

# Simulasi Pemilihan Pengelolaan Stillage sebagai Produk Samping Industri Etanol dari Bahan Baku Tetes Tebu dengan Metode Pohon Keputusan

I Made Indradjaja M Brunner<sup>1\*</sup>, Hernani Yulinawati<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Pasca Sarjana, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Jakarta Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Trisakti, Jakarta Barat, Indonesia

\*Koresponden email: imade.brunner@itpln.ac.id

Diterima: 5 Desember 2022

Disetujui: 24 Desember 2022

## Abstract

Stillage is a by-product of distillation process in the ethanol manufacturing industry. Utilization of industrial process by-products is an effort to reduce waste to the environment and provide added value by producing more economically valuable products. However, if stillage is discharged into surface water bodies, it can compromise the life of aquatic biota. This is because stillage has a high organic content with levels of Chemical Oxygen Demand around 90,000 mg/L. Stillage also contains potassium, phosphorus and sulfate which can be used as an alternative fertilizer in sugarcane plantations. This article discusses alternative stillage management in the ethanol industry. The management alternatives presented are real findings, but the numbers used in the analysis are artificial values. Selection simulations are carried out using Net Present Value (NPV) calculations combined with the Decision Tree model, and followed by a sensitivity test of the Decision Tree model. The results of the analysis show that the selected alternative using the NPV calculation can be refined by including several possible events that affect the implementation of alternative management. Furthermore, the use of sensitivity tests can provide an overview for decision makers regarding the potential risks of each management alternative.

**Keywords:** *sugar cane industry, molasses, ethanol production, stillage, distillation, decision tree, decision making*

## Abstrak

Stillage merupakan produk samping dari proses distilasi pada industri pembuatan etanol. Pemanfaatan produk samping proses industri merupakan suatu upaya untuk mengurangi buangan ke lingkungan serta memberi nilai tambah dengan memproduksi hasil yang lebih bernilai ekonomi. Namun demikian, stillage apabila terbuang ke badan air permukaan dapat membahayakan kehidupan biota perairan. Hal ini dikarenakan stillage memiliki kandungan organik yang tinggi dengan kadar Kebutuhan Oksigen Kimiawi dapat mencapai 90.000 mg/L. Stillage juga mengandung kalium, fosfor dan sulfat yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk alternatif pada perkebunan tebu. Artikel ini mendiskusikan alternatif pengelolaan stillage pada industri etanol. Alternatif pengelolaan yang disajikan merupakan hasil temuan nyata di lapangan, namun angka-angka yang digunakan dalam analisis merupakan nilai asumsi. Simulasi pemilihan dilakukan dengan menggunakan perhitungan *Net Present Value* (NPV) yang dipadukan dengan model Pohon Keputusan, serta dilanjutkan dengan uji sensitivitas model Pohon Keputusan. Hasil analisis menunjukkan bahwa alternatif terpilih dengan menggunakan perhitungan NPV dapat dipertajam dengan memasukkan beberapa kemungkinan kejadian yang mempengaruhi pelaksanaan alternatif pengelolaan. Selanjutnya, penggunaan uji sensitivitas dapat memberikan gambaran bagi pengambil keputusan terkait potensi risiko dari setiap alternatif pengelolaan.

**Kata Kunci:** *industri gula, tetes tebu, industri etanol, stillage, distilasi, pohon keputusan, pengambilan keputusan*

## 1. Pendahuluan

Pabrik gula tebu selain menghasilkan gula sebagai produk utama, juga menghasilkan molasses atau tetes tebu sebagai produk sampingan. Tetes tebu sudah diketahui dapat diubah menjadi etanol dengan proses anaerobik [1]–[3]. Tetes tebu yang masih mengandung gula sederhana diberi campuran ragi dan dibiarkan untuk terjadi fermentasi selama beberapa hari hingga terbentuk etanol dengan kadar antara 2–12% [1], [4]. Pemisahan antara air dan etanol yang terkandung di dalam cairan hasil fermentasi dilakukan dengan proses distilasi, yang memanfaatkan perbedaan titik uap dari kedua cairan [5]. Etanol yang diuapkan

dari distilasi kemudian didinginkan dengan kondenser hingga didapatkan konsentrasi sekitar 95% [4]. Sementara, sisa cairan fermentasi yang berada di dasar kolom distilasi merupakan produk samping yang mengandung alkohol 0,1-0,2% untuk proses yang efisien, namun dapat mencapai kadar lebih dari 1% bila proses distilasi tidak sempurna [4]. Cairan sisa proses distilasi dikenal dengan sebutan stillage yang memiliki kandungan bahan organik tinggi [4], [6], serta masih mengandung kalium, fosfor dan sulfat [4].

Stillage merupakan cairan yang asidik dengan pH antara 3,8-4,7, kadar Kebutuhan Oksigen Kimiawi yang tinggi pada kisaran 90.000 mg/L, kadar padatan tersuspensi mencapai 20.000-30.000 mg/L [6]. Kadar tersebut sangat tinggi bila dibandingkan dengan Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Industri Ethanol berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2014, lampiran XXXVI, yang mensyaratkan kadar pH antara 6,0-9,0, kadar Kebutuhan Oksigen Kimiawi maksimal 300 mg/L, dan kadar padatan tersuspensi paling tinggi 100 mg/L [7]. Oleh karena itu, cairan stillage akan sangat berbahaya apabila terlepas ke badan air permukaan karena akan dengan cepat menyerap oksigen yang ada di dalam air. Penyerapan oksigen yang sangat tinggi akan mengakibatkan kondisi septik di air permukaan dan dapat mematikan biota air yang sangat memerlukan asupan oksigen dalam air. Pada Februari 2021, sebuah pabrik etanol di Mead, Nebraska, Amerika Serikat mengalami kejadian lingkungan yang hebat. Kejadian tersebut terjadi akibat tangki limbah cair distilasi mengalami kebocoran dan menumpahkan sekitar 15.000 m<sup>3</sup> cairan stillage ke badan sungai di sekitar pabrik dan mencemari air hingga jarak 7,2 km dari sumber pencemar [8].

Walaupun demikian, stillage ternyata memiliki kandungan kalium, fosfor dan sulfat yang dapat berfungsi sebagai pupuk alternatif bagi tanaman tebu [9]–[11]. Stillage juga diketahui dapat dipakai sebagai bahan baku pembuatan biogas guna menghasilkan gas metana [9], [11]. Alternatif lain dalam pengolahan stillage adalah dengan melakukan pengolahan air limbah hingga memenuhi baku mutu air Limbah baik dengan pengolahan secara fisik, kimiawi, dan biologis [9].

Artikel ini bertujuan untuk mensimulasikan pengelolaan stillage yang optimal dengan menggunakan pendekatan metoda Pohon Keputusan (*Decision Tree method*). Metoda ini merupakan salah satu cara dalam menentukan pilihan bagi para pengambil keputusan dengan mengorganisasi suatu permasalahan dalam pengambilan keputusan, dan menghitung jumlah kemungkinan hasil dari setiap alternatif pilihan [12]. Metoda Pohon Keputusan adalah salah satu cara untuk menggambarkan dan memfasilitasi analisis masalah penting yang melibatkan keputusan berurutan dan hasil variabel dari waktu ke waktu. Pohon keputusan memiliki kegunaan yang besar dalam praktik karena memungkinkan untuk melihat masalah yang besar dan rumit menjadi rangkaian masalah yang lebih kecil dan lebih sederhana. Metoda ini dapat membantu proses pengambilan keputusan yang mencakup pertimbangan eksplisit tentang risiko dan dampak masa depan [13]. Analisis menggunakan Pohon Keputusan maupun metoda turunannya yang terkait permasalahan lingkungan telah dipublikasikan, seperti analisis terkait sistem penyediaan air minum [14], persampahan [15], kontaminasi air tanah [16], maupun air buangan [17]. Sementara itu, kajian terhadap aplikasi stillage sudah dipublikasikan dalam beberapa artikel [4], [6], [9], [18]. Namun demikian, penggabungan pengelolaan stillage dengan pengambilan keputusan menggunakan pendekatan Keputusan Pohon masih belum ditemukan.

Permasalahan pengelolaan stillage dalam artikel ini disimulasikan untuk dikelola dengan 6 alternatif, yaitu: 1) mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan kolam stabilisasi konvensional; 2) mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan kolam stabilisasi dan aerator mekanis; 3) mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan reaktor biogas; 4) memanfaatkan stillage sebagai pupuk cair kalium alternatif di lahan tebu dengan menggunakan kendaraan truk; 5) memanfaatkan stillage sebagai pupuk cair kalium alternatif di lahan tebu dengan menggunakan sistem perpipaan; serta 6) menyimpan stillage di kolam-kolam penampungan tambahan.

Analisis dilakukan dengan menghitung Biaya dan Manfaat dari masing-masing alternatif dan kemudian di hitung nilai akhir dari setiap alternatif menggunakan probabilitas dengan pendekatan Pohon Keputusan. Analisis kemudian dilanjutkan dengan menjalankan beberapa skenario untuk melihat sensitivitas dari alternatif. Angka-angka yang digunakan dalam simulasi ini merupakan hasil perkiraan yang ditujukan untuk menggambarkan bagaimana model perhitungan bekerja

## 2. Deskripsi Permasalahan Pengelolaan Stillage

Salah satu pabrik gula di Indonesia menghasilkan sekitar produk gula sebanyak 12.000 ton/hari dari area perkebunan tebu seluas 18.000 hektar. Pabrik gula tersebut juga memproduksi tetes tebu sebagai produk sampingan. Tetes tebu tersebut dimanfaatkan untuk dijadikan alkohol konsumsi atau etanol di pabrik pembuatan etanol yang berlokasi berdekatan dengan pabrik gula. Tetes tebu dari pabrik gula tersebut dimasukkan ke dalam tangki besar dan dicampurkan dengan ragi serta bahan lain untuk proses fermentasi.

Setelah beberapa hari, cairan fermentasi menjadi matang dan mengandung cukup alkohol, maka cairan didistilasi dalam kolom dua tahap. Produksi harian dari pabrik etanol adalah sekitar dua puluh kiloliter etanol konsumsi dengan kemurnian 98%. Selain etanol, terdapat produk sampingan dari proses distilasi yang disebut stillage. Cairan kental berwarna kuning pekat tersebut merupakan sisa cairan fermentasi yang telah diperas kandungan alkoholnya. Stillage mengandung bahan organik dalam jumlah yang tinggi sehingga sangat berbahaya jika masuk ke badan air permukaan karena akan dengan cepat menyerap oksigen di dalam air. Walaupun stillage berbahaya bagi badan air, namun juga dikenal sebagai pengganti pupuk kalium yang bermanfaat bagi tebu untuk menghasilkan kadar gula yang lebih tinggi [19].

Pihak manajemen pabrik gula dan etanol secara bersama-sama berencana untuk mencari alternatif yang optimal dalam penanganan stillage baik dari segi ekonomi maupun lingkungan. Setidaknya ada enam alternatif yang diajukan untuk menangani permasalahan terkait stillage, yaitu:

1. Mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan kolam stabilisasi konvensional.

Metode ini akan mengolah stillage secara aerobik dan anaerobik. Stillage akan dialirkan ke beberapa kolam besar dan mikroorganisme khusus yang ditambahkan ke stillage akan mendegradasi bahan organik kompleks menjadi lumpur dan menghasilkan air yang lebih bersih. Kolam harus dibangun dengan lapisan kedap air untuk melindungi kemungkinan rembesan ke air tanah. Pemeliharaan rutin untuk menghilangkan lumpur diperlukan untuk menjaga efektivitas sistem.

2. Mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan kolam stabilisasi dan aerator mekanis.

Metode ini merupakan perbaikan dari kolam stabilisasi konvensional. Aerator tambahan akan memberikan pasokan udara yang cukup ke kolam yang akan membantu mikroorganisme khusus untuk mendegradasi bahan organik kompleks menjadi lumpur dan menghasilkan air yang lebih bersih. Dibandingkan dengan metode konvensional, sistem ini membutuhkan sumber daya, tetapi sistem ini dapat menghasilkan limbah yang lebih konsisten dan membutuhkan lebih sedikit lahan. Pembuangan lumpur secara teratur untuk mempertahankan efektivitas sistem diperlukan. Pelepasan bau dari stillage dan proses degradasi secara anaerobik mungkin terjadi, dan tambahan air dari hujan dapat meningkatkan jumlah sisa yang harus diolah.

3. Mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan reaktor biogas.

Metode ini memanfaatkan proses anaerob untuk mengubah bahan organik menjadi gas metana atau biogas. Stillage dialirkan ke suatu reaktor besar yang terbuat dari beton dan tertutup untuk menangkap gas metana. Lumpur akan dihasilkan sebagai limbah padat dan air yang lebih bersih akan dihasilkan sebagai efluen. Meskipun sistem ini dapat menghasilkan efluen yang lebih stabil, pengoperasian dan pemeliharaan sistem ini agak rumit dan memerlukan operator yang terampil.

4. Memanfaatkan stillage sebagai pupuk cair kalium alternatif di lahan tebu dengan menggunakan kendaraan truk.

- Cara ini baru dapat diterapkan setelah Kementerian Lingkungan Hidup mengeluarkan izin aplikasi stillage di lahan tebu. Hal ini dikarenakan stillage dianggap sebagai bahan berbahaya terutama jika terlepas ke badan air. Penelitian intensif selama setahun harus dilakukan sebelum izin dapat dikeluarkan.
- Stillage dari kolam penampungan utama yang terletak di dekat pabrik etanol dipompakan dengan pompa tahan karat ke truk tangki berkapasitas 10 ton. Truk-truk ini akan membawa stillage ke beberapa anjungan pengisian yang tersebar di lahan perkebunan tebu. Di masing-masing anjungan pengisian, stillage akan dipindahkan dari truk tangki besar ke kendaraan penyebar stillage berkapasitas 2 ton. Kendaraan penyebar ini akan menebarkan stillage langsung ke lahan tebu. Sekitar dua puluh platform akan dibangun di lahan perkebunan dan masing-masing akan membutuhkan lahan sekitar 100 meter persegi. Metode ini sangat fleksibel, karena truk tangki dapat dikerahkan ke lokasi anjungan tertentu mengikuti pola penyebarannya. Namun, biaya untuk membangun tangki dan penyebar relatif mahal karena semua bahan harus terbuat dari bahan stainless steel untuk melindungi dari sisa korosif. Bahan bakar diesel dalam jumlah besar diperlukan untuk memasok armada, dan penggantian armada harus dilakukan setiap delapan tahun.

5. Memanfaatkan stillage sebagai pupuk cair kalium alternatif di lahan tebu dengan menggunakan sistem perpipaan.

- Sama halnya dengan penerapan lahan dengan sistem truk tangki, cara ini hanya bisa dilakukan setelah mendapat izin dari pihak yang berwenang. Dibandingkan dengan sistem truk tangki, metode ini akan menggantikan truk tangki 10 ton dengan sistem perpipaan. Stillage dari kolam penampungan utama akan dipompa ke sepuluh kolam pengumpan di areal perkebunan tebu. Kolam pengumpan tersebut akan dibangun menggunakan lapisan kedap air yang masing-masing memiliki kapasitas tampung sekitar 1.000 m<sup>3</sup>. Masing-masing kolam pengumpan akan memiliki stasiun pemompaan untuk mengisi stillage ke kendaraan penebar stillage berkapasitas 2 ton. Sistem ini akan mengurangi jumlah bahan bakar solar yang dibutuhkan untuk armada, tetapi biaya untuk membangun sistem perpipaan tahan karat akan mahal. Secara teratur, sistem perpipaan harus dibersihkan dan stillage yang dikeluarkan akan dikumpulkan di kolam pengumpan dan nantinya akan disebar ke lapangan. Armada kendaraan penebar harus diganti setiap delapan tahun, sedangkan sistem perpipaan diperkirakan memiliki masa pakai hingga 50 tahun.
6. Menyimpan stillage di kolam-kolam penampungan tambahan.
- Metode ini adalah yang paling mudah untuk diterapkan. Dibutuhkan pembangunan kolam kedap air baru berkapasitas 20.000 m<sup>3</sup> setiap 6 bulan. Biaya untuk membangun kolam relatif tidak terlalu mahal dan perawatannya lebih sedikit. Akumulasi stillage dapat menyebabkan bencana lingkungan yang ekstrim jika kolam mengalami kebocoran.

#### *Asumsi*

Berdasarkan penjelasan di atas, beberapa asumsi dapat diambil untuk menemukan alternatif yang optimal, yaitu:

- a) Manajemen memutuskan bahwa semua alternatif harus diperlakukan sebagai alternatif yang saling eksklusif. Mereka tidak akan membangun alternatif yang akan diubah menjadi alternatif lain di masa depan. Mereka memutuskan untuk melakukan ini karena setiap alternatif membutuhkan konstruksi dan infrastruktur yang berbeda, meskipun beberapa dari alternatif nampaknya memiliki keserupaan sistem. Misalnya, kolam stabilisasi konvensional tidak dapat diubah menjadi sistem mekanis tanpa mengubah kedalaman kolam, menambah saluran listrik baru, mengurangi jumlah kolam, dan pertimbangan lainnya.
- b) Manajemen sepakat bahwa konversi lahan tebu menjadi rencana pengelolaan limbah tidak akan berdampak pada produksi gula, karena hanya akan mengonversi sekitar sepuluh hektar dari 18.000 hektar lahan tebu yang ada atau sekitar 0,06% dari total luas lahan. Selain itu, mereka berencana menambah 5.000 hektar lahan gula dalam 10 tahun ke depan.
- c) Karena area perkebunan memiliki permukaan air tanah yang dangkal dengan banyak aliran kali kecil yang mengalir melalui lahan, makan air irigasi tidak menjadi permasalahan. Tambahan air dari hasil pengolahan air limbah tidak akan memberikan tambahan jumlah air irigasi yang signifikan.
- d) Manajemen memiliki kemauan untuk melakukan penelitian aplikasi lahan meskipun ada kemungkinan hasilnya kurang memuaskan. Penelitian ini diprediksi akan selesai dalam setahun. Sementara itu, manajemen akan membuat keputusan untuk memilih alternatif yang optimal. Dalam hal pengelola telah memilih alternatif permohonan lahan tetapi tidak mendapatkan izin, mereka akan mengikuti semua rekomendasi penelitian dan mengajukan kembali permohonannya sampai izin keluar. Dalam hal mereka memilih alternatif yang tidak memerlukan aplikasi lahan tetapi mereka mendapat izin, manajemen akan melanjutkan alternatif yang mereka pilih dan mengabaikan kemungkinan alternatif aplikasi lahan.

#### *Estimasi Biaya*

Untuk mengetahui alternatif yang optimal, pihak manajemen meminta konsultan untuk membuat Analisis Biaya dan Manfaat dari setiap alternatif yang akan digunakan dalam model Pohon Keputusan. Berdasarkan analisis yang cermat, konsultan memperkirakan biaya untuk setiap item adalah sebagai berikut:

- Sebuah kolam penyimpanan dengan volume 20.000 m<sup>3</sup> memakan biaya pembangunan \$500.000. Harga tersebut sudah termasuk kegiatan pembukaan lahan seluas 0,5 hektar, dan biaya rekayasa lainnya. Setiap tahun, setiap kolam penyimpanan membutuhkan sekitar \$50.000 untuk biaya pemeliharaan.
- Pembukaan lahan untuk setiap hektar membutuhkan biaya \$100.000.
- Biaya konsultan untuk merancang kolam stabilisasi dengan atau tanpa peralatan mekanis adalah \$250.000. Sedangkan untuk alternatif aplikasi tanah, biayanya adalah \$350.000.

- Alternatif reaktor biogas merupakan proyek *turn-key*, sehingga biaya konsultan sudah termasuk biaya desain dan konstruksi. Perusahaan Biogas mengajukan proposal untuk instalasi pengolahan stillage yang menelan biaya total \$20.000.000, ditambah biaya operasi dan pemeliharaan tahunan sebesar \$2.000.000. Biogas yang dihasilkan dari reaktor dapat menghasilkan pendapatan hingga \$1.000.000 per tahun.
- Biaya konstruksi untuk kolam stabilisasi konvensional sekitar \$5.000.000, sedangkan untuk kolam stabilisasi dengan peralatan mekanis sekitar \$6.500.000 termasuk semua peralatan yang diperlukan. Namun, semua biaya tersebut belum termasuk pembukaan lahan. Setiap tahun sistem kolam stabilisasi konvensional membutuhkan \$750.000 untuk pemeliharaan. Kolam stabilisasi dengan peralatan mekanis membutuhkan \$1.500.000 untuk biaya pemeliharaan dan pengoperasian tahunan.
- Penerapan lahan menggunakan sistem truk akan membutuhkan investasi \$1.000.000 dalam konstruksi dua anjungan dan \$8.000.000 lagi untuk truk pengumpan dan penyebar. Setiap delapan tahun armada harus diperbarui. Biaya operasi dan pemeliharaan untuk keseluruhan sistem adalah sekitar \$1.000.000 per tahun, ditambah \$300.000 lagi untuk bahan bakar solar. Biaya bahan bakar bisa mencapai \$600.000 jika harga bahan bakar global mencapai \$55/barel. Penggunaan stillage sebagai pupuk kalium alternatif dapat menghemat belanja pupuk perusahaan hingga \$1.000.000 per tahun.
- Penerapan lahan menggunakan sistem perpipaan dan truk akan membutuhkan investasi \$25.000.000 untuk pipa, peralatan, dan struktur lainnya, ditambah lagi \$1.500.000 untuk truk penyebar. Setiap delapan tahun armada harus diperbarui. Biaya operasi dan pemeliharaan untuk keseluruhan sistem adalah sekitar \$250.000 per tahun, ditambah lagi \$100.000 untuk solar. Biaya bahan bakar bisa mencapai \$200.000 jika harga bahan bakar global mencapai \$55/barel. Penggunaan stillage sebagai pupuk potasium dapat menghemat perusahaan hingga \$1.000.000 per tahun.
- Biaya pemulihan lingkungan yang mungkin terjadi jika stillage tertumpah ke badan air permukaan diperkirakan sebesar \$30.000.000 untuk menyimpan sisa air di kolam alternatif atau untuk sistem kolam stabilisasi konvensional, sekitar \$20.000.000 untuk aplikasi lahan menggunakan sistem perpipaan, sekitar \$12.000.000 untuk kolam stabilisasi menggunakan sistem peralatan mekanis atau untuk aplikasi lahan menggunakan sistem truk, dan \$7.500.000 untuk sistem biogas. Semua biaya pemulihan lingkungan yang diperkirakan menggunakan nilai uang pada saat sekarang.

Pertimbangan lain yang harus diambil oleh manajemen terkait waktu pelaksanaan, jumlah kebutuhan kolam penampungan, serta faktor lingkungan disajikan pada **Tabel 1**.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Analisis Biaya dan Manfaat

Berdasarkan estimasi biaya di atas, analisis biaya dan manfaat untuk setiap alternatif dapat dihitung. Diasumsikan bahwa tingkat diskonto tahunan stabil pada 6% dan periode waktu 50 tahun diterapkan untuk menghitung biaya dan manfaat dari setiap alternatif. Perbandingan antara masing-masing alternatif akan dilakukan dengan menggunakan *Net Present Value* (NPV), dengan menggunakan rumus:

- Nilai Sekarang Pembayaran Tunggal (SPPW), untuk mengetahui nilai sekarang (P) dari pembayaran tunggal (S) yang diterima setelah (n) periode waktu, dengan asumsi tingkat diskonto (i)% per periode:

$$P = S(1 + i)^{-n} \tag{1}$$

- Nilai Sekarang Seri Seragam (USPW), untuk mengetahui nilai sekarang (P) dari seri pembayaran seragam (R) yang direalisasikan pada setiap akhir periode selama (n) periode, dengan asumsi tingkat diskonto (i)% per periode:

$$P = R \left[ \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \right] \tag{2}$$

**Tabel 1.** Matriks Alternatif

Deskripsi \ Alternatif	Metode kolam stabilisasi	Menstabilkan kolam dengan peralatan mekanis	Reaktor biogas	Aplikasi lahan menggunakan kendaraan truk	Aplikasi lahan menggunakan sistem perpipaan dan truk	Teruslah membangun lebih banyak kolam
Waktu Desain Pra-konstruksi	Hingga 6 bulan	Hingga 6 bulan	Hingga 1 tahun	Hingga 1,5 tahun termasuk waktu penelitian untuk aplikasi tanah	Hingga 1,5 tahun termasuk waktu penelitian untuk aplikasi tanah	Hingga 3 bulan
Waktu konstruksi	Hingga 6 bulan	Hingga 6 bulan	Hingga 1 tahun	Hingga 3 bulan	Hingga 6 bulan	Hingga 1 bulan
Kolam penahan tanah tambahan yang akan dibangun selama waktu desain dan konstruksi (1 kolam cukup untuk menampung timbula stillage selama 6 bulan)	2 kolam	2 kolam	4 kolam	4 kolam	4 kolam	1 kolam setiap 6 bulan
Area yang dibutuhkan untuk tambak tambahan (sekitar 0,5 ha per tambak)	1 hektar	1 hektar	2 hektar	2 hektar	2 hektar	-
Area yang dibutuhkan untuk fasilitas (tidak termasuk kolam penampungan ekstra)	10 hektar	5 hektar	1 hektar	Minimal (sekitar 500 meter persegi untuk pengisian)	10 x 0,1 hektar	1 hektar per tahun
Luas total yang diperlukan hingga fasilitas dapat dioperasikan secara penuh	11 hektar	6 hektar	3 hektar	2,5 hektar	3 hektar	1 hektar per tahun
Sumber daya atau peralatan yang dibutuhkan	Sinar matahari	<ul style="list-style-type: none"> <li>Listrik</li> <li>Sinar matahari</li> </ul>	Listrik	<ul style="list-style-type: none"> <li>Listrik</li> <li>Solar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Listrik</li> <li>Solar</li> </ul>	Tidak ada
Sumber daya yang dipulihkan	Air	Air	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biogas</li> <li>Air</li> </ul>	Pupuk kalium	Pupuk kalium	Tidak ada
Limbah yang ditimbulkan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lumpur</li> <li>Bau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lumpur</li> <li>Bau</li> </ul>	Lumpur	Emisi kendaraan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emisi kendaraan</li> <li>Stillage dari pembersihan pipa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lumpur</li> <li>Akumulasi stillage</li> </ul>

Sumber: Hasil analisis, 2022

Perhitungan NPV untuk setiap alternatif dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan kolam stabilisasi konvensional.
  - Tahun ke-0. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 2 kolam penyimpanan (100); Biaya desain kolam stabilisasi (250); Pembukaan lahan seluas 10 hektar (1000); dan Pembangunan kolam stabilisasi (5000)
  - Tahun ke 1 sampai dengan tahun ke 50. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): O&M tahunan (750).
  - Net Present Value dari alternatif #1 adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100 + 250 + 1.000 + 5.000) * (1 + 0,06)^0] + [-750 * ((1+0,06)^{50} - 1)/(0,06*(1+0,06)^{50})] = - 19.171,4$
2. Mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan kolam stabilisasi dan aerator mekanis.
  - Tahun ke-0. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 2 kolam penyimpanan (100); Biaya desain kolam stabilisasi (250); Pembukaan lahan seluas 5 hektar (500); dan Pembangunan kolam stabilisasi (6500)
  - Tahun ke 1 sampai dengan tahun ke 50. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): O&M tahunan (1500).
  - Net Present Value dari alternatif #2 adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100 + 250 + 500 + 6.500) * (1 + 0,06)^0] + [-1.500 * ((1+0,06)^{50} - 1)/(0,06*(1+0,06)^{50})] = - 31.992,8$
3. Mengolah stillage sebagai air limbah hingga memenuhi standar efluen dengan menggunakan reaktor biogas.
  - Tahun ke-0. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 2 kolam penyimpanan (100);
  - Tahun ke-1. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 4 kolam penyimpanan (200); Pembangunan reaktor biogas (20000)
  - Tahun ke 2 sampai dengan tahun ke 50. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): O&M tahunan (2000). Sementara, pendapatan dari penjualan biogas (dalam ribuan \$): 2000
  - Net Present Value dari alternatif #3 adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100) * (1 + 0,06)^0] + [-(1.000 + 200 + 20.000) * (1 + 0,06)^{-1}] + [(-1.000 + 2.000) * (((1+0,06)^{49} - 1)/(0,06*(1+0,06)^{49})) * (1 + 0,06)^{-1}] = - 35.918,5$
4. Memanfaatkan stillage sebagai pupuk cair kalium alternatif di lahan tebu dengan menggunakan kendaraan truk.
  - Tahun ke-0. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 2 kolam penyimpanan (100);
  - Tahun ke-1. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 4 kolam penyimpanan (200); Biaya desain system (350); Konstruksi struktur (1000); Pembelian kendaraan (8000).
  - Tahun ke 2 sampai dengan tahun ke 50. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): O&M tahunan (1000); Pembelian bahan bakar solar (300, saat harga lebih murah, atau 600 saat harga tinggi). Sementara, pendapatan dari penghematan pengadaan pupuk kalium (dalam ribuan \$): 1000
  - Tahun ke 9, 17, 25, 33, 41, 49. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembelian kendaraan (8000).
  - Net Present Value dari alternatif #4 dengan harga solar yang lebih rendah adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100) * (1 + 0,06)^0] + [-(1.000 + 200 + 350 + 1.000 + 8.000) * (1 + 0,06)^{-1}] + [(-1.000 - 300 + 1.000) * (((1+0,06)^{49} - 1)/(0,06*(1+0,06)^{49})) * (1 + 0,06)^{-1}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-9}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-17}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-25}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-33}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-41}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-49}] = - 27.432,1$

- Net Present Value dari alternatif #4 dengan harga solar yang lebih tinggi adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100) * (1 + 0,06)^0] + [-(1.000 + 200 + 350 + 1.000 + 8.000) * (1 + 0,06)^{-1}] + [(-1.000 - 600 + 1.000) * (((1+0,06)^{49} - 1)/(0,06*(1+0,06)^{49})) * (1 + 0,06)^{-1}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-9}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-17}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-25}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-33}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-41}] + [-8.000 * (1 + 0,06)^{-49}] = -31.877,6$
5. Memanfaatkan stillage sebagai pupuk cair kalium alternatif di lahan tebu dengan menggunakan sistem perpipaan.
- Tahun ke-0. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 2 kolam penyimpanan (100);
  - Tahun ke-1. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 4 kolam penyimpanan (200); Biaya desain system (350); Konstruksi struktur (25000); Pembelian kendaraan (1500).
  - Tahun ke 2 sampai dengan tahun ke 50. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): O&M tahunan (250); Pembelian bahan bakar solar (100, saat harga lebih murah, atau 200 saat harga tinggi). Sementara, pendapatan dari penghematan pengadaan pupuk kalium (dalam ribuan \$): 1000
  - Tahun ke 9, 17, 25, 33, 41, 49. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembelian kendaraan (1500).
  - Net Present Value dari alternatif #5 dengan harga solar yang lebih rendah adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100) * (1 + 0,06)^0] + [-(1.000 + 200 + 350 + 25.000 + 1.500) * (1 + 0,06)^{-1}] + [(-250 - 100 + 1.000) * (((1+0,06)^{49} - 1)/(0,06*(1+0,06)^{49})) * (1 + 0,06)^{-1}] + [-1.500 * (1 + 0,06)^{-9}] + [-1.500 * (1 + 0,06)^{-17}] + [-1,500 * (1 + 0,06)^{-25}] + [-1,500 * (1 + 0,06)^{-33}] + [-1,500 * (1 + 0,06)^{-41}] + [-1.500 * (1 + 0,06)^{-49}] = -20.167,8$
  - Net Present Value dari alternatif #5 dengan harga solar yang lebih tinggi adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100) * (1 + 0,06)^0] + [-(1.000 + 200 + 350 + 25.000 + 1.500) * (1 + 0,06)^{-1}] + [(-250 - 200 + 1.000) * (((1+0,06)^{49} - 1)/(0,06*(1+0,06)^{49})) * (1 + 0,06)^{-1}] + [-1.500 * (1 + 0,06)^{-9}] + [-1.500 * (1 + 0,06)^{-17}] + [-1,500 * (1 + 0,06)^{-25}] + [-1,500 * (1 + 0,06)^{-33}] + [-1,500 * (1 + 0,06)^{-41}] + [-1.500 * (1 + 0,06)^{-49}] = -21.649,7$
6. Menyimpan stillage di kolam-kolam penampungan tambahan.
- Tahun ke-0. Biaya yang dikeluarkan di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 2 kolam penyimpanan (100).
  - Tahun ke-1 sampai ke 50. Biaya yang dikeluarkan per tahun di antaranya (dalam ribuan \$): Pembangunan 2 kolam penampungan (1000); O&M untuk 2 kolam penyimpanan (100).
  - Net Present Value dari alternatif #6 adalah (dalam ribuan \$) =  $[-(1.000 + 100) * (1 + 0,06)^0] + [-(1.000 + (100 * 2)) * (1 + 0,06)^1] + \dots + [-(1.000 + (100 * 51)) * (1 + 0,06)^{50}] = -41.760,0$

Net Present Value dari masing-masing alternatif dapat diringkas seperti disajikan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2** Ringkasan *Net Present Value* alternatif

Alternatif	NPV (\$ 000)
Pengolahan menggunakan kolam stabilisasi konvensional	-19.171,4
Pengolahan menggunakan kolam stabilisasi dan aerator mekanis	-31.992,8
Pengolahan menggunakan reaktor biogas	-35.918,5
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih rendah	-27.432,1
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih tinggi	-31.877,6
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem perpipaan dan kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih rendah	-20.167,8



Alternatif	NPV (\$ 000)
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem perpipaan dan kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih tinggi	-21.649,7
Membangun kolam penampungan tambahan	-41.760,0

Sumber: Hasil analisis, 2022

Berdasarkan hasil pada **Tabel 2**, alternatif pengolahan stillage menggunakan kolam stabilisasi konvensional tampaknya merupakan alternatif yang paling optimal. Namun, perhitungan ini hanya bisa terjadi di dunia yang sempurna, dengan segala sesuatunya pasti dan dapat diprediksi. Manajemen, di sisi lain, harus mempertimbangkan ketidakpastian, seperti: apa yang akan terjadi jika mereka tidak bisa mendapatkan izin aplikasi tanah, bagaimana jika harga solar naik dan mencapai \$55/barel, berapa potensi biaya pemulihan lingkungan jika alternatif mengalami kegagalan? Ketidakpastian ini tidak dapat dijelaskan hanya dengan Analisis Biaya dan Manfaat di atas. Untuk menginternalisasi ketidakpastian tersebut, pohon keputusan dikembangkan.

### 3.2. Pohon Keputusan

Pohon Keputusan adalah sarana yang ampuh untuk menggambarkan dan memfasilitasi analisis masalah penting yang melibatkan keputusan berurutan dan hasil variabel dari waktu ke waktu [13]. Langkah-langkah yang terlibat dalam membangun diagram Pohon Keputusan [13]:

1. Mengidentifikasi titik keputusan dan alternatif yang tersedia di setiap titik.
2. Identifikasi titik-titik ketidakpastian dan jenis atau kisaran hasil yang mungkin terjadi pada setiap titik.
3. Perkirakan nilai yang diperlukan untuk membuat analisis, khususnya probabilitas hasil yang berbeda dan biaya untuk berbagai hasil dan tindakan alternatif.
4. Menganalisis alternatif, dimulai dengan titik keputusan yang paling jauh dan bekerja mundur, untuk memilih keputusan awal yang terbaik.

Untuk membantu manajemen, konsultan mengembangkan model Pohon Keputusan. Model ini mencoba menginternalisasi tiga ketidakpastian yang terkait dengan izin penggunaan lahan, bencana lingkungan, dan harga solar. Konsultan memperkirakan bahwa ada kemungkinan 50% perusahaan akan mendapat izin untuk menyebarkan sisa tanah ke ladang tebu. Kemungkinan terjadinya bencana lingkungan hanya 10%, karena kemajuan teknologi yang diterapkan dalam membangun alternatif. Fluktuasi harga bahan bakar solar sangat dipengaruhi oleh harga pasar dunia, sehingga perlu menjadi faktor yang dipertimbangkan.

Model Pohon Keputusan memungkinkan manajemen untuk mengintegrasikan NPV dan kemungkinan biaya lingkungan dari setiap alternatif, dan menghitung alternatif yang optimal. **Tabel 3** menunjukkan NPV dan biaya lingkungan dari masing-masing alternatif. Sedangkan **Gambar 1** menggambarkan alternatif optimal berdasarkan perhitungan Pohon Keputusan.

**Tabel 3.** Ringkasan *Net Present Value* alternatif

Alternatif	NPV (\$ 000)	Biaya Lingkungan (\$ 000)	Nilai Total (\$ 000)
Pengolahan menggunakan kolam stabilisasi konvensional	-19.171,4	-30.000,0	-49171,4
Pengolahan menggunakan kolam stabilisasi dan aerator mekanis	-31.992,8	-12.000,0	-43992,8
Pengolahan menggunakan reaktor biogas	-35.918,5	-7.500,0	-43418,5
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih rendah	-27.432,1	-12.000,0	-39432,1
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih tinggi	-31.877,6	-12.000,0	-43877,6
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem perpipaan dan kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih rendah	-20.167,8	-20.000,0	-40167,8

Alternatif	NPV (\$ 000)	Biaya Lingkungan (\$ 000)	Nilai Total (\$ 000)
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem perpipaan dan kendaraan truk dalam kondisi harga solar yang lebih tinggi	-21.649,7	-20.000,0	-41649.7
Membangun kolam penampungan tambahan	-41.760,0	-30.000,0	-71760.0

Sumber: Hasil analisis, 2022

Hasil dari Pohon Keputusan yang disajikan pada menunjukkan bahwa pengolahan stillage dengan menggunakan kolam stabilisasi konvensional merupakan solusi yang optimal. Alternatif ini menunjukkan biaya paling kecil yang harus dibayar manajemen dalam periode 50 tahun ke depan. Meskipun demikian, perhitungan ini mengasumsikan kemungkinan terjadinya bencana lingkungan hanya 10%, dan ada kemungkinan 75% harga bahan bakar solar akan naik. Akankah pohon keputusan memberikan alternatif optimal yang sama jika probabilitas terjadinya bencana lingkungan dan kenaikan harga solar berbeda? Untuk menjawab pertanyaan ini, analisis sensitivitas perlu dilakukan dengan menggunakan skenario yang berbeda.

**Tabel 4.** Biaya setiap alternatif berdasarkan perhitungan model pohon keputusan

Alternatif	Nilai Dihitung (\$ 000)
Pengolahan menggunakan kolam stabilisasi konvensional	-11085.7
Pengolahan menggunakan kolam stabilisasi dan aerator mekanis	-16596.4
Pengolahan menggunakan reaktor biogas	-18334.2
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem kendaraan truk	-15983.1
Pemanfaatan stillage menggunakan sistem perpipaan dan kendaraan truk	-11639.6
Membangun kolam penampungan tambahan	-22380.0

Sumber: Hasil analisis, 2022

Catatan: Berdasarkan kemungkinan 50% untuk mendapatkan izin aplikasi tanah, 10% kemungkinan terjadinya bencana lingkungan, dan 75% kemungkinan kenaikan harga bahan bakar solar

Value	Description	Value	Description	Prob.	Value	Description	Prob.	Value	Description	Prob.	Value
-11085.7	Stab. Ponds	> -11085.7	Land App. Licensed	0.5	0	environmental disaster	0.1	0	lower diesel price	0.25	0
Optimal									higher diesel price	0.75	0
						no environmental disaster	0.9	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
			No license for land app.	0.5	-22171.4	environmental disaster	0.1	-49171.4	lower diesel price	0.25	-49171.4
									higher diesel price	0.75	-49171.4
						no environmental disaster	0.9	-19171.4	lower diesel price	0.25	-19171.4
									higher diesel price	0.75	-19171.4
	Stab. Ponds w/ Aerator	-16596.4	Land App. Licensed	0.5	0	environmental disaster	0.1	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
						no environmental disaster	0.9	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
			No license for land app.	0.5	-33192.79	environmental disaster	0.1	-43992.8	lower diesel price	0.25	-43992.8
									higher diesel price	0.75	-43992.8
						no environmental disaster	0.9	-31992.8	lower diesel price	0.25	-31992.8
									higher diesel price	0.75	-31992.8
	Biogas Reactor	-18334.2	Land App. Licensed	0.5	0	environmental disaster	0.1	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
						no environmental disaster	0.9	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
			No license for land app.	0.5	-36668.46	environmental disaster	0.1	-43418.5	lower diesel price	0.25	-43418.5
									higher diesel price	0.75	-43418.5
						no environmental disaster	0.9	-35918.5	lower diesel price	0.25	-35918.5
									higher diesel price	0.75	-35918.5
	Land App. w/ trucking system	-15983.1	Land App. Licensed	0.5	-31966.22	environmental disaster	0.1	-42766.2	lower diesel price	0.25	-39432.1
									higher diesel price	0.75	-43877.6
						no environmental disaster	0.9	-30766.2	lower diesel price	0.25	-27432.1
									higher diesel price	0.75	-31877.6
			No license for land app.	0.5	0	environmental disaster	0.1	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
						no environmental disaster	0.9	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
	Land App. w/ piping system	-11639.6	Land App. Licensed	0.5	-23279.22	environmental disaster	0.1	-41279.2	lower diesel price	0.25	-40167.8
									higher diesel price	0.75	-41649.7
						no environmental disaster	0.9	-21279.2	lower diesel price	0.25	-20167.8
									higher diesel price	0.75	-21649.7
			No license for land app.	0.5	0	environmental disaster	0.1	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
						no environmental disaster	0.9	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
	Storage ponds	-22380	Land App. Licensed	0.5	-44760	environmental disaster	0.1	-11760	lower diesel price	0.25	-11760
									higher diesel price	0.75	-11760
						no environmental disaster	0.9	-41760	lower diesel price	0.25	-41760
									higher diesel price	0.75	-41760
			No license for land app.	0.5	0	environmental disaster	0.1	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0
						no environmental disaster	0.9	0	lower diesel price	0.25	0
									higher diesel price	0.75	0

Gambar 1. Alternatif optimal berdasarkan perhitungan Model Pohon Keputusan

### 3.3. Analisis Sensitivitas

Tiga skenario dikembangkan untuk mengetahui pengaruh perubahan tingkat probabilitas, khususnya terkait harga solar dan bencana lingkungan. **Tabel 5** menunjukkan skenario analisis sensitivitas. Dalam skenario ini, kemungkinan menerima izin aplikasi tanah dipertahankan pada 50%, kemungkinan kenaikan harga solar ditetapkan menjadi 25%, 50% dan 75%, sedangkan kemungkinan terjadinya bencana lingkungan berkisar antara 5 % hingga 95% dengan kenaikan 5%. Angka-angka ini diambil karena alasan berikut:

- Pada akhir penelitian aplikasi tanah, akan ada dua kemungkinan apakah perusahaan menerima izin aplikasi tanah dari pemerintah atau tidak.
- Kenaikan harga solar hanya akan mempengaruhi dua alternatif: penerapan lahan dengan sistem kendaraan truk, dan kombinasi sistem perpipaan dan truk. Oleh karena itu, tiga kemungkinan harga

solar yang lebih tinggi seharusnya cukup untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang kemungkinan kondisi sebenarnya.

- Karena setiap alternatif dipengaruhi oleh kemungkinan bencana lingkungan, tampaknya analisis yang luas pada aspek ini akan memberikan perspektif yang lebih baik tentang realitas.

**Tabel 5.** Skenario analisis sensitivitas

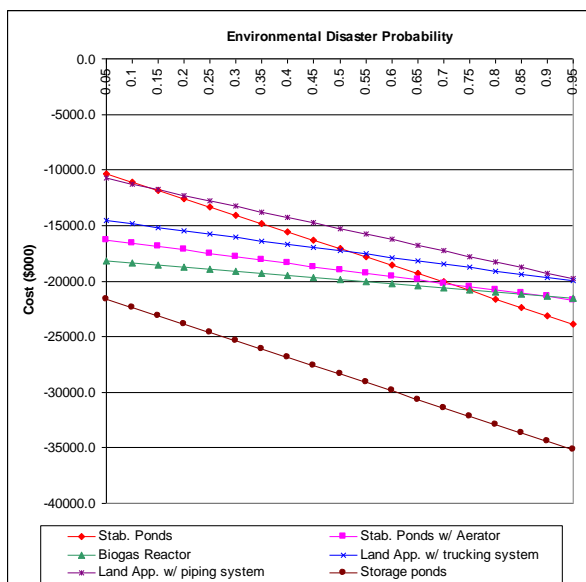
Skenario	Probabilitas untuk		
	Aplikasi Tanah	Bencana lingkungan	Harga Diesel Lebih Tinggi
A	50%	5% sampai 95%, dengan kenaikan 5%.	25%
B			50%
C			75%

Sumber: Hasil analisis, 2022

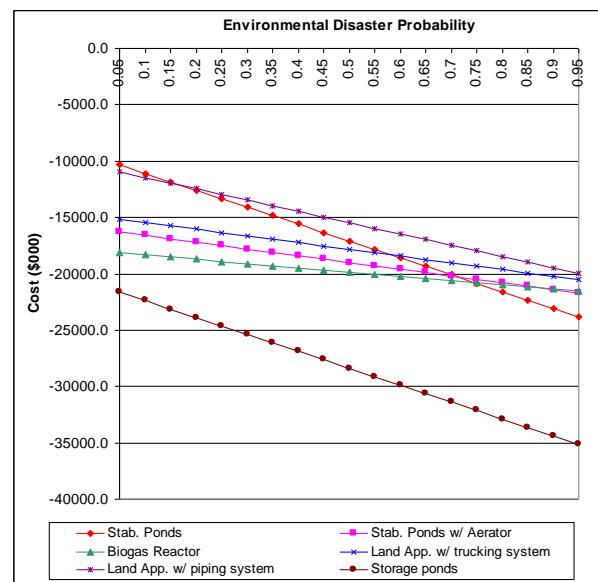
Hasil skenario uji sensitivitas digambarkan pada **Gambar 2** untuk skenario #A, **Gambar 3** untuk skenario #B, dan **Gambar 4** untuk skenario #C. Berdasarkan hasil yang digambarkan pada **Gambar 2**, pengolahan stillage dengan kolam stabilisasi konvensional adalah solusi optimal jika kemungkinan bencana lingkungan lebih rendah dari 15%. Namun, jika kemungkinan bencana lingkungan lebih dari 15% maka aplikasi lahan dengan sistem perpipaan dan truk menjadi pilihan. Penggunaan lahan dengan sistem truk tampaknya menjadi solusi optimal hanya jika kemungkinan bencana lingkungan lebih tinggi dari 95%.

**Gambar 3** menunjukkan bahwa pengolahan stillage dengan kolam stabilisasi konvensional akan menjadi solusi optimal jika kemungkinan bencana lingkungan lebih rendah dari 20%.

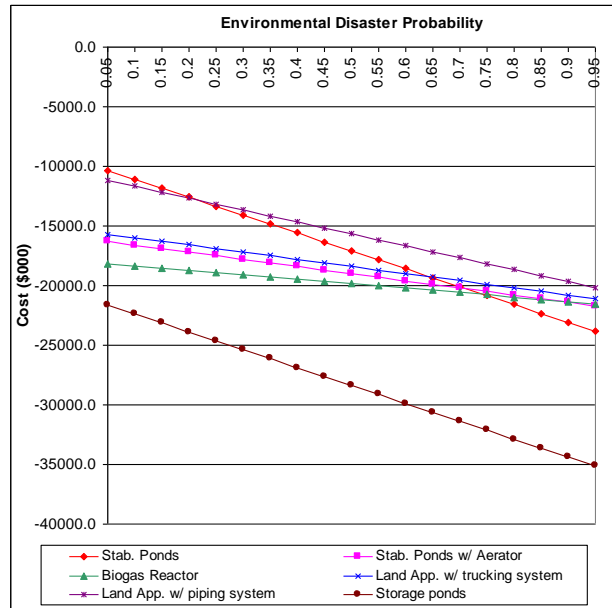
Kemungkinan bencana lingkungan yang lebih tinggi akan memungkinkan penerapan lahan dengan sistem perpipaan dan truk menjadi optimal. Hasil serupa dapat dilihat pada **Gambar 4** yang menunjukkan pengolahan stillage dengan kolam stabilisasi konvensional akan menjadi solusi optimal jika kemungkinan bencana lingkungan lebih rendah dari 25%, dan aplikasi lahan dengan sistem perpipaan dan truk akan menjadi solusi optimal jika kemungkinan bencana lebih tinggi.



**Gambar 2.** Analisis sensitivitas untuk skenario #A



**Gambar 3.** Analisis sensitivitas untuk skenario #B



Gambar 4. Analisis sensitivitas untuk skenario #C

#### 4. Kesimpulan

Hasil perhitungan dengan menggunakan Pohon Keputusan dan analisis sensitivitas tersebut memberikan beberapa kesimpulan umum. Pada probabilitas harga solar yang lebih tinggi, pemanfaatan stillage dengan sistem trucking menjadi alternatif yang kurang menarik. Alternatif lain, yaitu pengolahan stillage dengan menggunakan kolam stabilisasi dan aerator mekanis, pengolahan menggunakan reaktor biogas, atau membangun kolam penyimpanan tambahan, adalah beberapa alternatif yang juga tidak direkomendasikan. Membangun kolam penampungan tambahan jelas merupakan alternatif yang harus dihindari. Aplikasi stillage menggunakan pipa dan sistem truk nampaknya menjadi pilihan yang lebih menjanjikan untuk hampir semua kondisi potensi bencana serta perubahan harga bahan bakar.

Seperti yang disebutkan oleh [13], Pohon Keputusan adalah cara untuk menyederhanakan masalah yang kompleks dan merupakan cara untuk memberikan pandangan yang lebih jelas kepada pengambil keputusan tentang kemungkinan solusi yang harus mereka buat. Perangkat lunak XLTree™ yang dioperasikan dengan Microsoft® Excel® digunakan untuk menghasilkan model ini. Program ini memungkinkan pengguna untuk membangun struktur Pohon Keputusan dan memasukkan nilai ke pohon dengan cara yang sederhana, namun mampu memberikan hasil yang dapat dianalisis dengan cepat. Kemampuan untuk memasukkan ketidakpastian dalam Pohon Keputusan membuat model ini menjadi alat yang sederhana namun kuat. Meskipun demikian, hasil yang keluar dari model bergantung pada struktur model dan masukan yang diberikan pada model. Analisis yang cermat dan hati-hati harus dilakukan untuk mengetahui nilai dari setiap alternatif sebelum dapat digunakan dalam model. Dalam tulisan ini, semua angka adalah hasil perkiraan, oleh karena itu, akan memberikan hasil yang berbeda jika menggunakan angka sebenarnya.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] R. Juwita, Studi Produksi Alkohol Dari Tetes Tebu (*Saccharum officinarum* L) Selama Proses Fermentasi. *Skripsi Universitas Hasanudin Makassar*. 2012.
- [2] A. K. Wardani and F. N. Eka Pertiwi, "Produksi Etanol dari Tetes Tebu oleh *Saccharomyces cerevisiae* Pembentuk Flok (NRRL – Y 265)," *agriTECH*, vol. 33, no. 2, pp. 131–139, 2013, doi: 10.22146/agritech.9810.
- [3] Núñez Caraballo, A., Iliná, A., Ramos González, R., Aguilar, C. N., Michelena Álvarez, G., Flores Gallegos, A. C., ... & Martínez-Hernández, J. L. Sustainable Ethanol Production From Sugarcane

- Molasses by *Saccharomyces cerevisiae* Immobilized on Chitosan-Coated Manganese Ferrite. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 175. 2021.
- [4] A. C. Wilkie, K. J. Riedesel, and J. M. Owens, "Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks," *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, no. 2, pp. 63–102, 2000, doi: 10.1016/S0961-9534(00)00017-9.
- [5] Y. Yang, K. Boots, and D. Zhang, "A sustainable ethanol distillation system," *Sustainability*, vol. 4, no. 1, pp. 92–105, 2012, doi: 10.3390/su4010092.
- [6] A. Choonut, T. Yunu, N. Pichid, and K. Sangkharak, *Ethanol Production from Reused Liquid Stillage*, vol. 79. Elsevier B.V., 2015.
- [7] Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2014, tentang Baku Mutu Air Limbah*. 2014, pp. 1–83.
- [8] RHIhub, "Ethanol Plant Disaster Creates Environmental and Human Health Concerns for Rural Community in Mead, Nebraska – RHIhub Emergency Preparedness Toolkit." <https://www.ruralhealthinfo.org/toolkits/emergency-preparedness/case-studies/chemical-emergencies/mead-nebraska> (accessed Dec. 01, 2022).
- [9] I. P. Willington and G. G. Marten, "Options for handling stillage waste from sugar-based fuel ethanol production," *Resour. Conserv.*, vol. 8, pp. 111–129, 1982.
- [10] A. Walter *et al.*, "Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects," *Energy Policy*, vol. 39, pp. 5703–5716, 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2010.07.043.
- [11] C. E. R. Reis and B. Hu, "Vinsasse from sugarcane ethanol production: Better treatment or better utilization?," *Front. Energy Res.*, vol. 5, no. APR, pp. 1–7, 2017, doi: 10.3389/fenrg.2017.00007.
- [12] B. De Ville, "Decision trees," *Wires Comput Stat*, vol. 5, pp. 448–455, 2013, doi: 10.1002/wics.1278.
- [13] Baig, U., & Khalidi, M. A. A grounded theory exploration of appraisal process of capital investment decisions—Capex appraisal model (CAM). *Independent Journal of Management & Production*, 11(7), 2778-2804. 2020.
- [14] T. Norberg, O. Bergstedt, A. Lindhe, and L. Rose, "Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems," *Water Res.*, vol. 43, no. 6, pp. 1641–1653, 2009, doi: 10.1016/j.watres.2008.12.034.
- [15] J. K. S. Meza, D. O. Yepes, J. Rodrigo-ilarri, and E. Cassiraga, "Predictive analysis of urban waste generation for the city of Bogota, Colombia, through the implementation of decision trees-based machine learning, support vector machines and artificial neural networks," *Heliyon*, vol. 5, no. November, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02810.
- [16] Bertrand, G., Petelet-Giraud, E., Cary, L., Hirata, R., Montenegro, S., Paiva, A., ... & Almeida, C. Delineating groundwater contamination risks in southern coastal metropolises through implementation of geochemical and socio-environmental data in decision-tree and geographical information system. *Water Research*, 209, 117877. 2022.
- [17] T. Moon, Y. Kim, H. Kim, M. Choi, and C. Kim, "Fuzzy rule-based inference of reasons for high effluent quality in municipal wastewater treatment plant," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 817–824, 2011, doi: 10.1007/s11814-010-0428-8.
- [18] D. J. Batstone and P. D. Jensen, "Anaerobic Processes," *Water Environ. Res.*, vol. 84, no. 10, pp. 615–639, 2012, doi: 10.1016/B978-0-444-53199-5.00097-X.
- [19] S. Bansal, P. Imas, and J. Nachmansohn, "The Impact of Potassium Fertilization on Sugarcane Yields: A Comprehensive Experiment of Pairwise Demonstration Plots in Uttar Pradesh, India," *e-ife*, vol. 54, no. September, pp. 13–20, 2018.