

# Analisis dan Perancangan Sistem Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Metode Klasifikasi – *Decision Tree*

<sup>1</sup>Efri Yulistika, <sup>2</sup>Muhammad Rahmad Ramadhan, <sup>3</sup>Desta Ria Erika, <sup>4</sup>Baihaqi Baihaqi  
<sup>1, 2, 3</sup>Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Insan Cita Indonesia (UICI), Graha Binakarsa, Lantai 10, Jalan H.R. Rasuna Said Kav. C-18, Jakarta Selatan, Indonesia.  
<sup>4</sup>Jurusan Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo, Kampus Bumi Tridharma Anduonohu, Jalan H.E.A. Mokodompit, Kota Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia.  
<sup>1</sup>[efriyulistika0798mail.com](mailto:efriyulistika0798mail.com), <sup>2</sup>[rahmad.mx30@gmail.com](mailto:rahmad.mx30@gmail.com), <sup>3</sup>[dete.vei7@gmail.com](mailto:dete.vei7@gmail.com),  
<sup>4</sup>[baihaqi@uho.ac.id](mailto:baihaqi@uho.ac.id)

Submit : 10 Okt 25 | Diterima : 19 Okt 2025 | Terbit : 23 Okt 2025

## ABSTRAK

Klasifikasi kualitas hasil pengolahan limbah cair tahu sangat dibutuhkan untuk memudahkan proses pemantauan pengolahan limbah cair tahu. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis komponen dan pemodelan sistem guna membantu pengambilan keputusan akhir dari limbah cair tahu yang telah diolah dengan pendekatan *Model Base System Engineering* (MBSE) serta mengembangkan desain sistem klasifikasi untuk standar kualitas akhir limbah industri tahu menggunakan algoritma *Decision Tree-ID3*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pengolahan limbah cair yang diterapkan pada penelitian ini terdiri dari empat tahapan utama, yaitu pre-treatment, proses anaerobik, proses aerobik, dan proses kontrol (*biotope pond*). Pada proses kontrol di kolam biotop akan dipasang sensor untuk mengukur atribut BOD, COD, TSS, dan pH. Data sensor ini akan digunakan untuk membuat keputusan berdasarkan standar kualitas limbah industri, guna menentukan apakah hasil pengolahan limbah sudah "layak" untuk dibuang ke lingkungan atau "tidak layak" sehingga perlu diproses ulang di kolam anaerobik. Berdasarkan pemodelan dengan metode klasifikasi *Decision Tree-ID3*, atribut yang paling berpengaruh adalah COD <301, diikuti oleh BOD <150, kemudian *decision* pH  $\geq 5,5$ , dan TSS <100. Nilai variabel penting masing-masing atribut adalah COD sebesar 27,11, BOD sebesar 19,17, pH sebesar 16,12, dan TSS sebesar 9,32. Hasil perhitungan dalam penelitian ini menunjukkan nilai akurasi sebesar 90%, presisi 87%, sensitivitas/*recall* 100%, dan spesifisitas 67%, dengan predikat klasifikasi yang sangat baik.

**Kata Kunci:** *Decision Tree*, Klasifikasi, *Model-Based Systems Engineering* (MBSE), Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu

## PENDAHULUAN

Tahu adalah pangan olahan berbasis kedelai dengan kandungan protein tinggi, profil asam amino yang lengkap serta mudah diserap oleh tubuh (Indrawijaya et al., 2017). Data BPS (2020) menunjukkan bahwa pada tahun 2021 konsumsi tahu rata-rata per kapita mencapai 0,158 kg per minggu. Secara umum, tahapan atau metode produksi tahu pada industri skala kecil relatif sama; variasi umumnya hanya pada urutan kerja atau jenis koagulan protein yang dipakai. Secara garis besar, proses pembuatan tahu terdiri dari beberapa tahap, yaitu pencucian, perendaman, penggilingan, pemasakan, penyaringan, penggumpalan, serta pengepresan atau pencetakan (Supartono et al., 2020; Sari et al., 2021; Amri & Widayatno, 2023; Yulistika et al., 2023).

Saat ini, industri tahu berkembang pesat di berbagai wilayah Indonesia. Sebagian besar di antaranya berskala kecil sehingga proses produksi masih mengandalkan teknologi sederhana dan umumnya belum dilengkapi unit pengolahan air limbah. Limbah cair tahu mengandung bahan organik tinggi, dengan kisaran BOD 6.000–8.000 mg/L dan COD 7.500–14.000 mg/L (Wang et al., 2018). Selain itu, limbah cair tahu memuat beragam senyawa organik serta gas antara lain oksigen (O<sub>2</sub>), hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), amonia (NH<sub>3</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan metana (CH<sub>4</sub>) (Anggraini

et al., 2020). Fraksi organiknya meliputi sekitar karbohidrat 25–50%, protein 40–60%, lemak dan minyak  $\pm 10\%$ , serta unsur hara nitrogen (N), kalium (K) dan fosfor (P) (Wang et al., 2018; Anggraini et al., 2020). Pembuangan langsung limbah dengan beban organik tinggi ke badan air dapat menurunkan kualitas perairan dan melemahkan daya dukung ekosistem akuatik.

Salah satu pendekatan yang efektif untuk menurunkan beban bahan organik tinggi pada air limbah adalah pengolahan biologis bertahap anaerob–aerob. Keberhasilan pengolahan limbah cair industri tahu diindikasikan oleh kualitas efluen yang memenuhi baku mutu sebagaimana ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014, yakni COD  $\leq 150$  mg/L, BOD  $\leq 300$  mg/L, TSS  $\leq 100$  mg/L, serta pH 6-9 (Kementerian Lingkungan Hidup, 2014). Keberhasilan tersebut dapat ditunjang oleh teknologi pengolahan yang memadai. Selain itu, untuk mempercepat dan memudahkan penilaian hasil pengolahan limbah, dapat ditambahkan sensor sesuai kebutuhan yang diintegrasikan dengan sistem klasifikasi atas hasil pengolahan. Klasifikasi adalah metode dalam penambangan data (data mining) yang digunakan untuk mengelompokkan data ke dalam kategori atau kelas yang sudah ditentukan sebelumnya. Klasifikasi juga diartikan sebagai proses analisis data yang menghasilkan suatu model untuk merepresentasikan kelas-kelas yang ada dalam data (Han et al., 2012). Dalam pendekatan klasifikasi, pengelompokan data dibangun melalui penerapan algoritma tertentu pada himpunan data yang dikaji; model hasilnya disebut *classifier*. *Classifier* inilah yang kemudian digunakan untuk menetapkan kelas pada data, misalnya dengan metode Pohon Keputusan (*Decision Tree*) (Sutoyo, 2018).

*Decision tree* adalah struktur menyerupai bagan alir: setiap node internal merepresentasikan pengujian atas suatu atribut, setiap cabang menyatakan hasil pengujian tersebut, sedangkan node daun memuat label kelas (Han et al., 2012). Metode ini memadukan eksplorasi data dan pemodelan, sehingga efektif sebagai langkah awal pengembangan model dan kerap pula dipilih sebagai model akhir dibandingkan sejumlah teknik lain (Bahri & Lubis, 2020). Proses pembentukan pohon keputusan mentransformasikan data bertabel menjadi model pohon yang menurunkan seperangkat aturan dan menyederhanakan representasi pengetahuan (Basuki & Syarif, 2003). Pada tiap cabang dinyatakan kondisi yang harus dipenuhi, sementara pada setiap pucuk/daun pohon tercantum nilai kelas data (Romdhoni, 2020). Dengan demikian, pengelompokan ditampilkan dalam bentuk pohon keputusan yang mudah dipahami (Robianto et al., 2021). Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis komponen dan memodelkan sistem pendukung pengambilan keputusan mutu efluen limbah cair tahu menggunakan pendekatan *Model-Based Systems Engineering* (MBSE), serta merancang sistem klasifikasi untuk penilaian kesesuaian baku mutu limbah cair industri tahu setelah pengolahan dengan menerapkan algoritma *decision tree*.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Teknologi Pengelolaan Limbah Industri Tahu: Anaerob-Aerob

Pengolahan limbah cair industri tahu pada umumnya menggunakan proses biologis karena beban bahan organiknya tinggi. Salah satu pendekatan yang lazim diterapkan ialah pengolahan biologis bertahap anaerob–aerob. Contoh penerapannya terdapat pada industri tahu Tandang, Semarang. Berdasarkan penelitian Kaswinarni (2007), aliran limbah dari proses produksi dialirkan melalui jaringan pipa menuju tahapan pra-pengolahan. Pada tahap ini, sebelum memasuki bak penyeimbang (*equalization tank*), limbah terlebih dahulu melewati saringan jeruji (*bar screen*) untuk memisahkan kotoran berukuran besar agar tidak mengganggu proses berikutnya. Di dalam bak penyeimbang, waktu tinggal hidraulik (*hydraulic retention time*, HRT) dioperasikan selama  $\pm 31$  jam (Kaswinarni, 2007).

Selanjutnya, limbah dipompa ke reaktor anaerob untuk memasuki tahap pengolahan tanpa oksigen. Unit yang digunakan adalah *Anaerobic Baffle Methane Fermentation Tank* (ABMFT) dengan HRT  $\pm 14$  hari. Secara prinsip, ABMFT memfasilitasi degradasi anaerobik bahan organik di dalam tangki tertutup. Di dalamnya dipasang sekat (*baffle*) vertikal yang membentuk aliran naik dan turun guna memperluas area kontak dan meningkatkan efisiensi dekomposisi oleh bakteri anaerob. Produk utama proses ini berupa gas metana (CH<sub>4</sub>), yang dialirkan melalui pipa gas pada bagian atas tangki. Setelah itu, efluen memasuki bak pengendap dengan HRT  $\pm 1,68$  jam (Kaswinarni, 2007).

Tahap berikutnya adalah aerasi di kolam aerasi; pada unit ini limbah memasuki pengolahan

aerob dengan HRT  $\pm 8,2$  jam. Karena kadar oksigen terlarut (DO) efluen pasca-anaerob cenderung mendekati nol, aerasi diperlukan untuk menaikkan DO. Aerator memasok udara ke kolam sehingga meningkatkan kontak oksigen dengan air; semakin besar kontak, semakin banyak oksigen yang terlarut. Aerasi efektif menurunkan senyawa penyebab bau seperti  $H_2S$  serta melepaskan  $CO_2$  terlarut dari air. Proses selanjutnya adalah pengendapan pada bak sedimentasi dengan HRT  $\pm 3,5$  jam untuk menurunkan kekeruhan. Tahap terakhir adalah pengendalian mutu (*quality control*) guna memastikan bahwa efluen yang dilepas ke lingkungan memenuhi baku mutu yang ditetapkan (Kaswinarni, 2007). Lesmana dan Ayu (2019) mendefinisikan kualitas pelayanan sebagai konsep yang merepresentasikan inti kinerja layanan, yakni perbandingan tingkat excellence (keandalan) layanan dengan pengalaman pelanggan pada saat interaksi layanan (*service encounter*). Sementara itu, Krisdanti dan Sunarti (2019) menunjukkan bahwa aspek-aspek kualitas pelayanan, meliputi bukti fisik, daya tanggap, keandalan, jaminan, dan empati, memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kepuasan konsumen, baik secara bersama-sama maupun secara terpisah.

### **Data Mining**

*Data mining* merupakan proses mengekstraksi informasi atau pola yang relevan dan bernilai dari himpunan data berukuran besar. Dalam khazanah ilmiah, data mining kerap disebut sebagai Knowledge Discovery in Databases (KDD) (Susanti, 2014). Secara operasional, data mining mencakup upaya menemukan pengetahuan yang bermakna seperti asosiasi, pola perubahan, struktur yang signifikan, serta anomali dari data skala besar yang tersimpan dalam basis data maupun repositori informasi lainnya (Han et al., 2006). Beragam teknik yang lazim dibahas meliputi *clustering*, *classification*, *association rule mining*, *neural networks*, dan *genetic algorithms* (Lindawati, 2008).

### **Classification**

*Classification* adalah metode dalam data mining yang digunakan untuk menempatkan data ke dalam kategori atau kelas yang telah ditentukan sebelumnya. Selain itu, klasifikasi dapat diartikan sebagai proses analisis data yang bertujuan membangun model yang merepresentasikan kelas-kelas yang ada dalam data tersebut (Han et al., 2006). Metode klasifikasi merujuk pada pembentukan kelompok data melalui penerapan algoritma tertentu pada data warehouse yang dikaji. Model yang dihasilkan disebut classifier, yakni model yang digunakan untuk membentuk atau menurunkan kelas-kelas dalam data, misalnya melalui Pohon Keputusan (*Decision Tree*) (Sutoyo, 2018).

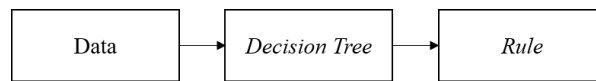
Metode ini berguna dalam proses bisnis yang membutuhkan informasi kategorikal—misalnya pada fungsi pemasaran dan penjualan serta dapat diterapkan dengan beragam algoritma, seperti k-nearest neighbors, pembelajaran pohon keputusan, dan lainnya. *Decision tree* khususnya efektif untuk eksplorasi data karena mampu mengungkap keterkaitan tersembunyi antara berbagai variabel masukan potensial dan variabel target. *Decision tree* menggabungkan antara eksplorasi serta pemodelan sehingga sangat baik digunakan sebagai langkah awal proses pemodelan, bahkan kerap dipilih sebagai model akhir dibandingkan beberapa teknik lainnya (Bahri dan Lubis, 2020).

### **Decision Tree**

*Decision Tree* merupakan metode pengambilan keputusan berbasis klasifikasi yang memanfaatkan struktur hierarkis menyerupai pohon. Setiap node internal merepresentasikan pengujian terhadap suatu atribut, cabang menyatakan hasil/pelebaran dari pengujian tersebut, sedangkan daun (*leaf*) menggambarkan kelas keluaran. Node akar (*root node*) adalah node teratas pada pohon. Masing-masing node pemisah (*splitting node*) menerima satu masukan dan memiliki sedikitnya dua keluaran (Harryanto dan Hasun, 2017). *Node* daun merupakan *node* terminal yang hanya memiliki satu masukan dan tidak memiliki keluaran, pada *node* ini tercantum label kelas. Dengan demikian, pada setiap cabang tercantum kondisi yang harus dipenuhi, dan pada setiap pucuk pohon tercantum nilai/label kelas data (Romdhoni, 2020).

Proses dalam pohon keputusan mengubah data bertabel menjadi model pohon. Model pohon ini kemudian menurunkan seperangkat aturan (*rules*) yang menyederhanakan representasi pengetahuan (Basuki dan Syarif, 2003). Dalam pendekatan ini, himpunan data yang telah

dikelompokkan juga disajikan dalam bentuk pohon keputusan sehingga lebih mudah dipahami (Tusyakdiah, 2020). Konsep dan struktur *decision tree* dapat dilihat pada Gambar 1.

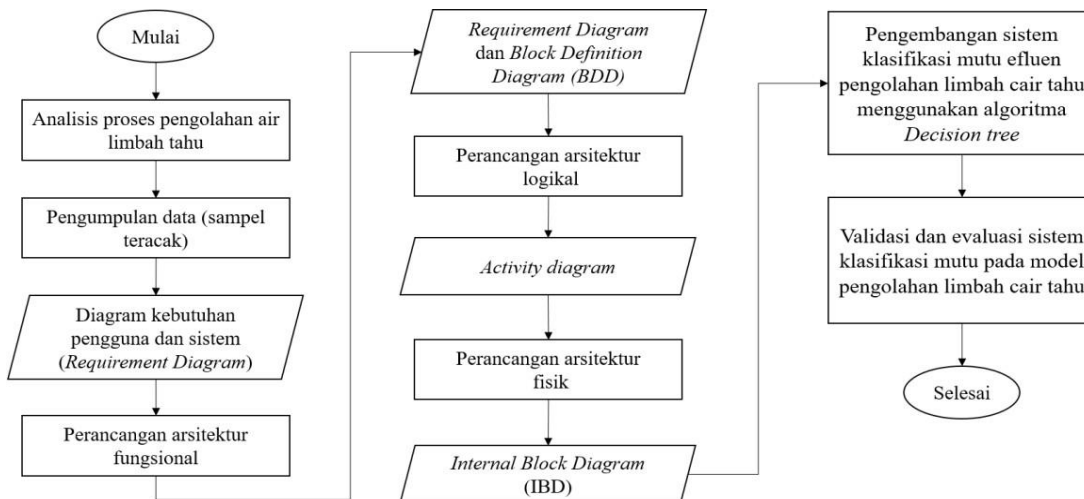


Gambar 1. Konsep dan struktur *decision tree* (Bahri dan Lubis, 2020)

## METODE PENELITIAN

### Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini disajikan pada Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Kerangka pemikiran penelitian

### Sistem Pengelolaan Limbah Tahu

Sistem pengolahan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan proses biologis yang mengombinasikan tahapan anaerob dan aerob. Secara inti, proses terdiri atas empat tahap: 1) pra-pengolahan, 2) pengolahan anaerob, 3) pengolahan aerob, dan 4) pengendalian/monitoring mutu. Pada setiap tahap dilakukan analisis komponen untuk mengidentifikasi bagian yang perlu dimodifikasi agar penentuan klasifikasi mutu hasil pengolahan limbah cair industri tahu menjadi lebih efisien dan andal.

### Klasifikasi dengan Menggunakan *Decision Tree*

Proses klasifikasi menggunakan metode *Decision Tree*–ID3 pada perangkat lunak R dalam penelitian ini terdiri atas beberapa langkah (Tusyakdiah, 2020), yaitu:

1. Menyiapkan dataset yang akan digunakan, mencakup data kadar BOD, COD, TSS, dan pH, serta label hasil klasifikasi.
2. Memanggil *dataset* dengan perintah berikut.

```
data10=read.delim("clipboard")
data10
```

3. Membagi dataset menjadi dua bagian dengan rasio 80:20—80% sebagai data latih (*training*) dan 20% sebagai data uji (*testing*).

```
n <- round(nrow(data10)*0.80);n
set.seed(200)
samp=sample(1:nrow(data10),n)
data.train = data10[samp,]
data.test = data10[-samp,]
dim(data.train)
dim(data.test)
```

4. Membangun model klasifikasi Pohon Keputusan (ID3) menggunakan data latih.

```
fit <- rpart(klasifikasi~., data = data.train, method = 'class')
summary(fit)
fit$variable.importance
barplot(fit$variable.importance)
```

5. Buat plot pohon keputusan dengan perintah berikut.  

```
fancyRpartPlot(fit)
```
6. Memprediksi data uji, menentukan variabel penting, dan menghitung akurasi.  

```
prediksi = predict(fit, newdata = data.test, type = "class")
table(prediksi, data.test$klasifikasi)
confusionMatrix(data = prediksi, reference = data.test$klasifikasi)
```

### Accuracy Assessment

Akurasi adalah proporsi prediksi yang benar terhadap keseluruhan observasi, sedangkan error rate merefleksikan tingkat salah-klasifikasi, yakni proporsi prediksi yang keliru dari total data. Ukuran akurasi dilengkapi oleh presisi, yaitu persentase prediksi positif yang benar dari seluruh prediksi positif yang dihasilkan model. Kriteria penilaian akurasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria penilaian akurasi

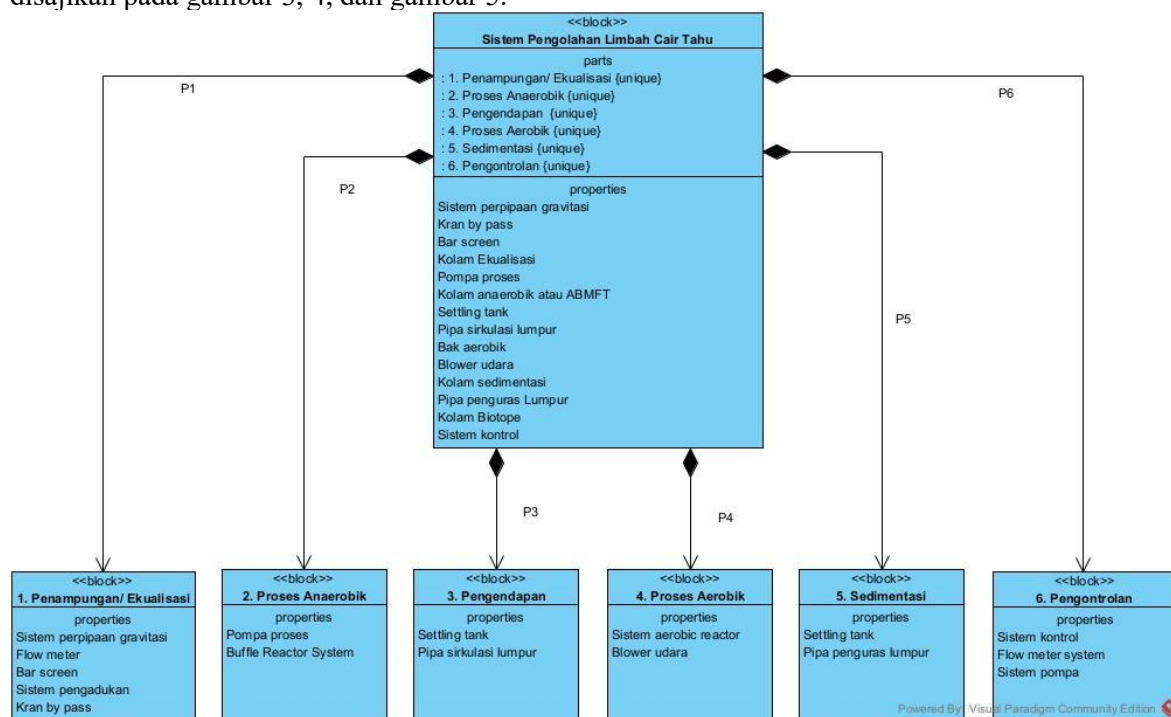
Akurasi	Keterangan
50-60%	Failure Classification
60-70%	Poor Classification
70-80%	Fair Classification
89-90%	Good Classification
90-100 %	Excellent Classification

Sumber: Gorunescu (2011)

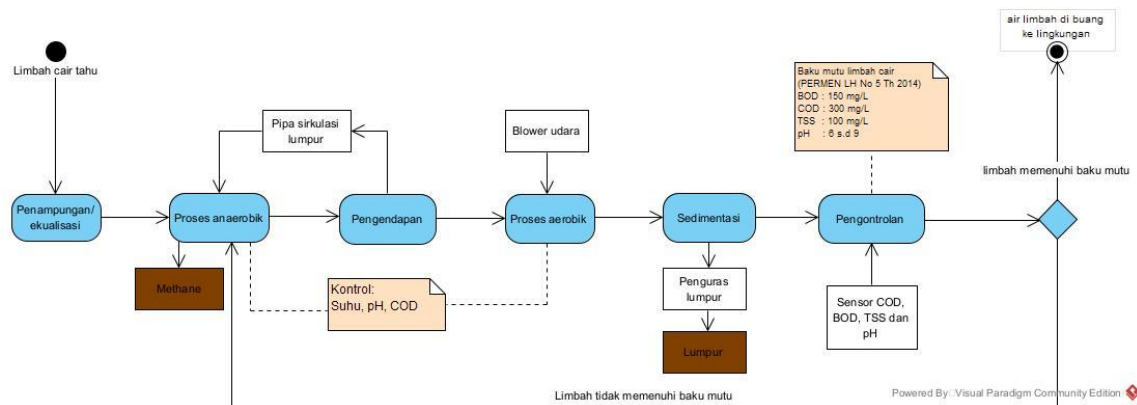
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Sistem Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu

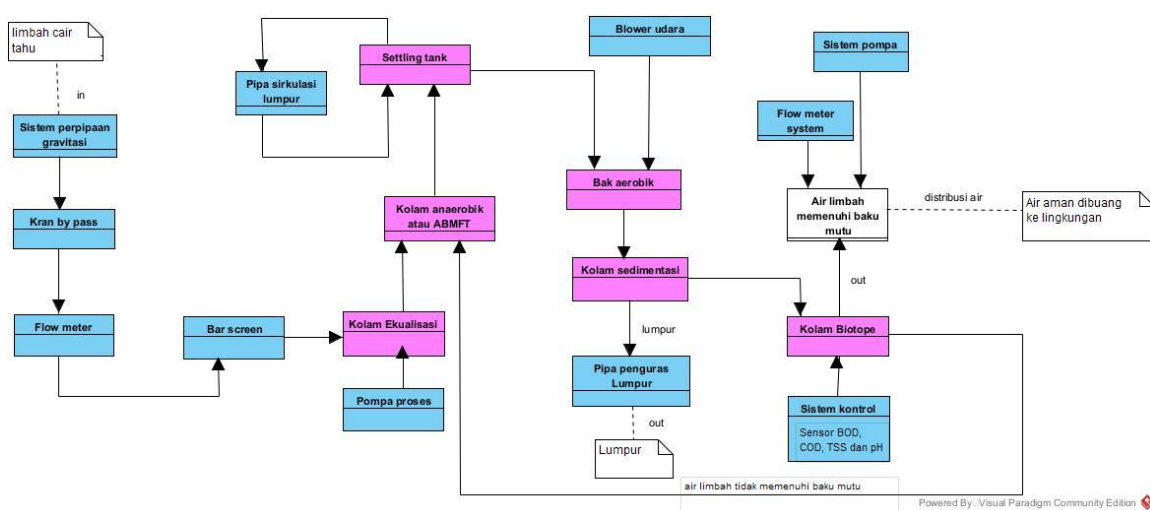
Sistem pengolahan yang digunakan dalam penelitian ini berbasis batch dengan empat tahapan utama: 1) pra-pengolahan, 2) proses anaerob, 3) proses aerob, dan 4) pengendalian melalui kolam biotop. Untuk menyederhanakan dan mempercepat proses pemantauan serta pengendalian mutu, sistem dilengkapi perangkat sensor sehingga akuisisi data lebih efektif dan respons operasional lebih cepat. Sensor yang dipasang meliputi: sensor BOD (*Proteus Multiparameter BOD Sensor*), sensor COD (*Chemical Oxygen Demand Analyzer Sensor*), sensor TSS (*Total Suspended Solids Analyzer RS485*), dan sensor pH. Proses pengolahan limbah industri tahu disajikan pada gambar 3, 4, dan gambar 5.



Gambar 3 Arsitektur fungsional sistem pengolahan limbah cair tahu anaerob-aerob



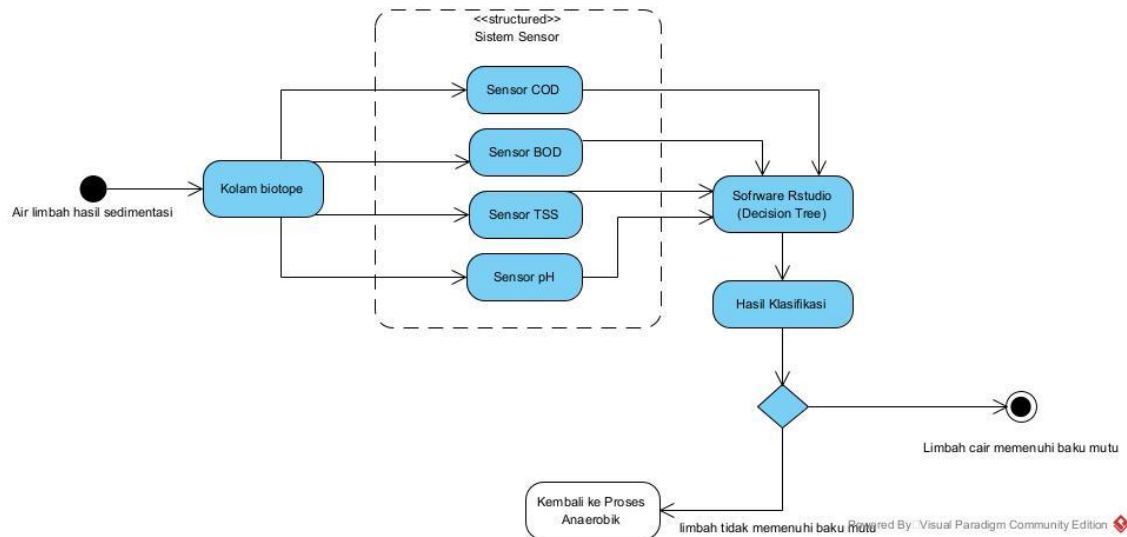
Gambar 4. Aliran fungsional sistem pengolahan limbah cair tahu anaerob–aerob



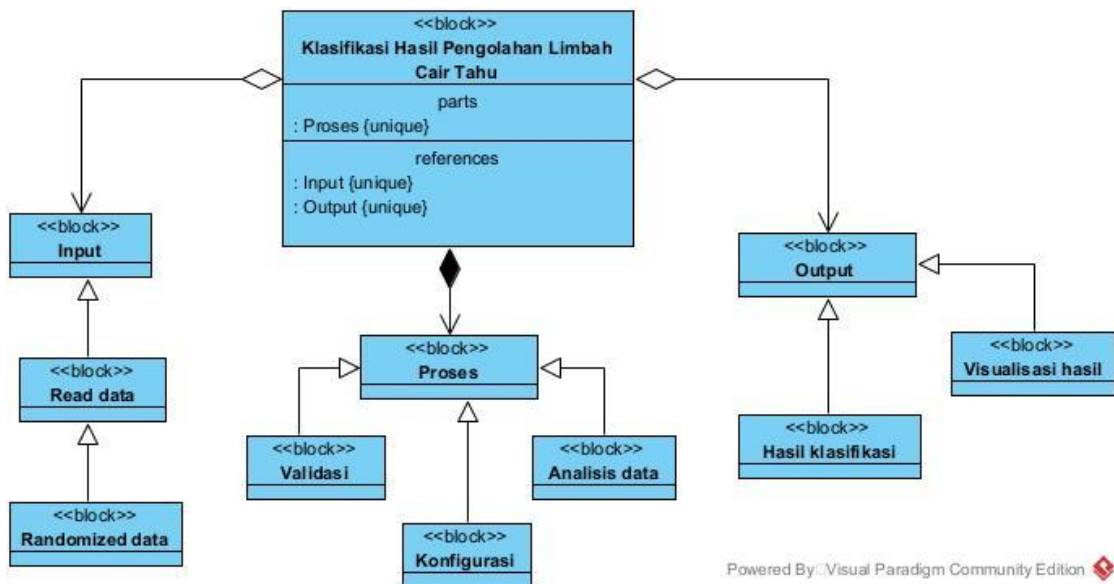
Gambar 5. Arsitektur logikal sistem pengolahan limbah cair tahu anaerob–aerob

Pada gambar 3 memperlihatkan bahwa sistem pengolahan limbah cair industri tahu terdiri atas beberapa tahapan proses, yaitu penyimpanan/penyeimbangan (*storage/equalization*), proses anaerob, proses pengendapan (*deposition*), proses aerob, proses sedimentasi, dan pengendalian (*control*). Gambar 4 dan 5 menunjukkan bahwa sistem ini berjalan secara berurutan; artinya, apabila kriteria atribut/parameter pada suatu tahap telah terpenuhi, maka proses dilanjutkan ke tahap berikutnya.

Proses klasifikasi limbah cair industri tahu yang dilaksanakan pada tahap pengendalian/kolam biotop juga disajikan dalam bentuk *Activity Diagram* (atau aliran fungsional), *Block Definition Diagram* (BDD) atau arsitektur fungsional, dan *Internal Block Diagram* (IBD) atau arsitektur logikal, masing-masing ditampilkan pada gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Aliran fungsional sistem klasifikasi pengolahan limbah cair tahu menggunakan sensor



Gambar 7. Arsitektur fungsional sistem klasifikasi pengolahan limbah cair tahu mulai dari input, proses, dan output

Aliran fungsional proses klasifikasi pada sistem pengolahan (gambar 6) menunjukkan bahwa pada tahap pengendalian dipasang empat jenis sensor, yakni sensor COD, BOD, TSS, dan pH. Data yang diperoleh dari hasil pembacaan sensor kemudian divalidasi menggunakan metode pohon keputusan (*decision tree*) untuk mempermudah pengambilan keputusan. Hasil pengolahan selanjutnya diklasifikasikan menjadi “sesuai” untuk dibuang ke lingkungan atau “tidak layak”, yang dalam hal terakhir akan diproses ulang pada kolam anaerob.

### Klasifikasi menggunakan Metode *Decision Tree-ID3*

Klasifikasi hasil pengolahan limbah cair industri tahu bertujuan menilai apakah efluen telah memenuhi baku mutu dan layak dibuang ke lingkungan, atau tidak layak sehingga perlu diproses ulang pada kolam anaerob. Pengujian klasifikasi dengan metode pohon keputusan dilakukan menggunakan dataset yang merepresentasikan hipotesis keluaran proses pengolahan limbah cair tahu. Ukuran dataset adalah 200 entri dengan 4 atribut dan 1 label. Atribut yang digunakan disusun

mengacu pada baku mutu limbah cair industri tahu (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014). Proses klasifikasi selanjutnya diterapkan menggunakan algoritma *Decision Tree-ID3*.

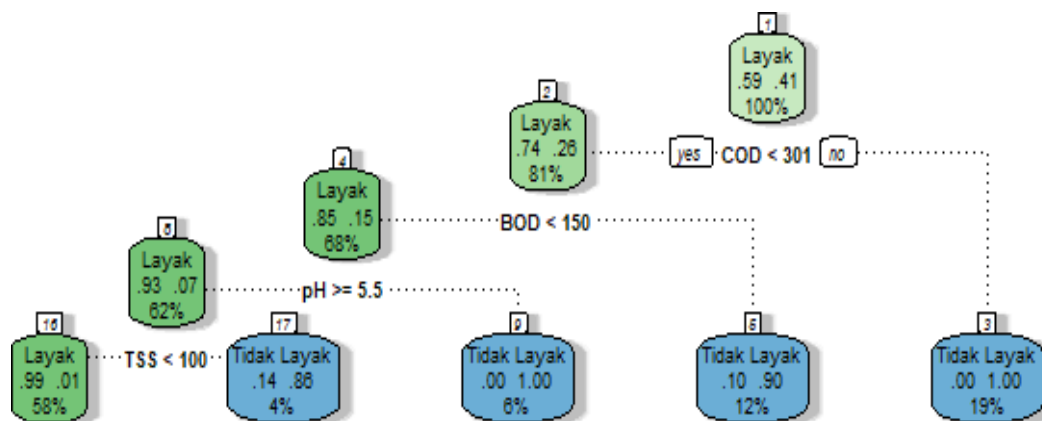
Alur klasifikasi dengan pohon keputusan dimulai dari: 1. memasukkan data yang akan digunakan untuk membangun *decision tree* (Gambar 8) dengan total 200 data yang terdiri atas 4 atribut dan 1 label; 2. membagi data menjadi dua bagian dengan rasio 80:20 (Gambar 9); 3. membangun model klasifikasi pohon keputusan menggunakan data latih; 4. membuat visualisasi/petak pohon keputusan (gambar 10); 5. melakukan prediksi pada data uji (gambar 11); dan 6. menentukan variabel penting (*feature importance*) yang berkontribusi terhadap keputusan model (gambar 12).

	BOD	COD	TSS	pH	klasifikasi
1	142	295	99	7	Layak
2	149	304	91	7	Tidak Layak
3	140	299	94	8	Layak
4	149	303	91	7	Tidak Layak
5	155	293	99	5	Tidak Layak

Gambar 8. Data untuk pembentukan pohon keputusan

```
> dim(data.train)
[1] 160 5
> dim(data.test)
[1] 40 5
```

Gambar 9. Hasil pembagian data latih dan data uji (80:20)

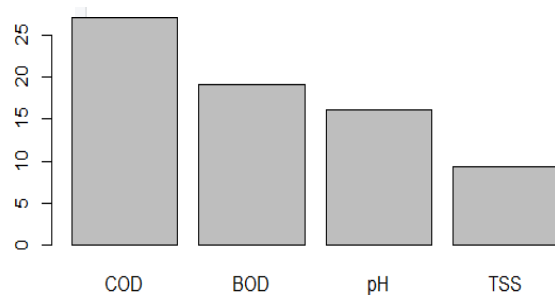


Gambar 10. Plot *decision tree*

prediksi	Layak	Tidak Layak
Layak	28	0
Tidak Layak	4	8

Gambar 11. Hasil prediksi pada data uji





Gambar 12. *Variable important*

Berdasarkan visualisasi tersebut, gambar 8 menyajikan dataset berisi 200 entri yang dipilih secara acak, terdiri atas 4 atribut (BOD, COD, TSS, pH) dan 1 label (klasifikasi). Pada gambar 9 menampilkan pembagian dataset menjadi data latih 80% (160 entri) dan data uji 20% (40 entri). Gambar 10 memperlihatkan pohon klasifikasi yang membentuk lima keputusan, dengan urutan pemisahan atribut:  $COD < 301$ , kemudian  $BOD < 150$ , diikuti  $pH \geq 5,5$ , dan  $TSS < 100$ . Selanjutnya, Gambar 11 menunjukkan hasil prediksi pada data uji dengan  $TP = 28$ ,  $FN = 0$ ,  $FP = 4$ , dan  $TN = 8$ , yang menghasilkan akurasi 90%, sensitivitas 100%, spesifisitas 67%, serta presisi 87%. Terakhir, Gambar 12 menampilkan tingkat kepentingan variabel (*feature importance*) secara berurutan:  $COD = 27,11$ ,  $BOD = 19,17$ ,  $pH = 16,12$ , dan  $TSS = 9,32$ .

## KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis komponen kunci dan memodelkan sistem pendukung pengambilan keputusan mutu efluen limbah cair tahu menggunakan pendekatan *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) yang tertuang dalam *requirement*, arsitektur fungsional dan logikal, serta aliran fungsional klasifikasi dan merancang serta mengevaluasi sistem klasifikasi kesesuaian baku mutu pasca pengolahan limbah dengan algoritma *Decision Tree-ID3* berbasis empat prediktor utama (BOD, COD, TSS, pH). Evaluasi model menggunakan *confusion matrix* menunjukkan kinerja unggul: akurasi 90%, presisi 87%, sensitivitas/rekal 100%, dan spesifisitas 67%, yang menegaskan reliabilitas model untuk mendukung keputusan “sesuai/tidak layak” efluen.

## REFERENSI

- Amri, A. A., & Widayatno, T. 2023. Penurunan Kadar BOD, COD, TSS, dan pH pada Limbah Cair Tahu dengan Menggunakan Biofilter. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 8(1), 6-10.
- Angraini, W., Zulfa, M., Prihantini, N. N., Batubara, F., & Indriyani, R. 2020. Utilization of tofu wastewater for the growth of red spinach (*Alternanthera amoena voss*) in floating raft hydroponic cultures. *Journal of Physics: Conference Series*, 1467, 012005. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1467/1/012005>.
- Bahri, S., & Lubis, A. 2020. Metode klasifikasi decision tree untuk memprediksi juara English Premier League. *Jurnal Sintaksis: Pendidikan Guru Sekolah Dasar, IPA, IPS, dan Bahasa Inggris*, 2(1), 63–70. <https://www.ojs.yayasanalmaksum.ac.id/index.php/Sintaksis/article/view/47/57>.
- Basuki, A., & Syarif, I. 2003. *Decision tree*. Surabaya: Politeknik Elektronika Negeri.
- Gorunescu, F. 2011. *Data mining: Concepts, models, and techniques*. Springer.
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. 2012. *Data mining: Concepts and techniques* (3rd ed.). Waltham, USA: Morgan Kaufmann Publishers..
- Han, J., & Kamber, M. 2006. *Data mining: Concepts and techniques*. Elsevier.
- Harryanto, F.F., & Hasun S. 2017. Penerapan Algoritma C4.5 untuk Memprediksi Penerimaan Calon Pegawai Baru di PT WISE. *Palembang. Jatisi* 3(2). <https://jurnal.mdp.ac.id/index.php/jatisi/article/view/71/44>.
- Indrawijaya, B., Paradiba, A., & Murni, S. A. 2017. Uji organoleptik dan tingkat ketahanan produk tahu berpengawet kitosan. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia UNPAM*, 1(2), 1–7.
- Lindawati. 2008. *Data Mining dengan Teknik Clustering dalam Pengklasifikasian Data Mahasiswa Studi Kasus*

- Prediksi Lama Studi Mahasiswa Universitas Bina Nusantara, Seminar Nasional Informatika (semnasIF 2008), ISSN :1979-2328.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup. 2014. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014.
- Robianto, Sitorus, S. H., & Ristian, U. 2021. Penerapan metode decision tree untuk mengklasifikasikan mutu buah jeruk berdasarkan fitur warna dan ukuran. *Jurnal Komputer dan Aplikasi*, 9(1), 76–86.
- Romdhoni, N. F. 2020. Deteksi kualitas kacang kedelai melalui pengolahan citra digital dengan metode Gray-Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) dan klasifikasi decision tree. *SENARIS*, Bandung.
- Sari, I. P., Kuniawan, W., & Sia, F. L. 2021. Environmental impact of tofu production in West Jakarta using a life cycle assessment approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 896(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/896/1/012050>.
- Supartono, W., Fiwa, A.S., Sinthia, I.D., Saptari, K.P., Farhan, M.S., Rizky, M.R. 2020. Implementation of life cycle assessment on tempeh production at "Tempe Ibu Sujati", Yogyakarta. *Agroindustrial Journal*, 7(2), 496–500. <https://doi.org/10.22146/aij.v7i2.64650>.
- Susanto H. 2014. Data Mining untuk Memprediksi Prestasi Siswa Berdasarkan Sosial Ekonomi, Motivasi, Kedisiplinan dan Prestasi Masa Lalu. *Jurnal Pendidikan Vokasi* 4(2): 222-231. <https://doi.org/10.21831/jpv.v4i2.2547>.
- Sutoyo, I. 2018. Implementasi algoritma decision tree untuk klasifikasi data peserta didik. *Jurnal PILAR Nusa Mandiri*, 14(2), 217–224.
- Tusyakhiah, H. 2020. Klasifikasi dengan decision tree menggunakan R. Diakses dari <https://halimatusyak.medium.com/klasifikasi-decision-tree-dengan-r-f12a0e48e060>. pada 11 Juni 2025.
- Yulistika E, Suprihatin, Purwoko. 2023. Potensi Penerapan Konsep Ekonomi Sirkular untuk Pengembangan Industri Tahu yang Berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 33(3), 254-266. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2023.33.3.254>.
- Wang, S., Wang, X., Miao, J., & Tian, Y. 2018. Tofu whey wastewater is a promising basal medium for microalgae culture. *Bioresource Technology*, 253, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.012>.