger* untuk menurunkan temperatur wort tersebut. *Heat exchanger* ini menggunakan dua sistem pendingin, yaitu pendingin air dan pendingin alkohol-water. Wort yang keluar dari pendingin ini akan turun temperaturnya menjadi sekitar 7,5°C. Temperatur wort ini merupakan temperatur yang optimal untuk proses fermentasi yang digunakan untuk pembuatan.

h. Fermentasi

Minuman fermentasi merupakan perubahan zat gula di dalam wort menjadi alkohol CO₂, energi, dan zat lainnya terutama zat organoleptik yang menimbulkan aroma dan rasa yang khas oleh hasil metabolisme ragi. Fermentasi dilakukan pada tangki fermentasi yang dilengkapi dengan sistem pendingin, pipa pengeluaran CO₂, termometer dan manometer (Aung & Kim, 2023). Proses fermentasi wort menjadi minuman melalui dua tahapan proses, yaitu:

1) Tahap fermentasi utama

Suatu tahap proses dimana ragi sangat efektif mengubah ekstrak gula menjadi alkohol dan CO₂. Tahap ini berlangsung selama 1 minggu dengan suhu dipertahankan sekitar 10°C. CO₂ yang dihasilkan dari proses fermentasi dilarikan ke CO₂ plant bagian utilitas. Minuman fermentasi yang dihasilkan dari tahap ini belum matang karena rasa dan aromanya masih harus ditingkatkan lagi.

2) Tahap pemeraman (tahap ruh dan *conditioning*)

Pada tahap ini terjadi proses pematangan yang membutuhkan waktu 1 minggu. Pada tahap ruh diperlukan temperatur 13°C dan *conditioning* 0°C. Tahap ruh berlangsung selama 4 hari dan sisanya untuk *conditioning*. Apabila temperatur telah mencapai 0°C, sebagian ragi akan mengendap dan endapan ragi dapat disimpan sebagai persiapan penggunaan selanjutnya. Ragi yang telah dipakai sebanyak 5-6 kali akan dibuang melalui proses hidrolisis, kemudian dikirim ke IPAL untuk proses pengolahan lebih lanjut.

i. Filtrasi

Pada bagian akhir proses fermentasi yang dihasilkan masih mengandung sisa-sisa ragi yang melayang-layang dan partikel halus lainnya (Aung & Kim, 2023). Untuk mendapatkan minuman fermentasi yang jernih dilakukan proses penyaringan. Jenis filter yang digunakan terdiri atas 2 unit, yaitu:

1) *Kieselguhr filter*

Filter ini berfungsi sebagai filter utama untuk proses penjernihan minuman. *Kieselguhr* adalah badan penyaring yang berupa bubuk halus dan terbuat dari diatomae yang secara fisik berbentuk seperti kapur. Filter

ini akan diganti setiap bulan sekali dan diperlakukan sebagai limbah padat non B3.

2) *PVPP filter*

Proses yang terjadi di PVPP filter adalah proses stabilisasi, bukan proses penjernihan. PVPP (*Poly Vinil Ply Pyrolidone*) merupakan senyawa polimer yang bentuk strukturnya mirip dengan senyawa protein sehingga sifat senyawa ini juga mirip dengan senyawa protein. Di antara sifat tersebut adalah kemampuan untuk menyerap atau mengikat senyawa poliphenol yang terdapat dalam minuman fermentasi yang dapat menyebabkan perubahan sifat fisik dari minuman fermentasi untuk jangka tertentu yang tidak diinginkan. Penggantian filter yang digunakan menyesuaikan standar hasil filtrasi dari perusahaan. Setelah proses filtrasi, minuman fermentasi dialihkan dan disimpan dalam tangki minuman fermentasi (BBT) dan kemudian siap dikemas.

j. *Setting OG (Kekentalan)*

Setting OG (Kekentalan) merupakan proses standardisasi supaya didapatkan parameter kualitas produk akhir yang dipersyaratkan. Proses ini berlangsung selama proses filtrasi minuman fermentasi dan dilakukan dengan menambahkan air berkarbonasi dan gas CO₂.

k. *Setting OG (Kekentalan)*

Pengemasan merupakan kegiatan dalam menyiapkan hasil produksi dalam bentuk yang siap dipasarkan. Kegiatan pengemasan meliputi pencucian botol, pengisian dan penutupan botol, pasteurisasi, pemasangan label, dan pengepakan.

4.1.2. Proses Kegiatan Pendukung

Proses kegiatan pendukung meliputi pencucian dan pasteurisasi, boiler, cooling, pencucian lantai, laboratorium (domestik), penyiraman lahan dan tanaman (Black., & Walker, 2023).

1) *Pencucian Peralatan*

Proses pencucian dilakukan untuk memastikan bahwa semua peralatan dan bahan yang digunakan dalam fermentasi bebas dari kontaminasi. Tahap ini melibatkan pembersihan menyeluruh terhadap wadah

fermentasi, pipa, peralatan lainnya menggunakan deterjen khusus yang dapat menghilangkan kotoran, residu organik, dan mikroorganisme yang menempel. Setelah pembersihan menggunakan deterjen, peralatan kemudian dibilas dengan air bersih untuk memastikan tidak ada sisa deterjen yang tertinggal, karena residu deterjen dapat mempengaruhi proses fermentasi dan rasa produk akhir.

2) Boiler

Boiler bertujuan untuk penyediaan uap untuk berbagai kebutuhan proses produksi, salah satunya untuk sterilisasi peralatan dan wadah fermentasi. Sterilisasi dengan uap sangat efektif untuk membunuh mikroorganisme yang tidak diinginkan, sehingga memastikan lingkungan yang bebas dari kontaminasi. Selain sterilisasi, uap dari boiler juga digunakan untuk pemanasan langsung atau tidak langsung dalam proses pembuatan minuman. Misalnya dalam pasteurisasi, uap digunakan untuk memanaskan minuman sehingga suhu tertentu dapat membunuh patogen tanpa merusak kualitas produk. Uap juga dapat digunakan untuk mengontrol suhu dalam tangki fermentasi, karena suhu yang tepat sangat penting untuk fermentasi yang optimal.

3) Cooling

Proses pendinginan dalam industri fermentasi minuman sangat penting untuk mengontrol suhu selama fermentasi, menstabilkan produk setelah fermentasi, dan mempersiapkan minuman untuk penyimpanan dan pengemasan. Pendinginan memastikan aktivitas mikroorganisme berjalan optimal, mencegah perkembangan senyawa yang tidak diinginkan, dan memperpanjang umur simpan produk. Sistem pendinginan, seperti jaket pendingin atau sistem sirkulasi cairan, digunakan untuk menjaga suhu yang tepat, yang sangat penting untuk konsistensi dan kualitas minuman fermentasi.

4) Laboratorium

Laboratorium dalam industri fermentasi minuman berperan krusial dalam memastikan kualitas dan keamanan produk melalui pengujian dan analisis. Di laboratorium, berbagai sampel bahan baku, produk setengah

jadi, dan produk akhir dianalisis untuk mengukur parameter seperti pH, kandungan alkohol, kadar gula, dan mikrobiologi. Pengujian ini membantu dalam memantau proses fermentasi, mendeteksi kontaminasi, dan memastikan bahwa produk akhir memenuhi standar kualitas dan regulasi yang ketat. Laboratorium juga sering terlibat dalam penelitian dan pengembangan untuk inovasi produk dan peningkatan efisiensi proses produksi.

5) Domestik Karyawan

Domestik karyawan dalam industri fermentasi minuman mencakup pekerja yang bertanggung jawab atas berbagai tugas pendukung operasional sehari-hari, seperti pembersihan fasilitas, sanitasi peralatan, dan pemeliharaan kebersihan lingkungan kerja. Mereka memastikan bahwa area produksi tetap bersih dan higienis, yang sangat penting untuk mencegah kontaminasi dan menjamin kualitas serta keamanan produk fermentasi. Selain itu, domestik karyawan juga dapat membantu dalam pengelolaan logistik internal dan pengaturan material, mendukung kelancaran proses produksi secara keseluruhan.

6) Pencucian Lantai

Pencucian lantai dalam industri fermentasi minuman adalah proses penting untuk menjaga kebersihan dan higienitas lingkungan produksi. Lantai di area produksi harus dibersihkan secara rutin menggunakan metode yang efektif untuk menghilangkan residu cairan, tumpahan bahan baku, dan kontaminan mikroba. Proses ini biasanya melibatkan penggunaan deterjen khusus dan disinfektan yang mampu membunuh bakteri dan mikroorganisme lain. Pencucian lantai yang baik membantu mencegah risiko kontaminasi produk, menjaga keselamatan kerja karyawan, dan mematuhi standar kebersihan industri yang ketat.

4.2. BAHAN DAN PENGUJIAN

4.2.1. Bahan Baku dan Bahan Penolong

Kapasitas produksi yang direncanakan, yaitu sebesar 1.800.375 hektoliter/tahun atau sekitar 492.480 kg/hari. Sifat produk yang dihasilkan merupakan bahan jadi dengan sistem distribusi produk menggunakan truk sebagai alat angkut. Adapun jenis bahan baku dan bahan penolong yang digunakan selama kegiatan operasional dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Jenis bahan baku dan bahan penolong proses produksi

No	Nama Bahan	Jumlah	Satuan	Bentuk	Sifat
Bahan Baku					
1	Malt	24.997,68	kg/hari	Padat	Non B3
2	Air	1.261	kg/hari	Cair	Non B3
3	Gula	8.521,20	kg/hari	Cair	Non B3
4	Hop Extract	6,19	kg/hari	Cair	Non B3
5	Ragi (Yeast*)	0,04	kg/hari	Pasta	Non B3
Bahan Penolong					
1	CaCl ₂	54,29	kg/hari	Padat	Non B3
2	ZnSO ₄	0,53	kg/hari	Cair	Non B3
3	H ₃ PO ₄	27,79	kg/hari	Cair	Non B3
4	CO ₂ Karbonasi	8.363,52	kg/hari	Cair	Non B3
Bahan Kemas					
1	Botol kaca 330 ml	93.381	kg/hari	Padat	Non B3
2	Botol kaca 620 ml	95.003	kg/hari	Padat	Non B3
3	Tutup botol	1.366	kg/hari	Padat	Non B3
4	Kardus dan Partisi	4.515	kg/hari	Padat	Non B3
5	Krat plastik	33.981	kg/hari	Padat	Non B3
6	Barrel aluminium	936	kg/hari	Padat	Non B3

(Sumber: Observasi Lapangan Peneliti, 2024)

Sumber dan karakteristik air limbah berdasarkan uraian mengenai proses kegiatan utama dan kegiatan pendukung serta jenis bahan baku dan bahan penolong maka dapat diketahui sumber dan karakteristik air limbah yang diuraikan pada Tabel 4. 2.

Tabel 4. 2 Identifikasi Sumber dan Karakteristik Air Limbah

No.	Sumber	Potensi Timbulan	Karakteristik
1.	Produksi	Air limbah dari proses fermentasi yang mengandung sisa bahan organik, gula, alkohol, dan potensi senyawa kimia dari bahan baku.	Padatan terlarut, kimia organik, mikroorganisme
2.	Pencucian Peralatan	Air bilasan dari pembersihan peralatan produksi yang mengandung residu produk fermentasi, bahan pembersih, dan kemungkinan logam berat dari peralatan.	Padatan tersuspensi, kimia organik, bahan kimia pembersih, potensi logam berat
3.	Boiler	Air blowdown dan air kondensat dari sistem boiler yang mengandung garam terlarut, bahan kimia antiskalant, dan potensi logam berat dari korosi.	Padatan terlarut, suhu tinggi, bahan kimia pengolahan air, potensi logam berat
4.	Cooling	Air dari sistem pendingin yang mencakup air sirkulasi dan blowdown, mengandung bahan kimia pengkondisi air, garam terlarut, dan kemungkinan kontaminasi logam berat.	Padatan terlarut, bahan kimia pengolahan air, potensi logam berat
5.	Laboratorium	Sisa air pencucian dari peralatan laboratorium yang tidak mengandung bahan berbahaya beracun (non-B3) tetapi dapat mengandung sisa bahan kimia penelitian dalam jumlah kecil.	Kimia organik ringan, sedikit asam atau netral, potensi bahan kimia penelitian
6.	Domestik Karyawan	Air limbah dari fasilitas karyawan seperti toilet, kantin, dan area istirahat yang mengandung bahan organik, nutrien, dan zat pembersih rumah tangga.	Padatan tersuspensi, kimia organik, mikroorganisme, nutrien, bahan kimia rumah tangga
7.	Pencucian Lantai	Air bilasan dari pembersihan lantai area produksi yang mengandung residu produk, bahan pembersih, dan potensi kontaminasi dari material di lantai.	Padatan tersuspensi, kimia organik, bahan kimia pembersih, potensi logam berat

(Sumber: Observasi Lapangan Peneliti, 2024)

4.2.2. Pelaksanaan Pengambilan Contoh Uji

Pelaksanaan pengambilan contoh uji dilaksanakan pada tanggal xx yang berlokasi disalah satu industri fermentasi minuman di Kota Tangerang. Metode pengambilan contoh uji mengacu pada SNI 8520:2018 Cara Pengambilan Contoh Uji Limbah B3 Padat.



Gambar 4. 2 Dokumentasi Pengambilan Contoh Uji

Selanjutnya, *sludge* dikemas dan dilakukan kegiatan pengemasan menggunakan sekop dan dimasukkan kedalam karung-karung. Jumlah uji yang diambil adalah 4 sampel dengan masing-masing 1 wadah berisi 500 g *sludge* yang merupakan 1 sampel yang sama antara wadah sampel yang satu dengan yang lainnya. Sampel yang diambil di bagian akhir merupakan sampel yang akan dimanfaatkan untuk pembuatan pupuk tanaman. Berikut merupakan wadah yang digunakan untuk hasil pengambilan contoh uji.



Gambar 4. 3 Proses pengemasan hasil contoh uji

Setelah dilakukan pengemasan, tahap selanjutnya adalah pengiriman dimana sebelum pengiriman sampel sudah diberikan label nama contoh, kemudian tutup wadah terdiri dari 2 bagian yakni tutup dalam dan tutup luar, selain itu juga ditambahkan aluminium foil untuk mengurangi penguapan.

4.2.3. Hasil Uji Sampel di Laboratorium

Sampel contoh uji *sludge* yang sudah diambil kemudian diuji oleh Laboratorium Terakreditasi KAN dan Teregistrasi sebagai Laboratorium di KLHK meliputi uji karakteristik, pengujian *Lethal Dose 50 (LD₅₀)*, dan *Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)* yang diuraikan berurutan sebagai berikut.

a. Hasil Uji Karakteristik

Hasil uji karakteristik dari hasil *sludge* IPAL dari industri pengolahan minuman fermentasi meliputi parameter mudah meledak, mudah menyala, reaktif, dan korosif disajikan pada Tabel 4. 3.

Tabel 4. 3 Hasil uji karakteristik

No	Kode Sample	Parameter Uji*	Hasil	Metode Pengukuran
1	<i>Sludge</i> WWTP	Mudah Meledak	Tidak Mudah Meledak	ASTM D93-10
		Mudah Nyala	Tidak Mudah Nyala	Method 1030 EPA
		Reaktif	Tidak Reaktif	Method 1050 EPA
		Korosif	Tidak Korosif	18-AAS-154/MU/SMM-AAS

Keterangan: *) PP No. 22 Tahun 2021 – Lampiran X

Data uji karakteristik limbah *sludge* dari IPAL industri pengolahan minuman fermentasi memberikan gambaran yang penting tentang sifat limbah tersebut dalam konteks keamanan lingkungan. Berdasarkan hasil uji ASTM D93-10, limbah ini tidak mudah meledak, menunjukkan bahwa risiko kebakaran akibat meledaknya limbah tersebut sangat rendah. Selanjutnya, hasil uji menggunakan Method 1030 EPA menunjukkan bahwa limbah ini juga tidak mudah nyala, yang menegaskan bahwa kemungkinan terjadinya kebakaran secara spontan dari limbah tersebut sangat minim. Dalam hal reaktivitas, berdasarkan Method 1050 EPA, limbah ini dinyatakan tidak reaktif, artinya tidak cenderung menghasilkan gas berbahaya atau panas yang berlebihan saat berinteraksi dengan bahan kimia

lainnya atau lingkungan sekitar. Selain itu, limbah ini juga dinilai tidak korosif berdasarkan 18-AAS-154/MU/SMM-AAS, yang menunjukkan bahwa limbah ini tidak akan merusak atau menghancurkan bahan lain yang bersentuhan langsung dengannya.

Hasil uji ini memiliki implikasi penting dalam pengelolaan limbah industri minuman fermentasi, karena memberikan dasar yang kuat untuk merancang strategi pengelolaan limbah yang aman dan efektif. Dengan mengetahui bahwa limbah ini tidak memiliki sifat mudah meledak, mudah nyala, reaktif, atau korosif, pihak industri dapat mengambil langkah-langkah preventif yang sesuai untuk mengurangi risiko lingkungan dan kesehatan manusia. Implementasi regulasi seperti yang diatur dalam PP No. 22 Tahun 2021 akan memastikan bahwa pengelolaan limbah B3 ini mematuhi standar keamanan dan lingkungan yang berlaku, sehingga mampu menjaga keberlanjutan operasional industri tanpa mengorbankan kelestarian lingkungan sekitar.

b. Uji TCLP

Pengujian *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) meliputi parameter anorganik, anion, organik, pestisida, dan parameter tambahan sesuai dengan PP No. 22 Tahun 2021-Lampiran XI Baku Mutu Karakteristik Beracun melalui TCLP untuk Penetapan Kategori Limbah B3.

Tabel 4. 4 Hasil uji TCLP

No.	Parameter	Hasil (mg/L)	Baku Mutu	
			TCLP-A (mg/L)	TCLP-B (mg/L)
A	Anorganik			
1	Antimoni, Sb	<0,20	6	1
2	Arsen, As	<0,02	3	0,5
3	Barium, Ba	<0,50	210	35
4	Berilium, Be	<0,02	4	0,5
5	Boron, B	<0,20	150	25
6	Kadmium, Cd	<0,02	0,9	0,15
7	Krom valensi enam, Cr ⁶⁺	<0,05	15	2,5
8	Tembaga, Cu	<0,02	60	10
9	Timbal, Pb	<0,02	3	0,5
10	Merkuri, Hg	<0,00005	0,3	0,05
11	Molibdenum	<0,02	21	3,5
12	Nikel, Ni	<0,02	21	3,5
13	Seleinum, Se	<0,20	3	0,5
14	Perak, Ag	<0,02	40	5
15	<i>Tributyltin oxide</i>	<0,02	0,4	0,05

No.	Parameter	Hasil (mg/L)	Baku Mutu	
			TCLP-A (mg/L)	TCLP-B (mg/L)
16	Seng, Zn	0,15	300	50
B.	Anion			
17	Klorida, Cl ⁻	14	7500	12500
18	Sianida (total), CN ⁻	<0,005	21	3,5
19	Flourida, F ⁻	1,39	450	75
20	Iodida, I ⁻	<0,1	40	5
21	Nitrat, NO ₃ ⁻	1,13	15000	2500
22	Nitrit, NO ₂ ⁻	0,103	900	150
B.	Organik			
23	Benzena	<0,05	3	0,5
24	Benzo(a)pirena	<0,00005	0,004	0,0005
25	Karbon tetraklorida	<0,005	1,2	0,2
26	Klorobenzena	<0,005	120	0,2
27	Klorofom	<0,02	24	3
28	2 Klorofenol	0,005	120	5
29	Kresol (total)	<0,01	800	100
30	Di (2 etilheksil) ftalat	<0,05	2,4	0,4
31	1,2-Diklorobenzena	<0,005	300	50
32	1,4-Diklorobenzena	<0,005	90	15
33	1,2-Diikloroetana	<0,005	15	2,5
34	1,1-Diikloroetana	<0,005	12	3
35	1-2-Diikloroetana	<0,005	15	2,5
36	Diklorometana (metilen klorida)	<0,005	6	1
37	2,4-Diklorofenol	<0,005	80	10
38	2,4-Dinitrotoluena	<0,010	0,52	0,065
39	Etilbenzena	<0,005	90	15
40	Ethylene diamine tetra acetic acid (EDTA)	<5	180	30
41	Formaldehida	<0,5	200	25
42	Heksaklorobutadiena	<0,005	0,18	0,03
43	Metil etik keton	<0,05	800	100
44	Nitrobenzena	<0,005	8	1
45	Fenol (total, non-terhalogenasi)	<0,005	56	7
46	Stirena	<0,005	6	1
47	1,1,1,2-Tetrakloroetana	<0,005	40	4
48	1,1,2,2-Tetrakloroetana	<0,005	5,2	0,65
49	Tetrakloroetana	<0,005	20	2,5
50	Toluena	<0,005	210	35
51	Triklorobenzena (total)	<0,005	12	1,5
52	1,1,1-Trikloroetana	<0,005	120	15
53	1,1,2-Trikloroetana	<0,005	4,8	0,6
54	Trikloroetana	<0,005	2	0,25
55	2,4,5-Triklorofenol	<0,005	1600	200
56	2,4,6-Triklorofenol	<0,005	8	1
57	Vinil klorida	<0,01	0,12	0,015
58	Ksilena (total)	<0,01	150	25
C.	Pestisida			
59	Aldrin + dieldrin	<0,0005	0,009	0,0015
60	DDT + DDD + DDE	<0,005	0,3	0,005
61	2,4-D	<0,01	9	1,5
62	Klordana	<0,005	0,06	0,01
63	Heptaklor	<0,005	0,12	0,015
64	Lindana	<0,005	0,6	0,1

No.	Parameter	Hasil (mg/L)	Baku Mutu	
			TCLP-A (mg/L)	TCLP-B (mg/L)
65	Metoksiklor	<0,005	6	1
66	Pentaklorofenol	<0,005	2,7	0,45
D.	Parameter Tambahan			
67	Endrin	<0,005	0,12	0,02
68	Heksaklorobenzena	<0,01	0,8	0,13
69	Heksakloroetana	<0,005	18	3
70	Pridina	<0,02	30	5
71	Toksafena	<0,02	3	0,5
72	2,4,5-TP (Silvex)	<0,01	6	1

(Sumber: Data Hasil Uji Laboratorium, 2024)

c. Hasil Uji LD₅₀

Pengujian LD₅₀ sesuai dengan PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran X – Parameter Uji Karakteristik Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, dalam hal ini uji LD₅₀ *sludge* IPAL industri pengolahan minuman fermentasi gandum ditampilkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil Uji LD50

No.	Parameter	Satuan	Baku Mutu*	Kategori	Hasil
1	LD ₅₀	mg/kgBB	LD ₅₀ ≤ 50 ^{a)}	Kategori 1	> 5.000
			50 < LD ₅₀ ≤ 5.000 ^{b)}	Kategori 1	
			LD ₅₀ > 5.000 ^{c)}	Limbah Tidak Berbahaya dan Tidak Beracun (nonB3)	

(Sumber: Data Hasil Uji Laboratorium, 2024)

4.2.4. Evaluasi Hasil Uji

Berdasarkan data yang diperoleh dari analisa yang dilakukan oleh Laboratorium tentang hasil uji karakteristik contoh uji, disimpulkan bahwa tidak adanya indikasi karakteristik dimana hasil uji pada masing-masing parameter uji yaitu tidak mudah meledak, tidak mudah nyala, tidak reaktif, dan tidak korosif pada *sludge* IPAL hasil produk samping yang dihasilkan oleh industri pengolahan minuman fermentasi gandum.

Berdasarkan nilai baku untuk identifikasi TCLP berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran X tentang Parameter Uji Karakteristik Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun diketahui kriteria sebagai berikut:

- 1) Limbah diidentifikasi sebagai Limbah B3 kategori 1 (satu) jika Limbah memiliki konsentrasi zat pencemar lebih besar dari TCLP-A sebagaimana tercantum dalam Lampiran XI.
- 2) Limbah diidentifikasi sebagai Limbah B3 kategori 2 (dua) jika Limbah memiliki konsentrasi zat pencemar sama dengan atau lebih kecil dari TCLP-A dan lebih besar dari TCLP-B sebagaimana tercantum dalam Lampiran XI .

Dengan demikian maka dapat dinyatakan bahwa hasil uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) dari limbah industri pengolahan minuman fermentasi gandum yang berupa *sludge* masih memenuhi baku mutu dan tidak termasuk kategori TCLP-A dan TCLP-B. Karakteristik beracun melalui TCLP untuk menentukan Limbah yang diuji memiliki konsentrasi zat pencemar lebih kecil dari atau sama dengan konsentrasi zat pencemar pada kolom TCLP-A dan memiliki konsentrasi zat pencemar lebih besar dari konsentrasi zat pencemar pada kolom TCLP-B (Hidayah, 2023).

Pada umumnya, semakin kecil nilai LD₅₀, semakin toksik senyawa tersebut. Demikian juga sebaliknya, semakin besar nilai LD₅₀, semakin rendah toksisitasnya. Potensi ketoksikan akut senyawa pada hewan coba dibagi menjadi beberapa kelas, pada Tabel 4. 6.

Tabel 4. 6 Kelas Ketoksikan LD₅₀

No	Class	LD ₅₀ (mg/KgBB)
1	Super Toxic	Less than 5 mg/kg
2	Extremely Toxic	5-50 mg/kg
3	Very Toxix	50-500 mg/kg
4	Moderately Toxic	0.5-5 g/kg
5	Slightly Toxic	5-15g/kg

Sumber: EHS Cornell (diakses Juni 2024)

Berdasarkan hasil uji laboratorium untuk parameter LD₅₀ pada *sludge*, diperoleh hasil LD >5.000 g/kgBB, yang menunjukkan bahwa limbah dari proses produksi (*sludge*) industri fermentasi gandum ini adalah limbah non-hazardous and non-toxic materials waste. Hal ini didasarkan pada fakta lapangan sesuai hasil pengujian sampel yang menunjukkan bahwa *sludge* yang dianalisis tidak berpotensi

toksik, karena termasuk kelas *Slightly Toxic*, yakni lebih dari 5.000 mg/kgBB. Karakteristik beracun melalui Uji Toksikologi LD₅₀ untuk menentukan Limbah yang diuji memiliki nilai Uji Toksikologi LD₅₀ lebih kecil dari atau sama dengan 50 mg/kg (Hidayah, 2023).

Efek toksik umumnya merupakan hasil dari serangkaian proses fisik, biokimia, dan biologis yang kompleks. Proses-proses ini biasanya dikelompokkan ke dalam tiga fase: fase eksposisi, fase toksikokinetik, dan fase toksikodinamik. Fase eksposisi melibatkan kontak organisme dengan xenobiotik/racun, di mana efek toksik/farmakologis biasanya terjadi hanya setelah xenobiotik diserap, kecuali dalam kasus zat radioaktif (Haryanto *et al*, 2023).

Fase toksikokinetik adalah fase di mana xenobiotik diserap dan didistribusikan oleh aliran darah ke seluruh tubuh, termasuk tempat target zat beracun, sementara beberapa molekul xenobiotik diekskresikan melalui sistem ekskresi. Fase toksikodinamik melibatkan interaksi antara toksin dan reseptor (tempat kerja zat toksik) dan proses-proses terkait yang pada akhirnya menghasilkan efek toksik/farmakologis (Wirasuta dan Niruri, 2006).

Pengujian toksisitas subkronis atau pengujian toksisitas jangka pendek yang melibatkan pemberian zat berulang kali, biasanya setiap hari atau dengan interval dua hari setiap minggu, untuk durasi sekitar 10% dari masa hidup hewan, yaitu sekitar 3 bulan untuk tikus. Pengujian toksisitas subkronis didasarkan pada hasil pengujian toksisitas akut. Hal ini perlu dilakukan untuk menilai potensi efek berbahaya dari paparan jangka panjang terhadap suatu zat, mengidentifikasi efek kronis dan kumulatif yang mungkin tidak terlihat dalam uji toksisitas akut, serta menetapkan batas paparan yang aman bagi manusia dan lingkungan. Dalam konteks penggunaan *sludge* sebagai pupuk organik, uji ini memastikan keamanan produk dalam jangka panjang dan mendukung regulasi yang tepat. Dengan demikian, uji toksisitas subkronis adalah langkah penting untuk memastikan bahwa *sludge* aman digunakan secara berkelanjutan tanpa menimbulkan risiko kesehatan mengingat aplikasi dari *sludge* ini dilakukan pada lahan pertanian.

4.3. EFISIENSI PEMANFAATAN *SLUDGE* IPAL

Efisiensi pemanfaatan *sludge* IPAL dari aktivitas industri pengolahan minuman fermentasi gandum diuraikan meliputi potensi pemanfaatan *sludge* IPAL, biaya pengelolaan limbah B3 jika dikategori sebagai limbah B3, dan biaya efisiensi pemanfaatan limbah B3 menjadi limbah non-B3.

4.3.1. Potensi Pemanfaatan *Sludge* IPAL sebagai Pupuk Organik

Pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai kompos dalam mengacu pada SNI 19-7030-2004 tentang Spesifikasi Kompos dari Sampah Organik Domestik untuk Memenuhi Mutu Produk Kompos yang Berfungsi Melindungi Konsumen dan Mencegah Pencemaran Lingkungan. Standar ini saat digunakan sebagai acuan bagi produsen kompos dalam memproduksi kompos (Rulkens, 2008).

Sludge memiliki kandungan makro (N, P, K, Ca dan Mg) serta unsur hara mikro (Cu, Mn, Zn dan Fe) yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber unsur hara tanaman dengan cara difermentasi serta dicampur bahan lain menjadi Pupuk Kompos *Sludge* (Lestari, 2022). Limbah *sludge* lumpur aktif memiliki kandungan bahan organik tinggi yang berasal dari mikroorganisme dan nutrisi, berpeluang dimanfaatkan sebagai bahan baku pupuk organik dengan bantuan larva *Black Soldier Fly* (BSF) yang sebelumnya telah terbukti mampu menguraikan bahan organik (*biowaste*) dengan sangat baik (Handayani, 2021).

Identifikasi potensi pemanfaatan limbah *sludge* lumpur aktif menjadi pupuk organik cair dan pupuk organik padat melalui uji karakteristik bahan. Nilai potensi bahan organik dilakukan dengan analisis proksimat, kadar Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K). Berdasarkan hasil penelitian uji laboratorium *sludge* IPAL tidak memiliki kandungan berbahaya, maka pemanfaatannya sebagai kompos dapat menjadi pilihan yang sangat menguntungkan. Berikut adalah uraian lebih lanjut tentang potensi dan manfaatnya:

a. Peningkatan Kesuburan Tanah

Tanpa adanya kandungan berbahaya, *sludge* IPAL dapat langsung digunakan sebagai bahan baku kompos yang kaya akan bahan organik. Ini akan meningkatkan kesuburan tanah dengan memperbaiki struktur tanah,

meningkatkan kapasitas penahan air, dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang bermanfaat.

b. Sumber Nutrisi Makro dan Mikro

Sludge IPAL yang aman dapat menjadi sumber nutrisi penting bagi tanaman, termasuk nitrogen, fosfor, dan kalium, serta unsur mikro seperti besi, mangan, dan zinc. Nutrisi ini diperlukan untuk pertumbuhan tanaman yang sehat dan produktif, sehingga kompos dari *sludge* IPAL dapat menjadi alternatif yang efektif untuk pupuk kimia.

c. Pengurangan Limbah dan Efisiensi Pengelolaan Limbah

Mengolah *sludge* IPAL menjadi kompos akan mengurangi volume limbah yang harus diolah atau dibuang. Ini akan mengurangi tekanan pada sistem pembuangan akhir dan mengurangi biaya pengelolaan limbah bagi industri. Selain itu, ini membantu mengurangi dampak lingkungan negatif yang biasanya terkait dengan pembuangan *sludge*.

d. Manfaat Lingkungan dan Keberlanjutan

Pengomposan *sludge* IPAL mengurangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari metode pembuangan lainnya, seperti pembakaran atau penimbunan. Proses pengomposan yang benar, terutama secara aerobik, mengurangi produksi metana, gas rumah kaca yang kuat. Ini berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim dan mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan.

e. Pengurangan Ketergantungan pada Pupuk Kimia

Dengan menggunakan kompos dari *sludge* IPAL, petani dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia yang seringkali mahal dan berpotensi merusak tanah dalam jangka panjang. Kompos alami ini memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, serta menjaga kesehatan tanah dalam jangka panjang.

f. Dukungan untuk Ekonomi Sirkular

Pemanfaatan *sludge* IPAL yang aman sebagai kompos mendukung konsep ekonomi sirkular, di mana limbah dari proses industri diolah dan digunakan kembali dalam siklus produksi lain. Ini mengurangi limbah dan menciptakan nilai tambah dari material yang sebelumnya dianggap sebagai produk sampingan atau limbah.

4.3.2. Biaya Pengelolaan Limbah B3 jika dikategori sebagai Limbah B3

Pengelolaan *sludge* IPAL jika dikategori sebagai limbah B3 maka perlu dikelola oleh pihak Ketiga yang mana penanganannya harus sesuai dengan standar pengelolaan limbah B3. Berdasarkan penelusuran vendor pengangkut dan pengolah limbah B3, diketehai bahwa biaya pengangkutan sebesar Rp. 8.000.000 per 8 ton atau sama dengan Rp. 1.000 per kg. Sedangkan biaya pengolahan limbah B3 dengan range biaya Rp. 5.000 s.d. Rp. 15.000 per kg. Berdasarkan data jumlah timbulan limbah eksisting di lokasi kajian, maka dapat diuraikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Rincian Biaya Pengelolaan Limbah B3 selama 1 (satu) Tahun

Bulan	Jumlah Timbulan (kg)	Biaya pengangkutan (Rp1.000/kg)	Biaya Pengolahan Limbah B3		
			Rp5.000/kg	Rp10.000/kg	Rp15.000/kg
Januari	17.710	17.710.000	88.550.000	177.100.000	265.650.000
Februari	6.040	6.040.000	30.200.000	60.400.000	90.600.000
Maret	20.740	20.740.000	103.700.000	207.400.000	311.100.000
April	14.040	14.040.000	70.200.000	140.400.000	210.600.000
Mei	8.550	8.550.000	42.750.000	85.500.000	128.250.000
Juni	30.400	30.400.000	152.000.000	304.000.000	456.000.000
Juli	12.850	12.850.000	64.250.000	128.500.000	192.750.000
Agustus	29.820	29.820.000	149.100.000	298.200.000	447.300.000
September	43.850	43.850.000	219.250.000	438.500.000	657.750.000
Oktober	19.940	19.940.000	99.700.000	199.400.000	299.100.000
November	40.420	40.420.000	202.100.000	404.200.000	606.300.000
Desember	33.210	33.210.000	166.050.000	332.100.000	498.150.000
Jumlah	277.570	277.570.000	1.387.850.000	2.775.700.000	4.163.550.000
Rata-rata	23.131	23.130.833	115.654.167	231.308.333	346.962.500
Minimal	6.040	6.040.000	30.200.000	60.400.000	90.600.000
Maksimal	43.850	43.850.000	219.250.000	438.500.000	657.750.000

(Sumber: Data Primer Olahan Peneliti, 2024)

Berdasarkan Tabel 4.7, diketahui total jumlah limbah selama 1 tahun sebanyak 277.570 kg dimana total biaya pengangkutan *sludge* sebesar Rp. 277.570.000 (*dua ratus tujuh puluh tujuh juta lima ratus tujuh puluh ribu rupiah*) per tahun dan biaya pengolahan berkisar Rp. 1.387.850.000 (*satu miliar tiga ratus delapan puluh tujuh juta delapan ratus lima puluh ribu rupiah*) s.d. Rp.

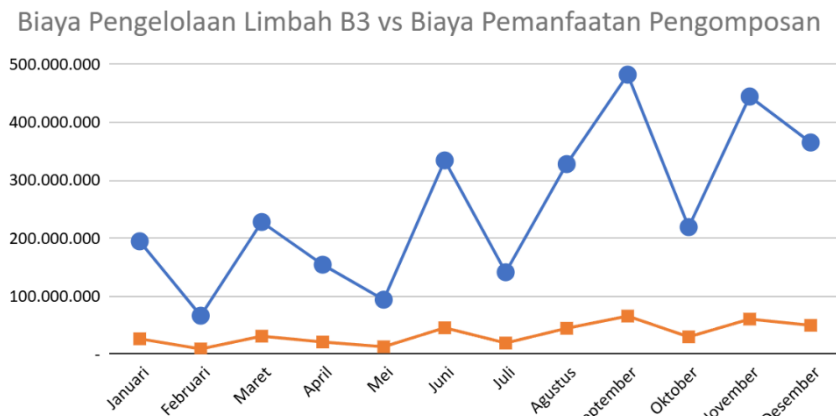
4.163.550.000 (*empat miliar seratus enam puluh tiga juta lima ratus lima puluh ribu rupiah*) per tahun.

Biaya pengelolaan bulanan yang perlu dikeluarkan minimal sebesar Rp. 6.040.000 (*enam juta empat puluh ribu rupiah*) per bulan dan maksimal Rp. 43.850.000 (*empat puluh tiga juta delapan ratus lima puluh ribu rupiah*) per bulan atau rata-rata Rp. 23.130.833 (*dua puluh tiga juta seratus tiga puluh ribu delapan ratus tiga puluh tiga rupiah*) per bulan.

Sementara itu untuk biaya pengangkutan limbah *sludge* menuju tempat pengolahan B3 yang berizin dengan biaya per bulan minimal Rp. 30.200.000 (*tiga puluh juta dua ratus ribu rupiah*) s.d. 90.600.000 (*sembilan puluh juta enam ratus ribu rupiah*) per bulan, maksimal Rp. 43.850.000 (*empat puluh tiga juta delapan ratus lima puluh ribu rupiah*) s.d. Rp. 657.750.000 (*enam ratus lima puluh tujuh juta tujuh ratus lima puluh ribu rupiah*) per bulan, dan rata-rata Rp. 115.654.167 (*seratus lima belas juta enam ratus lima puluh empat ribu seratus enam puluh tujuh rupiah*) s.d. 346.962.500 (*tiga ratus empat puluh enam juta sembilan ratus enam puluh dua ribu lima ratus rupiah*) per bulan.

4.3.3. Efisiensi Pemanfaatan Limbah *Sludge* sebagai Pupuk Organik

Berdasarkan penelitian (Wahyono & Sahwan, 2010) diketahui analisa biaya mekanisasi produksi pupuk organik (kompos) dengan sistem *windrow* di RPH Cakung Jakarta Timur diketahui sebesar Rp. 807/kg kompos. Harga yang dianalisa dalam penelitian tersebut sudah memperhatikan tenaga kerja, listrik, bahan bakar, pemeliharaan, pengepakan termasuk depresiasi dan bunga bank. Dengan memperhatikan kenaikan harga, maka diasumsuikan biaya pengelolaan kompos sebesar Rp. 1.500 per kg kompos sehingga analisa biaya efisiensi. Jika diambil rata-rata biaya pengangkutan dan pengolahan *sludge* IPAL sebagai limbah B3, maka analisa efisiensi biaya pemanfaatan *sludge* IPAL dapat ditampilkan pada gambar Gambar 6. 1.



Gambar 4. 4 Analisa efisiensi biaya pemanfaatan Sludge IPAL sebagai Kompos

(Sumber: Data Primer Olahan Peneliti, 2024)

Diketahui jika pengelolaan *sludge* IPAL sebagai limbah B3, maka jumlah pengangkutan dan pengolahan yang perlu dikeluarkan sebesar Rp. 3.053.270.000 (skema *moderate*, dengan pemilihan asumsi harga pengangkutan menggunakan harga tengah Rp. 10.000/kg pengolahan *sludge*) dimana biaya pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai kompos membutuhkan anggaran sebesar Rp. 416.355.000.

$$\text{Efisiensi} = \frac{(\text{Biaya Pengelolaan } \textit{Sludge} \text{ sebagai LB3} - \text{Biaya Pengomposan}) \times 100}{\text{Biaya Pengelolaan sebagai Limbah B3}}$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{(\text{Rp. 3.053.270.000} - \text{Rp. 416.355.000}) \times 100}{\text{Rp. 3.053.270.000}}$$

$$\text{Efisiensi} = 86\%$$

Berdasarkan analisa biaya diatas, dapat diketahai dengan adanya potensi pemanfaatan *sludge* IPAL dari industri pengolahan minuman fermentasi gandum sebagai bahan untuk kompos organik, maka dapat menghasilkan efisiensi biaya pengelolaan limbah sebesar 86%.

4.3.4. Potensi Nilai Tambah Pemanfaatan *Sludge* sebagai Pupuk Organik

Selain menghemat biaya pengelolaan limbahnya, perusahaan juga berpotensi untuk mendapatkan nilai tambah ekonomi berupa keuntungan dari penjualan pupuk organik (kompos) yang dihasilkan. Dengan potensi *sludge* yang terbilang cukup besar yaitu lebih dari 277 ton/tahun dan dengan beragamnya harga jual kompos di lapangan yang terbilang cukup baik, maka dapat diketahui perkiraan nilai tambah dari opsi pengelolaan *sludge* sebagai berikut:

Tabel 6.2 tentang analisa Potensi Keuntungan dari Pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai kompos dengan berbagai variasi harga pasar berdasarkan David L. Debertin (1986) serta John P. Doll (1984), menerangkan proses produksi Kompos dapat mencapai efisiensi ekonomi dengan indikator rasio Nilai Produk Marginal (NPM) dengan harga input (P_{xi}) terangkum pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Tabel harga kompos di lokapasar berdasarkan observasi pada lokapasar daring Tokopedia, Shopee dan Lazada pada Mei 2024

No	Opsi Harga Pasaran Kompos (kg)	Jumlah Kompos (kg)/tahun	Pendapatan dari penjualan kompos (Rp)	Efisiensi Biaya (Rp)	Total Keuntungan (Rp)
1	Rp2.500	277.570	693.925.000	2.636.915.000	3.330.840.000
2	Rp5.000	277.570	1.387.850.000	2.636.915.000	4.024.765.000
2	Rp7.500	277.570	2.081.775.000	2.636.915.000	4.718.690.000
3	Rp10.000	277.750	2.777.500.000	2.636.915.000	5.414.415.000

(Sumber: Data Sekunder Olahan Peneliti, 2024)

Jika perusahaan memilih untuk mengolah limbah *sludge* IPAL menjadi kompos dan menjual pupuk organiknya, terdapat beberapa keuntungan yang signifikan yaitu:

- 1) Efisiensi Biaya: Mengelola *sludge* sebagai kompos menghemat biaya sebesar Rp. 2.636.915.000 dibandingkan dengan mengelola *sludge* sebagai limbah B3.
- 2) Pendapatan Tambahan: Penjualan kompos dapat memberikan pendapatan tambahan yang signifikan, yang bervariasi tergantung pada harga jual kompos.
- 3) Total Keuntungan: Kombinasi dari efisiensi biaya dan pendapatan dari penjualan kompos menghasilkan total keuntungan yang substansial. Bahkan pada harga jual terendah (Rp. 2500/kg), total keuntungan mencapai Rp.

3.330.840.000, dan bisa meningkat hingga Rp. 5.412.615.000 pada harga jual tertinggi (Rp. 10.000/kg).

Dengan memilih opsi ini, perusahaan tidak hanya menghemat biaya tetapi juga berkontribusi pada pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Selain itu, harga jual kompos yang lebih tinggi akan meningkatkan pendapatan dan total keuntungan perusahaan secara signifikan. David L. Debertin (1986) serta John P. Doll (1984), menyatakan bahwa terdapat dua kondisi prasyarat yang harus dipenuhi untuk mencapai keuntungan maksimum. Kondisi tersebut adalah syarat keharusan (*necessary condition*), dalam hal ini di mana terdapat keharusan industri mengelola limbah yang mereka hasilkan. Kemudian, terkait syarat kecukupan (*sufficient*), di mana menunjukkan proses produksi Kompos dapat mencapai efisiensi ekonomi dengan indikator rasio Nilai Produk Marginal (NPM) dengan harga input (P_{xi}).

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa *sludge* IPAL dari industri minuman fermentasi gandum memiliki karakteristik yang sesuai dengan peraturan Limbah B3 terbaru yaitu Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) nomor 6 tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Kesimpulan secara rinci sebagai berikut;

- a. Data uji karakteristik limbah *sludge* dari IPAL industri pengolahan minuman fermentasi menunjukkan bahwa limbah ini aman dalam konteks lingkungan. Uji ASTM D93-10 menunjukkan limbah tidak mudah meledak, mengurangi risiko kebakaran. Uji Method 1030 EPA memastikan limbah tidak mudah nyala, mengurangi kemungkinan kebakaran spontan. Uji Method 1050 EPA menyatakan limbah tidak reaktif, sehingga tidak menghasilkan gas berbahaya atau panas berlebihan. Selain itu, uji 18-AAS-154/MU/SMM-AAS menunjukkan limbah tidak korosif, sehingga tidak merusak bahan lain yang bersentuhan dengannya.
- b. Hasil uji laboratorium untuk parameter LD₅₀ pada *sludge*, diperoleh hasil LD₅₀ >5g/kgBB, yang menunjukkan bahwa limbah dari proses produksi (*sludge*) industri fermentasi gandum ini adalah limbah non-hazardous and non-toxic materials waste. Hal ini didasarkan pada fakta lapangan sesuai hasil pengujian sampel yang menunjukkan bahwa *sludge* yang dianalisis tidak berpotensi toksik, karena termasuk kelas *slightly toxic*, yakni lebih dari 5g/kgBB. Meski sudah tidak termasuk dalam Limbah B3 kategori 2, namun untuk dapat ditetapkan status limbahnya, menjadi limbah nonB3 perlu dilakukan uji tahap akhir, yaitu uji toksikologi subkronis.
- c. Analisis ekonomi mengindikasikan bahwa penggunaan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik dapat menghemat biaya pengelolaan limbah hingga 86%, dengan mengurangi biaya dari Rp 3.053.270.000 menjadi Rp. 416.355.000 untuk biaya

pengomposan atau mendapatkan efisiensi sebesar Rp 2.636.915.000,- per tahun. Berikutnya terdapat nilai tambah dari hasil penjualan pupuk kompos yang diproyeksikan akan menghasilkan keuntungan mencapai Rp. 4.024.765.000, dan bisa meningkat hingga Rp. 5.412.615.000 jika *sludge* IPAL berhasil dikecualikan dari Limbah B3 dan diolah menjadi pupuk organik.

Di samping manfaat ekonomi, penggunaan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik juga dapat meningkatkan keberlanjutan industri fermentasi gandum. Dengan mengurangi limbah yang harus diolah secara eksternal, industri dapat mengurangi jejak karbonnya dan meningkatkan efisiensi operasional. Hal ini tidak hanya memberikan manfaat ekonomi langsung tetapi juga meningkatkan citra industri sebagai perusahaan yang peduli lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan *sludge* IPAL yang telah diolah dengan baik memiliki potensi besar sebagai sumber pupuk organik yang ekonomis dan ramah lingkungan.

5.2. Saran

Demi pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan memenuhi aspek regulasi secara utuh, serta mendukung profit keuangan perusahaan maka perlu dilakukan upaya-upaya sebagai berikut:

a. Monitoring Kualitas *Sludge*

Industri perlu terus memantau kualitas *sludge* IPAL yang dihasilkan untuk memastikan keamanan dan kesesuaian dengan regulasi secara utuh.

b. Pengujian Tingkat Lanjut

Industri agar tetap memastikan hasil akhir tetap aman dan efisien sebagai pupuk organik. Maka dapat dilakukan pengujian uji tahap akhir, yaitu uji toksikologi subkronis, sehingga langkah pengelolaan limbah menjadi pupuk dapat dipastikan aman.

c. Pengembangan Kebijakan

Potensi ekonomi dari pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik, dapat dilakukan dengan pemberian insentif untuk industri yang menerapkan teknologi pengolahan ramah lingkungan, serta penetapan regulasi sebagai landasan hukum.

5.3. Rekomendasi

Penelitian ini menunjukkan potensi besar *sludge* IPAL sebagai pupuk organik yang dapat memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan secara signifikan. Adapun beberapa rekomendasi dari Peneliti perlu dilakukan yaitu:

1) Penelitian Lanjutan

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi dan mengembangkan potensi penggunaan *sludge* IPAL yang lebih efisien dan ramah lingkungan, serta memonitor dampak jangka panjangnya terhadap lingkungan dan kesehatan

2) Kerjasama Multi-Sektor

Kolaborasi antara industri, pemerintah, dan lembaga penelitian perlu ditingkatkan untuk mengoptimalkan pemanfaatan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik. Ini termasuk program pelatihan bagi petani tentang penggunaan pupuk organik dan penerapan teknologi pengolahan limbah di industri.

3) Implementasi dan Evaluasi

Perlu dilakukan perapan proyek percontohan di berbagai lokasi untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik secara praktis dan mengukur dampak ekonominya secara lebih rinci. Implementasi proyek percontohan di beberapa lokasi yang berbeda akan memberikan data yang lebih komprehensif tentang efektivitas dan manfaat ekonomi penggunaan *sludge* IPAL sebagai pupuk organik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Action, C. 1996. *Environmental Management Systems: An Implementation Guide for Small and Medium-Sized Organizations*.
- [2] Agustina, I. K. Y., Arthagama, I. D. M., Trigunasih, N. M., Narka, I. W., & Sumarniasih, M. S. 2024. Potensi Penambahan *Sludge* Minuman Ringan Berkarbonasi untuk Meningkatkan Mutu Kompos.
- [3] Anggara Sipayung, B. 2021. *Pengelolaan Limbah Padat Non-B3 di PT. Wahana Graha Makmur*.
- [4] Aparicio-García, N., Martínez-Villaluenga, C., Frias, J., & Peñas, E. (2021). Production and characterization of a novel gluten-free fermented beverage based on sprouted oat flour. *Foods*, 10(1), 139.
- [5] Aryawan, M., Rahyuda, I. K., & Ekawati, N. W. 2017. *Pengaruh faktor corporate social responsibility aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan terhadap citra perusahaan* Doctoral dissertation, Udayana University
- [6] Aung, T., & Kim, M. J. 2023. Wheat and Wheat-Derived Beverages: A Comprehensive Review of Technology, Sensory, Biological Activity, and Sustainability. *Preventive Nutrition and Food Science*, 284, 401.
- [7] Bamforth, C. W. 2006. "Scientific Principles of Malting and Brewing." American Society of Brewing Chemists.
- [8] Barrow, C. J. 2006. *Environmental management for sustainable development* 2nd Ed.. London: Routledge Taylor & Francis Group.
- [9] Black, K., & Walker, G. 2023. Yeast fermentation for production of neutral distilled spirits. *Applied Sciences*, 138, 4927.
- [10] Blackman, W. C. 2001. "Basic Hazardous Waste Management." CRC Press.
- [11] Burhanuddin, S. H. 2016. Integrasi ekonomi dan lingkungan hidup dalam pembangunan yang berkelanjutan. *EduTech: Jurnal Ilmu Pendidikan dan Ilmu Sosial*, 21.

- [12] Cunningham, W., Cunningham, M. 2012. *Environmental science: A global concern*. New York: McGraw Hill Companies.
- [13] David L. Debertin. 1986. *Agricultural Production Economics*. Macmillan
- [14] Effendi, H. 2003. *Telaah kualitas air: Bagi pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan perairan*. Yogyakarta: Kanisius.
- [15] EHS Cornell University. 2024. Laboratory Safety Manual. <https://ehs.cornell.edu/book/export/html/237> di akses Juni 2024
- [16] Freeman, H. M. 1989. "Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal." McGraw-Hill.
- [17] Gaol, S. L. 2021. Penyelesaian Sengketa Lingkungan Hidup Pasca Berlakunya UU Nomor 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja. *Jurnal Ilmiah Hukum Dirgantara*, 112.
- [18] Handayani, N. I. 2021. Potensi Limbah Sludge Lumpur Aktif Industri Makanan Minuman Sebagai Bahan Baku Pupuk Organik dengan Bantuan Larva Black Soldier Fly. In *Seminar Nasional Sains & Entrepreneurship* (Vol. 1, No. 1).
- [19] Haryanto, H., Yusuf, M., Rahayu, M., Rahimah, S., Muzayyidah, M., Salampe, M., ... & Ardiansyah, R. T. 2023. Toksikologi Dasar.
- [20] Hidayah, F. N. 2023. Perkembangan Pengaturan Hukum Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (Limbah B3) Di Indonesia. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 4(02), 211-225.
- [21] Hornsey, I. S. 2003. "A History of Beer and Brewing." Royal Society of Chemistry.
- [22] Iannone, A., Di Fiore, C., Carriera, F., Avino, P., & Stillittano, V. 2024. Phthalates: The Main Issue in Quality Control in the Beverage Industry. *Separations*, 11(5), 133.
- [23] John P. Doll, F. O. 1984. *Production Economics Theory with Applications*. Wiley.

- [24] Karlović, A., Jurić, A., Ćorić, N., Habschied, K., Krstanović, V., & Mastanjević, K. (2020). By-products in the malting and brewing industries—re-usage possibilities. *Fermentation*, 6(3), 82.
- [25] Katz, S. E. 2012. "The Art of Fermentation: An In-Depth Exploration of Essential Concepts and Processes from Around the World." Chelsea Green Publishing.
- [26] Kunasheva, Z., Kubasheva, R., Kuzmina, R., Utepkalieva, G., Erzhanova, N., Aituganova, S., ... & Bexeitova, K. 2023. Physical and chemical features of the thermolysis of wastewater *Sludge*. *Engineered Science*, 26, 991.
- [27] Lestari, A. 2022. Pemanfaatan Limbah Sludge Industri Kertas Menjadi Pupuk Organik Sebagai Suatu Upaya Penanggulangan Pencemaran Lingkungan Dan Pengembangan Ekonomi Budidaya Kembang Kol (*Brassica oleracea L.*) Di Kecamatan Rawamerta Kabupaten Karawang. *Jurnal Abditani*, 5(1), 45-49.
- [28] Lowitt, E. 2013. *The collaboration economy: How to meet business, social, and environmental needs and gain competitive advantage*. John Wiley & Sons.
- [29] Metcalf & Eddy. 2003. "Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery." McGraw-Hill Education.
- [30] Miller, G. T., Spoolman, S. E. 2016. *Environmental science*. Boston: Cengage Learning.
- [31] Ovihapsany, R. A. Mustofa, A. Suhartatik, N. 2018. Karakteristik Minuman Beralkohol Dengan Variasi Kadar Ekstrak Buah Bit (*Beta vulgaris L.*) dan Lama Fermentasi. *JITIPARI (Jurnal Ilmiah Teknologi dan Industri Pangan UNISRI)*, 3(1).
- [32] Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.
- [33] Rachmawati, S., Sumiyarningsih, E., & Atmojo, T. B. 2018. Analisis Manajemen Pengelolaan Limbah Padat Medis B3 Di Rumah Sakit Universitas Sebelas Maret Surakarta. In *Prosiding Seminar Sains Nasional dan Teknologi* Vol. 1, No. 1.

- [34] Sigüenza-Andrés, T., Gómez, M., Rodríguez-Nogales, J. M., & Caro, I. 2023. Development of a fermented plant-based beverage from discarded bread flour. *LWT*, 182, 114795.
- [35] Utomo, S. W., Sulistyowati, L., Yulianto, G., & Pradafitri, W. S. 2021. Teori dan Konsep Sistem Manajemen Lingkungan. *Sistem Manajemen Lingkungan. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka*.
- [36] Wahyono, S., & Sahwan, F. L. 2010. Analisa Biaya Mekanisasi Produksi Kompos Sistem Windrow. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 111, 87-93.
- [37] Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. 2022. Domestic Wastewater in Indonesia: Generation, Characteristics and Treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32397-32414.
- [38] Wirasuta, I. M. A. G., & Niruri, R. 2006. Toksikologi umum. *Universitas Udayana. Bali*.
- [39] Ulayya, I. I. (2020). *Studi Pemanfaatan Lumpur Kering Unit Sludge Drying Bed (SDB) IPLT Keputih sebagai Pupuk* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- [40] Mbani, M. N., & Sudarma, I. M. A. (2022). Pengaruh pemberian pupuk bokashi sludge biogas level 0, 15 dan 30 ton/ha terhadap pertumbuhan kembali rumput odot (*Pennisetum purpureum* cv. Mott). *Jurnal Inovasi Penelitian*, 2(9), 3021-3026.
- [41] Putra, A. D., Nurfalah, W., Muhari, E. H., & Gozali, M. (2022). Pemanfaatan limbah lumpur IPAL proses biologi sebagai bahan bakar alternatif dalam bentuk briket. *Fluida*, 15(2), 136-142.
- [42] Chen, Y., Zhang, X., Gong, X., Tao, T., Wang, Z., Zhang, J., & Zhu, Y. (2023). Recovery and utilization of waste filtrate from industrial biological fermentation: Development and metabolite profile of the *Bacillus cereus* liquid bio-fertilizer. *Journal of Environmental Management*, 346, 118945.

- [43] dos Santos, A. L. M., e Silva, A. D. S., Morais, N. W. S., & dos Santos, A. B. (2023). Brewery Spent Grain as sustainable source for value-added bioproducts: Opportunities and new insights in the integrated lignocellulosic biorefinery concept. *Industrial Crops and Products*, 206, 117685.
- [44] Vargas Perucca, M. F., Mestre Furlani, M. V., Vergara Alvarez, S. C., Maturano, Y. P., Petignani, D. B., Pesce, V. M., & Vazquez, F. (2024). Residual brewer's *Saccharomyces cerevisiae* yeasts as biofertilizers in horticultural seedlings: towards a sustainable industry and agriculture.