

ON DETERMINING MANINJAU LAKE WATER QUALITY STATUS USING THE TSUKAMOTO AND MAMDANI METHODS

SEPTI RAHMA DELLA, ADMI NAZRA,* I MADE ARNAWA

*Departemen Matematika dan Sains Data,
FMIPA Universitas Andalas,
email : dellaaa0209@gmail.com, nazra@sci.unand.ac.id, arnawa1963@gmail.com*

Diajukan 6 Agustus 2024 Direvisi 26 September 2025 Diterima 27 Oktober 2025
Diterbitkan 31 Oktober 2025

Abstrak. Pada penelitian ini digunakan dua metode logika fuzzy, yaitu metode Tsukamoto dan metode Mamdani dalam membuat sebuah model penentuan status mutu air Danau Maninjau. Variabel *input* yang digunakan meliputi suhu air, pH, DO (*Dissolved Oxygen*), TSS (*Total Suspended Solid*), TDS (*Total Dissolved Solid*), BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), NO_2 , dan NO_3 yang dibagi ke dalam dua kategori himpunan fuzzy, yaitu AMAN dan TIDAK AMAN. Variabel *output* yaitu status mutu air yang dibagi ke dalam empat kategori himpunan fuzzy berdasarkan kriteria status mutu air, yaitu memenuhi baku mutu (MBM), cemaran ringan (CR), cemaran sedang (CS), dan cemaran berat (CB). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model status mutu air pada metode Tsukamoto menghasilkan nilai MAPE sebesar 40% dan nilai MSE 0,472, sedangkan pada metode Mamdani menghasilkan nilai MAPE sebesar 42% dan nilai MSE 0,678.

Kata Kunci: Metode Mamdani, metode Tsukamoto, Status mutu air

Abstract. In this article, two fuzzy logic methods are used, namely the Tsukamoto method and the Mamdani method, to create a model for determining the water quality status of Lake Maninjau. The input variables used include water temperature, pH, DO (Dissolved Oxygen), TSS (Total Suspended Solids), TDS (Total Dissolved Solids), BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), NO_2 , and NO_3 , which are divided into two categories of fuzzy sets, namely SAFE and UNSAFE. The output variable is water quality status, which is divided into four categories of fuzzy sets based on water quality status criteria, namely meeting quality standards (MBM), mildly polluted (CR), moderately polluted (CS), and severely polluted (CB). The results showed that the water quality status model in the Tsukamoto method produced a MAPE value of 40% and an MSE value of 0.472, while the Mamdani method produced a MAPE value of 42% and an MSE value of 0.678.

Keywords: Metode Mamdani, metode Tsukamoto, Status mutu air

*Penulis korespondensi

1. Pendahuluan

Danau adalah badan air pedalaman yang tidak memiliki pertukaran langsung dengan lautan. Ekosistem danau terdiri dari sifat fisik, kimia, dan biologis yang terkandung dalam badan air [1]. Salah satu ekosistem danau yang ada di Indonesia adalah Danau Maninjau yang terletak di provinsi Sumatera Barat.

Danau Maninjau memiliki fungsi yang strategis dan menguntungkan bagi masyarakat sekitar, seperti pembangkit listrik, pariwisata, sumber air irigasi, dan perikanan yang terus meningkat. Tingginya aktivitas di sekitar dan di perairan danau akan membawa bahan pencemar seperti limbah organik, residu pestisida, dan bahan anorganik yang mencemari air dan sedimen. Selain itu, aktivitas penduduk seperti permukiman, perhotelan, pertanian, dan peternakan, serta budidaya ikan dengan keramba jaring apung (KJA) juga menyumbang limbah yang dapat mencemari perairan danau [2].

Upaya untuk memantau dan mengendalikan pencemaran air danau adalah melakukan pengukuran dan analisis kualitas air danau, sebagaimana diatur dalam Peraturan Pemerintah no 22 tahun 2021. Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003, penentuan status mutu air dapat menggunakan metode indeks pencemaran (IP). Namun, metode IP yang kaku dapat mengubah kategori status mutu air akibat perubahan kecil pada nilai mutu air. Oleh karena itu, dapat digunakan himpunan fuzzy yang memberikan toleransi terhadap perubahan kecil dan menjaga konsistensi status mutu air.

Berdasarkan hal tersebut, maka pada artikel ini akan dibahas tentang model status mutu air Danau Maninjau menggunakan logika fuzzy, yaitu metode Tsukamoto dan Mamdani serta validitas keduanya. Hasil penelitian diharapkan dapat menciptakan sebuah model penentuan status mutu air yang efektif dan valid dengan kedua metode tersebut.

2. Landasan Teori

2.1. Indikator Penurunan Kualitas Air

Dalam penelitian ini terdapat sembilan indikator penurunan kualitas air yang digunakan dalam proses penentuan status mutu air. Indikator-indikator tersebut adalah sebagai berikut.

(1) Suhu Air

Suhu adalah indikator penting kualitas air karena mempengaruhi aktivitas biologi dan kelarutan gas. Peningkatan suhu meningkatkan viskositas, evaporasi, reaksi kimia, volatilitas, metabolisme, dan respirasi organisme air, yang meningkatkan konsumsi oksigen [3].

(2) pH

pH (Derajat Keasaman) adalah indikator kimia penting untuk pemantauan stabilitas perairan. Perubahan pH berdampak pada organisme akuatik. Penurunan pH akan menurunkan kualitas air dan mempengaruhi kehidupan biota air [3].

(3) DO (*Dissolved Oxygen*)

DO biasanya diukur dalam bentuk konsentrasi yang menyatakan jumlah oksigen

- (O_2) yang tersedia dalam suatu badan air. Semakin besar nilai DO pada air, mengindikasikan air tersebut memiliki kualitas yang bagus. Sebaliknya jika nilai DO rendah, dapat diketahui bahwa air tersebut telah tercemar [4].
- (4) TSS (*Total Suspended Solid*)
TSS adalah padatan yang menyebabkan kekeruhan air, tidak terlarut, dan tidak dapat mengendap. TSS terdiri dari lumpur, jasad renik, fitoplankton, zooplankton, kotoran hewan, sisa tanaman dan hewan mati, kotoran manusia, serta limbah industri yang terbawa ke dalam air. Materi tersuspensi ini mengurangi penetrasi matahari, meningkatkan kekeruhan, dan mengganggu pertumbuhan organisme air [4].
- (5) TDS (*Total Dissolved Solid*)
TDS adalah indikator pencemaran air yang sering dianalisis yang mencerminkan jumlah padatan terlarut atau konsentrasi ion dalam air yang umumnya berupa garam anorganik. Kadar TDS tinggi dapat menutupi pori-pori tanah, menghambat penetrasi sinar matahari, serta mengurangi regenerasi oksigen dan fotosintesis organisme air [4].
- (6) BOD (*Biological Oxygen Demand*)
BOD adalah jumlah oksigen yang diperlukan mikroba aerob untuk mengoksidasi bahan organik menjadi karbon dioksida dan air. Nilai BOD tinggi disebabkan oleh pembuangan limbah domestik yang meningkatkan kandungan bahan organik di perairan [3].
- (7) COD (*Chemical Oxygen Demand*)
COD adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air secara kimiawi. Angka COD tinggi menunjukkan banyaknya zat organik di air yang mengubah oksigen menjadi karbon dioksida dan air, dan menyebabkan air mengalami kekurangan oksigen. Kadar oksigen rendah menunjukkan tingkat pencemaran dari limbah domestik dan industri. Semakin rendah kadar oksigen, semakin besar jumlah pencemar organik di perairan [5].
- (8) Nitrit
Nitrit (NO_2) merupakan peralihan antara amoniak ke nitrat pada proses nitrifikasi dan proses denitrifikasi. Konsentrasi nitrit yang tinggi dapat mengakibatkan kematian ikan secara massal [6].
- (9) Nitrat
Nitrat (NO_3) penting dalam perairan karena diperlukan oleh fitoplankton. Kandungan nitrat yang tinggi dalam perairan dipengaruhi oleh masuknya materi organik melalui sungai. Oksigen terlarut yang tinggi mendorong bakteri mengoksidasi nitrogen menjadi nitrat [3].

2.2. Metode Tsukamoto

Berikut adalah tahapan-tahapan dalam metode Tsukamoto [7].

- (1) Pembentukan himpunan fuzzy.
Pada tahap ini, variabel *input* maupun *output* dibagi menjadi satu atau lebih kategori himpunan fuzzy. Pembentukan himpunan fuzzy digunakan untuk merancang fungsi keanggotaan dari masing-masing variabel *input* dan *output*.

(2) Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahapan untuk menentukan derajat keanggotaan pada variabel *input*. Derajat keanggotaan dibentuk berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah dirancang pada tahap pembentukan himpunan fuzzy untuk masing-masing variabel *input*.

(3) Pembentukan basis aturan (*rule base*)

Pada tahap ini, dibentuk aturan-aturan $[R_i]$ untuk menyatakan hubungan antara variabel *input* dan *output*. Setiap aturan $[R_i]$ adalah suatu implikasi. Operator *and* digunakan untuk menghubungkan masing-masing variabel *input* dan operator *if-then* untuk memetakan hubungan antara variabel *input* dan variabel *output*.

(4) Aplikasi implikasi

Aplikasi implikasi merupakan tahapan untuk menghubungkan setiap aturan fuzzy dengan hasil *output*. Pada tahapan ini, diambil nilai minimum dari derajat keanggotaan variabel *input* pada setiap aturan $[R_i]$ untuk mendapatkan nilai $\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i)$ seperti definisi berikut.

$$\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i) = \bigcap_{j=1}^n \mu_{e_{ij}}(x_j), \quad (2.1)$$

dimana:

$[R_i]$: Aturan fuzzy ke- i ,

k_i : Kategori *output* pada aturan ke- i ,

e_{ij} : Kategori *input* ke- j pada aturan ke- i ,

x_j : Nilai *crisp* dari variabel *input* ke- j ,

n : Banyaknya variabel *input*,

z_i : Nilai *crisp* dari *output* status mutu air pada aturan ke- i .

Setelah mendapatkan nilai $\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i)$ dari tiap-tiap aturan $[R_i]$, kemudian nilai tersebut digunakan untuk menghitung nilai *output* status mutu air (z_i) dari setiap aturan $[R_i]$ berdasarkan fungsi keanggotaan pada variabel *output* status mutu air.

(5) Defuzzifikasi Metode Tsukamoto

Tahap ini dilakukan untuk mendapatkan nilai *output* tunggal dengan cara mengubah himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy tersebut menjadi nilai *crisp* yang merepresentasikan status mutu air. Metode yang digunakan adalah metode rata-rata.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}, \quad (2.2)$$

dimana:

Z : Nilai *crisp* mutu air,

α_i : Nilai $\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i)$,

z_i : Nilai *crisp* dari *output* status mutu air pada aturan ke- i ,

n : Banyak aturan yang diperoleh.

2.3. Metode Mamdani

Tahapan untuk menentukan *output* dalam metode Mamdani sama seperti pada metode Tsukamoto. Perbedaannya terletak pada tahap agregrasi dan defuzzifikasi, sehingga penjelasan pada bagian ini langsung dimulai pada tahap agregrasi dan tahap defuzzifikasi sebagai berikut [7].

(1) Agregasi

Agregasi merupakan proses mengkombinasikan semua nilai $\alpha - \text{predikat}[[R_i]]_{k_i}(z_i)$ yang telah melewati tahapan aplikasi implikasi ke dalam bentuk grafik. Tujuan dari agregrasi ini untuk mendapatkan sebuah *output* tunggal pada tahap defuzzifikasi.

(2) Defuzzifikasi Metode Mamdani

Tahap ini dilakukan untuk mendapatkan nilai *output* tunggal dengan cara mengubah himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy tersebut menjadi nilai *crisp* yang merepresentasikan status mutu air. Metode yang digunakan dalam defuzzifikasi ini, yaitu metode *centroid*. Metode ini mengambil titik pusat daerah fuzzy yang dirumuskan sebagai berikut.

$$Z = \frac{\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \mu(z)zdz}{\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \mu(z)dz}, \quad (2.3)$$

dimana:

- Z : Nilai *crisp* mutu air,
- $\mu(z)$: $\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i)$,
- z : variabel *output* status mutu air,
- $z_{\min}$: Batas bawah nilai variabel *output* status mutu air,
- $z_{\max}$: Batas atas nilai variabel *output* status mutu air.

2.4. Kriteria Evaluasi

Kebaikan suatu model dapat dilihat berdasarkan nilai MAPE dan MSE masing-masing model. Semakin kecil nilai MAPE dan MSE, maka semakin baik pula model yang dihasilkan. Berikut adalah penjelasan mengenai kriteria evaluasi yang digunakan pada penelitian ini.

(1) MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*)

MAPE merupakan perhitungan yang digunakan untuk menghitung rata-rata persentase kesalahan mutlak [8]. MAPE didefinisikan sebagai berikut.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(X_i - F_i)}{X_i} \right| 100\%, \quad (2.4)$$

dimana:

- X_i : Nilai data aktual pada periode- i ,
- F_i : Nilai data peramalan pada periode- i ,
- N : Jumlah periode peramalan yang terlibat.

Adapun *Range* nilai MAPE dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Range Nilai Dari MAPE

<i>Range</i> MAPE	Arti
< 10%	Kemampuan model peramalan sangat baik
10 - 20%	Kemampuan mode peramalan baik
20 - 50%	Kemampuan mode peramalan layak
> 50%	Kemampuan mode peramalan buruk

(2) MSE (*Mean Squared Error*)

MSE mengukur rata-rata kuadrat selisih antara nilai yang dihasilkan oleh model dengan nilai sebenarnya dari data yang diamati [9]. MSE didefinisikan sebagai berikut.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - F_i)^2, \quad (2.5)$$

dimana:

X_i : Nilai data aktual pada periode- i ,

F_i : Nilai data peramalan pada periode- i ,

N : Jumlah periode peramalan yang terlibat.

3. Penentuan Status Mutu Air Pada Metode Tsukamoto

Pada penelitian ini digunakan data pengujian dari tahun 2018-2023 (Tabel 2) yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH), Kabupaten Agam, Sumatera Barat.

Tabel 2. Data Pengujian Mutu Air

Periode	Suhu air	PH	DO	TSS	TDS	BOD	COD	NO_2	NO_3
2018	29,4	7,75	7,98	46,06	110,95	3,32	15,76	0,02	1,07
2019	28	6,95	6,87	41,935	80	2,14	23,23	0,03	1,39
2020	28	6,28	6,63	154,25	79,41	2,76	20,13	0,06	1,08
2021	28,42	6,36	5,32	19,54	72,21	2,75	19,85	0,02	0,33
2022	27,75	7,89	5,2	6,66	130,53	2,01	10,73	0,05	1,1
2023	27,83	7,75	9,6	4,91	84,42	3,03	20,33	0,02	0,81

3.1. Pembentukan Himpunan Fuzzy

Berdasarkan Peraturan Pemerintahan Nomor 22 Tahun 2021, variabel *input* dibagi ke dalam dua kategori himpunan fuzzy menurut baku mutu air kelas 2, yaitu AMAN dan TIDAK AMAN. Sedangkan berdasarkan Keputusan Menteri Negara

Lingkungan Hidup No 115 Tahun 2003, variabel *output* dibagi ke dalam empat kategori himpunan fuzzy menurut kriteria status mutu air, yaitu MBM (memenuhi baku mutu), CR (cemar ringan), CS (cemar sedang), CB (cemar berat). Berikut pada Tabel 3 diberikan domain dari setiap himpunan fuzzy untuk masing-masing variabel *input* dan *output*.

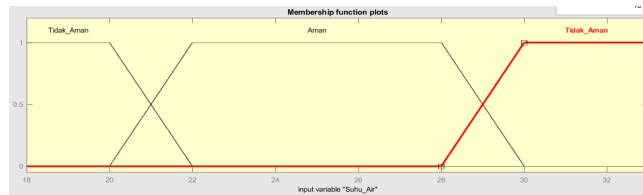
Tabel 3. Tabel Himpunan Fuzzy

Variabel	Himpunan	Domain
Suhu Air	AMAN	[22,28]
	TIDAK AMAN	[18,22] atau (28, 33]
pH	AMAN	[6, 9]
	TIDAK AMAN	[0, 6) atau (9, 14]
DO	AMAN	[4,10]
	TIDAK AMAN	[0, 4)
TSS	AMAN	[0,50]
	TIDAK AMAN	(50, 200]
TDS	AMAN	[0, 1000]
	TIDAK AMAN	(1000, 1500]
BOD	AMAN	[0, 3]
	TIDAK AMAN	(3, 5]
COD	AMAN	[5, 25]
	TIDAK AMAN	(25, 137]
Nitrit	AMAN	[0, 0.06]
	TIDAK AMAN	(0.06, 0.82]
Nitrat	AMAN	[0, 10]
	TIDAK AMAN	(10, 25]
Status Mutu Air	MBM CR CS CB	[0,1] (1, 5] (5, 10] (10, 25]

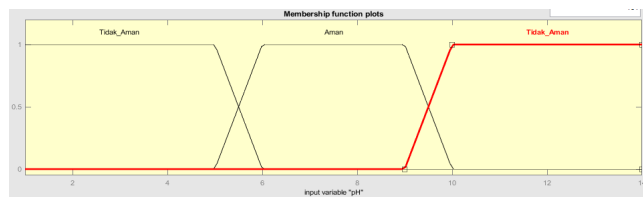
Setelah menentukan kategori himpunan fuzzy untuk masing-masing variabel *input* dan variabel *output*, selanjutnya dibentuk fungsi keanggotaan yang akan digunakan sebagai model dalam penentuan status mutu air. Berikut fungsi keanggotaan untuk variabel *input* dan variabel *output* yang direpresentasikan dalam bentuk grafik.

- Fungsi Keanggotaan Suhu Air (Gambar 1).
- Fungsi Keanggotaan pH (Gambar 2).
- Fungsi Keanggotaan DO (Gambar 3).
- Fungsi Keanggotaan TSS (Gambar 4).
- Fungsi Keanggotaan TDS (Gambar 5).
- Fungsi Keanggotaan BOD (Gambar 6).
- Fungsi Keanggotaan COD (Gambar 7).

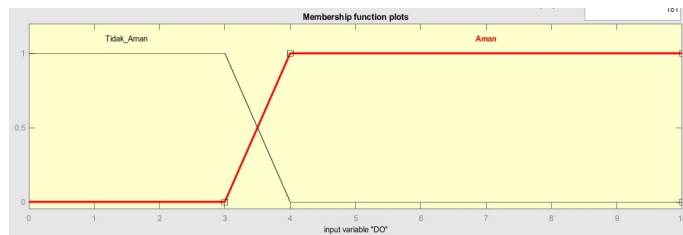
- (h) Fungsi Keanggotaan Nitrit (Gambar 8).
- (i) Fungsi Keanggotaan Nitrat (Gambar 9).
- (j) Fungsi Keanggotaan *Output* Status Mutu Air (Gambar 10).



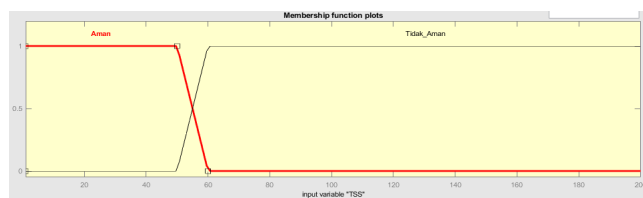
Gambar. 1. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk Suhu Air



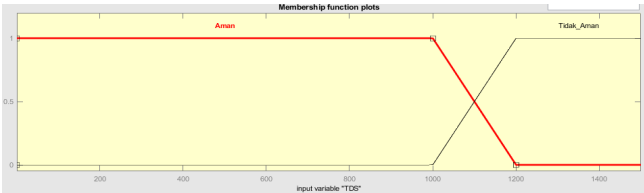
Gambar. 2. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk pH



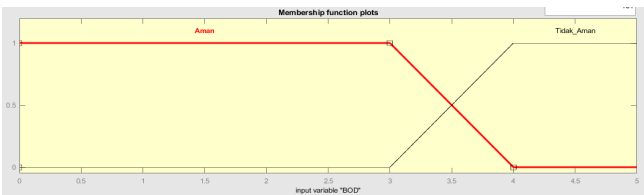
Gambar. 3. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk DO



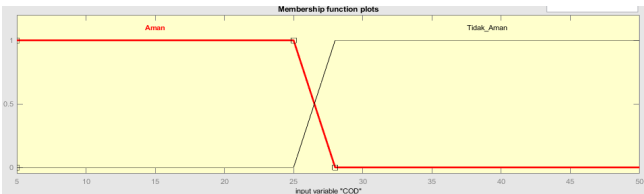
Gambar. 4. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk TSS



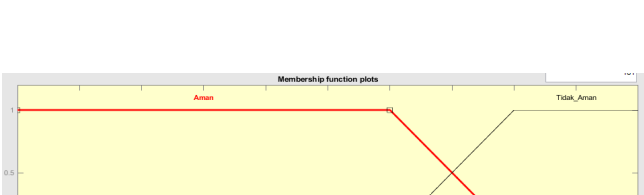
Gambar. 5. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk TDS



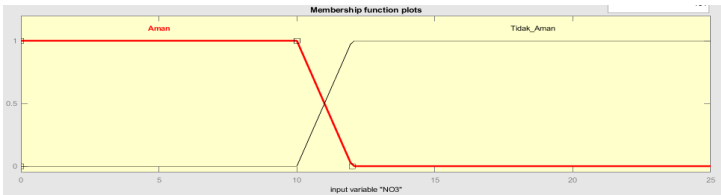
Gambar. 6. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk BOD



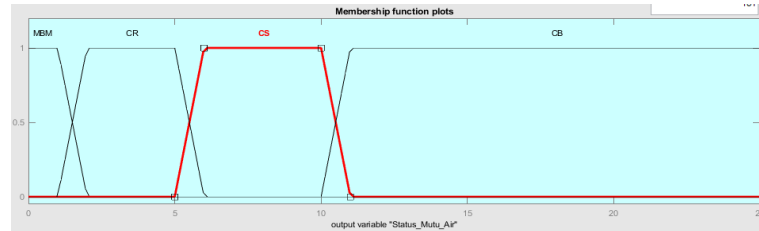
Gambar. 7. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk COD



Gambar. 8. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk NO₂



Gambar. 9. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk N0₃



Gambar. 10. Fungsi Keanggotaan untuk *Output* Status Mutu Air

3.2. Fuzzifikasi

Pada tahap ini akan ditentukan derajat keanggotaan dari masing-masing variabel *input* dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang telah dibentuk sebelumnya. Berikut contoh tahapan fuzzifikasi dengan menggunakan data pada Tabel 2 untuk tahun 2018 pada variabel suhu air.

$$\mu_{AMAN}(29,4) = \frac{30 - 29,4}{30 - 28} = 0,3, \quad (3.1)$$

$$\mu_{TIDAKAMAN}(29,4) = \frac{29,4 - 28}{30 - 28} = 0,7. \quad (3.2)$$

3.3. Pembentukan Basis Aturan (Rule Base)

Aturan-aturan $[R_i]$ dibentuk untuk menyatakan hubungan antara variabel *input* dan *output*. Pada aturan ini, terdapat 512 aturan yang dibentuk dengan menggunakan sembilan variabel *input* dan satu variabel *output* berdasarkan penempatan variabel *input* kategori TIDAK AMAN berdasarkan kombinasi dari aturan tersebut.

- [R1]: *if* suhu air AMAN *and* pH AMAN *and* DO AMAN *and* TSS AMAN *and* TDS AMAN *and* BOD AMAN *and* COD AMAN *and* nitrit AMAN *and* nitrat AMAN *then* status mutu air MBM.
- [R2]: *if* suhu air TIDAK AMAN *and* pH AMAN *and* DO AMAN *and* TSS AMAN *and* TDS AMAN *and* BOD AMAN *and* COD AMAN *and* nitrit AMAN *and* nitrat AMAN *then* status mutu air CR.
- [R3]: *if* suhu air AMAN *and* pH TIDAK AMAN *and* DO AMAN *and* TSS AMAN *and* TDS AMAN *and* BOD AMAN *and* COD AMAN *and* nitrit AMAN *and* nitrat aman *then* status mutu air CR.
- ⋮
- ⋮
- [R511]: *if* suhu air AMAN *and* pH TIDAK AMAN *and* DO TIDAK AMAN *and* TSS TIDAK AMAN *and* TDS TIDAK AMAN *and* BOD TIDAK AMAN *and* COD TIDAK AMAN *and* nitrit TIDAK AMAN *and* nitrat TIDAK AMAN *then* status mutu air cemar sedang (CS).
- [R512]: *if* suhu air TIDAK AMAN *and* pH TIDAK AMAN *and* DO TIDAK AMAN *and* TSS TIDAK AMAN *and* TDS TIDAK AMAN *and* BOD TIDAK

AMAN and COD TIDAK AMAN and nitrit TIDAK AMAN and nitrat TIDAK AMAN then status mutu air CB.

3.4. Aplikasi Implikasi

Pada tahap ini akan dicari nilai $\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i)$ sebanyak aturan yang telah dibentuk di tahap sebelumnya. Nilai $\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i)$ ini kemudian digunakan untuk menghitung nilai *output* status mutu air secara *crisp* untuk masing-masing aturan $z_1, z_2, z_3, \dots, z_{512}$.

Misalkan akan ditentukan nilai $\alpha - \text{predikat}[R_i]_{k_i}(z_i)$ menggunakan Persamaan (2.1) untuk data pengujian tahun 2018 pada aturan pertama.

$$\begin{aligned}
 \alpha - \text{predikat}[R_1]_{MBM}(z_1) &= \mu_{SuhuAirAMAN}(29, 4) \cap \mu_{pHAMAN}(7, 75) \\
 &\quad \cap \mu_{DOAMAN}(7, 98) \cap \mu_{TSSAMAN}(46, 06) \\
 &\quad \cap \mu_{TDSAMAN}(110, 95) \cap \mu_{BODAMAN}(3, 32) \\
 &\quad \cap \mu_{CODAMAN}(14, 65) \cap \mu_{NitritAMAN}(0, 02) \\
 &\quad \cap \mu_{NitratAMAN}(1, 07), \\
 &= \min(\mu_{SuhuAirAMAN}(29, 4); \mu_{pHAMAN}(7, 75); \\
 &\quad \mu_{DOAMAN}(7, 98); \mu_{TSSAMAN}(46, 06); \mu_{TDSAMAN} \\
 &\quad (110, 95); \mu_{BODAMAN}(3, 32); \mu_{CODAMAN}(14, 65); \\
 &\quad \mu_{NitritAMAN}(0, 02); \mu_{NitratAMAN}(1, 07)), \\
 &= \min(0, 3; 1; 1; 1; 1; 0, 68; 1; 1; 1), \\
 &= 0, 3.
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Kemudian akan dicari nilai z_1 dari $\alpha - \text{predikat}[R_1]_{MBM}(z_1)$ dengan menggunakan fungsi keanggotaan *output* status mutu air kategori MBM.

$$0, 3 = \frac{2 - z_1}{2 - 1} \iff z_1 = 2 - (0, 3)(2 - 1) = 1, 7. \tag{3.4}$$

3.5. Defuzzifikasi Metode Tsukamoto

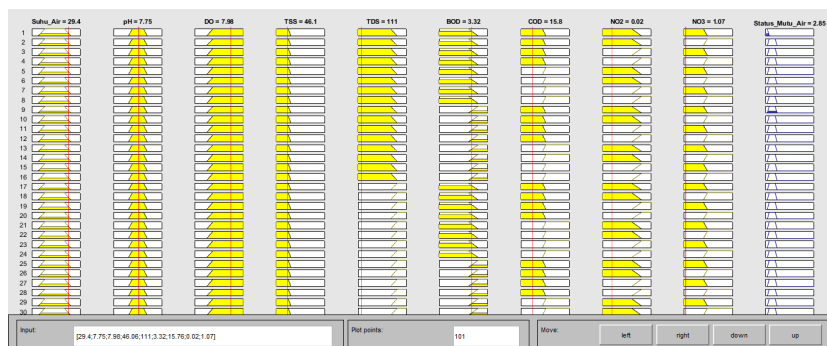
Dengan menggunakan Persamaan (2.2), diperoleh nilai *crisp* mutu air yang merepresentasikan status mutu air dari komposisi aturan-aturan fuzzy yang telah dibuat sebelumnya. Sebagai contoh, akan dihitung nilai mutu air pada tahun 2018 untuk mengetahui status mutu airnya.

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{(\alpha_1 \cdot z_1) + (\alpha_2 \cdot z_2) + (\alpha_3 \cdot z_3) + \dots + (\alpha_{512} \cdot z_{512})}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_{512}} \\
 &= \frac{(0, 3 \cdot 1, 7) + (0, 68 \cdot 1, 68) + (0, 1) + \dots + (0, 0)}{0, 3 + 0, 68 + 0 + \dots + 0} \\
 &= 1, 5405.
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Berdasarkan data pengujian pada tahun 2018, maka nilai mutu airnya adalah 1,5405. Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 115 Tahun 2003, maka kriteria status mutu air tersebut adalah CR dengan derajat keanggotaan 0,5405.

4. Penentuan Status Mutu Air Dengan Metode Mamdani

Pada metode Mamdani, digunakan MATLAB untuk mempermudah proses perhitungan. Pada MATLAB digunakan *tools Rule viewer* yang berperan dalam menampilkan grafik keanggotaan dari nilai-nilai *input* yang dimasukkan, sehingga menghasilkan visualisasi grafik nilai *output* untuk status mutu air berdasarkan aturan yang telah ditentukan. Nilai *output* yang diperoleh dalam MATLAB merupakan hasil dari proses agregrasi dan defuzzifikasi. Pada Gambar 11 diberikan contoh perhitungan untuk data pengujian tahun 2018 pada MATLAB.



Gambar. 11. Rule Viewer untuk Data Tahun 2018

Gambar 11 menunjukkan nilai *output* mutu air sebesar 2,85. Sesuai dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 115 Tahun 2003, kriteria status mutu air tersebut adalah CS dengan derajat keanggotaan 1.

5. Kriteria Evaluasi

Untuk mengevaluasi keakuratan model yang dibangun dengan metode Tsukamoto dan metode Mamdani, digunakan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) dan MSE (*Mean Squared Error*). Hasil perhitungan nilai mutu air menggunakan metode Tsukamoto dan metode Mamdani (nilai peramalan) akan dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan dari metode IP (nilai aktual). Hasil perhitungan nilai mutu air dari masing-masing metode ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Nilai Mutu Air

Tahun	Metode Tsukamoto	Metode Mamdani	Metode IP
2018	1,5405	2,85	1,1
2019	1	0,712	0,8
2020	1	3,5	2,53
2021	1,21	0,752	0,89
2022	1	0,712	0,72
2023	1,03	0,939	0,75

5.1. *MAPE (Mean Absolute Percentage Error)*

MAPE pada Metode Tsukamoto adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} MAPE &= \frac{1}{6} \left(\left(\left| \frac{(1,1 - 1,5405)}{1,1} \right| \right) + \left(\left| \frac{(0,8 - 1)}{0,8} \right| \right) + \left(\left| \frac{(2,53 - 1)}{2,53} \right| \right) + \right. \\ &\quad \left. \left(\left| \frac{(0,89 - 1,21)}{0,89} \right| \right) + \left(\left| \frac{(0,72 - 1)}{0,72} \right| \right) + \left(\left| \frac{(0,75 - 1,03)}{0,75} \right| \right) \right) 100\% \\ &= 40\%. \end{aligned} \tag{5.1}$$

Sementara nilai MAPE untuk Metode Mamdani adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} MAPE &= \frac{1}{6} \left(\left(\left| \frac{(1,1 - 2,85)}{1,1} \right| \right) + \left(\left| \frac{(0,8 - 0,712)}{0,8} \right| \right) + \left(\left| \frac{(2,53 - 3,5)}{2,53} \right| \right) + \right. \\ &\quad \left. \left(\left| \frac{(0,89 - 0,752)}{0,89} \right| \right) + \left(\left| \frac{(0,72 - 0,712)}{0,72} \right| \right) + \left(\left| \frac{(0,75 - 0,939)}{0,75} \right| \right) \right) 100\% \\ &= 42\%. \end{aligned} \tag{5.2}$$

Dari hasil perhitungan MAPE di atas, tingkat *error* dari model yang diperoleh dengan metode Tsukamoto adalah 40%, sedangkan model yang diperoleh dengan metode Mamdani adalah 42%. Berdasarkan Tabel 1, maka model yang dihasilkan dari kedua metode tersebut dikatakan memiliki kemampuan yang cukup layak dalam menentukan status mutu air.

5.2. *MSE (Mean Squared Error)*

MSE pada Metode Tsukamoto adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} MSE &= \frac{1}{6} ((1,1 - 1,5405)^2 + (0,8 - 1)^2 + (2,53 - 1)^2 + \\ &\quad (0,89 - 1,21)^2 + (0,72 - 1)^2 + (0,75 - 1,03)^2) \\ &= 0,472. \end{aligned} \tag{5.3}$$

Sementara MSE pada Metode Mamdani adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} MSE &= \frac{1}{6} ((1,1 - 2,85)^2 + (0,8 - 0,712)^2 + (2,53 - 3,5)^2 + \\ &\quad (0,89 - 0,752)^2 + (0,72 - 0,712)^2 + (0,75 - 0,939)^2) \\ &= 0,678. \end{aligned} \tag{5.4}$$

Dari hasil perhitungan MSE, rata-rata kesalahan kuadrat dari model yang diperoleh dengan metode Tsukamoto adalah 0,472, sedangkan dengan metode Mamdani adalah 0,678. Semakin kecil nilai MSE, semakin baik model dalam penentuan status mutu air.

6. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dikonstruksi model penentuan status mutu air Danau Maninjau dengan menggunakan metode Tsukamoto dan metode Mamdani. Model

tersebut dirancang dengan mendefinisikan himpunan fuzzy untuk setiap variabel *input* yang terdiri dari suhu air, pH, DO, TSS, TDS, BOD, COD, NO_2 , dan NO_3 dan variabel *output*, yaitu status mutu air. Kedua model ini direpresentasikan ke dalam bentuk grafik yang sama, namun perbedaannya terletak pada tahap agregasi dan defuzzifikasi dalam mencari nilai *crisp* dari *output* status mutu air.

Berdasarkan kriteria evaluasi MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) dan MSE (*Mean Squared Error*), model yang diperoleh dengan metode Tsukamoto menghasilkan nilai MAPE (tingkat error) sebesar 40% dan MSE (rata-rata kesalahan kuadrat) sebesar 0,472, sedangkan metode Mamdani menghasilkan nilai MAPE sebesar 42% dan MSE sebesar 0,678. Oleh karena itu, metode Tsukamoto menghasilkan model status mutu air terbaik dengan nilai MAPE dan MSE terkecil dibandingkan metode Mamdani.

7. Ucapan Terima kasih

Terima kasih kepada Dinas Lingkungan Hidup (DLH), Kabupaten Agam, Sumatera Barat yang telah membantu dalam memberikan data penelitian. Terima kasih kepada seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Suhry, H.C., Soeprbowati, T.R., Saraswati, T.R., dan Jumari., 2020, Kualitas Air dan Indeks Pencemaran Danau Galela, *Jurnal Ilmu Lingkungan*, **18**: 236 – 241
- [2] Syawal, M.S., Wardiatno, Y., dan Hariyadi, S., 2016, Pengaruh Aktivitas Antropogenik Terhadap Kualitas Air, Sedimen dan Moluska di Danau Maninjau Sumatera Barat, *Jurnal Biologi Tropis*, **16**: 1 – 14
- [3] Novita, E., Firmansyah, J.W., dan Pradana, H.A., 2023, Penentuan Indeks Kualitas Air Sungai Bedadung Kabupaten Jember Menggunakan Metode IP dan NSF-WQI, *Jurnal Ilmu Lingkungan*, **21**: 495 – 502
- [4] Sompie, T.P.F., Moningga, M.M.L., Sudarno., dan Mentang, S., 2022, Pengaruh Aktivitas Pendukung Pelaksanaan Pekerjaan Konstruksi Jalan Terhadap Kualitas Air Sungai Kema, *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, **4**: 102 – 112
- [5] D. Ramayanti, D. dan Amna, U., 2019, Analisis parameter COD (*Chemical Oxygen Demand*) dan pH (*potential Hydrogen*) limbah cair di PT. Pupuk Iskandar Muda (PT. PIM) Lhokseumawe, *Quimica: Jurnal Kimia Sains dan Terapan* Vol. **1**: 16 – 21
- [6] Karlina, A.C., Supriatna, A.M., dan Amalia, D.V., 2022, Analisis Kadar Nitrit (NO_2) pada Sampel Air Permukaan dan Air Tanah di Wilayah Kabupaten Cilecap Menggunakan Metode Spektrofotometer Uv-Vis, *Seminar Nasional Kimia 2021 UIN Sunang Gunung Djati*, **7**: 1 – 7
- [7] Rindengan, A.J dan Langi, Y.A.R., 2019, *Sistem Fuzzy*, C.V Patra Media Grafindo, Bandung
- [8] Maricar, M.A., 2019, Analisa Perbandingan Nilai Akurasi Moving Average dan Exponential Smoothing untuk Sistem Peramalan Pendapatan pada Perusahaan XYZ, *Jurnal Sistem dan Informatika* Vol. **13**: 36 – 45
- [9] Azmi, U., Hadi, Z.N., dan Soraya, S., 2020, ARDL METHOD: Forecasting Data Jumlah Hari Terjadinya Hujan di NTT, *Jurnal Varian* Vol. **3**: 73 – 82