Model Fuzzy Tsukamoto untuk Klasifikasi Wilayah Berdasarkan Indeks Pembangunan Manusia (Studi Kasus: Provinsi Sumatera Utara)

Malum Tahan Manaon Siregar[1*], Didi Febrian[2]
[1,2,]Matematika, Universitas Negeri Medan, Kota Medan, 20221, Indonesia
*Coresponding Author: malumsiregar71@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan wilayah kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Utara berdasarkan nilai Indeks Pembangunan Manusia (IPM) menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data sekunder tahun 2024 yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Sumatera Utara. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari empat variabel input yaitu Umur Harapan Hidup (UHH), Harapan Lama Sekolah (HLS), Rata-rata Lama Sekolah (RLS), dan Pengeluaran per Kapita, serta satu variabel output yaitu IPM. Penelitian ini menggunakan pendekatan fuzzy logic metode Tsukamoto dengan masing-masing variabel input dibagi ke dalam tiga himpunan fuzzy (rendah, sedang, tinggi) dan output IPM ke dalam empat himpunan fuzzy (rendah, sedang, tinggi, sangat tinggi). Data kemudian dianalisis melalui tahapan fuzzifikasi, pembentukan basis aturan fuzzy sebanyak 81 aturan berdasarkan kombinasi semua kemungkinan input, inferensi dengan metode Tsukamoto, serta defuzzifikasi menggunakan rata-rata berbobot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Fuzzy Tsukamoto mampu mengklasifikasikan IPM kabupaten/kota secara mendekati nilai aktual yang dikeluarkan oleh BPS. Metode ini menunjukkan ketepatan klasifikasi cukup tinggi dalam menggambarkan kategori IPM wilayah yaitu dengan akurasi sebesar 96,96%.

Kata kunci: Fuzzy Tsukamoto; Klasifikasi; Indeks Pembangunan Manusia; Logika Fuzzy.

Abstract

This study aims to classify districts/cities in North Sumatera Province based on their Human Development Index (HDI) using the Fuzzy Tsukamoto method. This study uses secondary data from 2024 obtained from the North Sumatera Central Statistics Agency. The variables used in this study consist of four input variables: Life Expectancy, Expected Years of Schooling, Average Years of Schooling, and Expenditure per Capita, as well as one output variable: the HDI. This study uses the Tsukamoto fuzzy logic approach, with each input variable divided into three fuzzy sets (low, medium, high) and the HDI output into four fuzzy sets (low, medium, high, and very high). The data was then analyzed through fuzzification, the formation of a fuzzy rule base of 81 rules based on a combination of all possible inputs, inference using the Tsukamoto method, and deffuzification using a weighted average. The results showed that the Fuzzy Tsukamoto method was able to classify the HDI of districts/cities close to the actual values issued by the Statistics Indonesia. This method demonstrated a fairly high classification accuracy in describing regional HDI categories, with an accuracy of 96,96%.

Keywords: Fuzzy Tsukamoto, Classification, Human Development Indeks, Fuzzy Logic.

Citation: Siregar, M. T. M., & Febrian, D. (2025). Model Fuzzy Tsukamoto untuk Klasifikasi Wilayah Berdasarkan Indeks Pembangunan Manusia (Studi Kasus : Provinsi Sumatera Utara). *Prodising Seminar Nasional Jurusan Matematika 2025*. 886 – 898.

PENDAHULUAN

Matematika merupakan studi tentang besaran, struktur, ruang, relasi, dan perubahan yang mencakup berbagai topik seperti pola, bentuk, dan entitas. Ilmu ini digunakan dalam seluruh aspek kehidupan manusia sebagai alat penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan, seperti ilmu alam, rekayasa, medis, sosial, ekonomi, dan psikologi. Selain itu, cabang-cabang matematika seperti algoritma, logika, dan sistem bilangan riil telah berperan besar dalam mendukung kemajuan teknologi modern, termasuk kecerdasan buatan, sistem digital, teori komputasi, dan jaringan saraf tiruan (Yusra Amaliyah Harahap et al., 2025). Dengan demikian, matematika tidak hanya berfungsi sebagai alat hitung, tetapi juga sebagai dasar berpikir ilmiah untuk memahami dan menyelesaikan berbagai persoalan kompleks dalam kehidupan sehari-hari (Lathifah Nadziratul et al., 2024). Sama halnya dengan penelitian ini, matematika berperan penting dalam pengukuran dan analisis data untuk mendukung evaluasi capaian pembangunan manusia. Dengan peran matematika dalam pengukuran dan analisis data tersebut, salah satu penerapannya dapat ditemukan pada bidang pembangunan manusia. Gagasan mengenai pembangunan manusia diperkenalkan pertama kali oleh *United Nations Development Program* (UNDP) di tahun 1990 melalui laporan *Human Development Report* (HDR). Konsep terhadap pembangunan manusia yang disampaikan tidak hanya memandang manusia sebagai faktor yang terlibat dalam pembangunan, tetapi juga sebagai tujuan akhir dari proses tersebut. Tujuannya adalah membentuk lingkungan yang memungkinkan setiap individu sehingga bisa menjalani hidup yang sehat dan panjang umur, memperoleh pendidikan yang memadai, serta menikmati kualitas hidup yang layak dan produktif (Almuzani et al., 2022).

Konsep pembangunan manusia tersebut kemudian diukur dan dikembangkan lebih lanjut melalui suatu indikator yang disebut Indeks Pembangunan Manusia (IPM). Proses pembangunan manusia berpengaruh pada keberhasilan pembangunan ekonomi di suatu daerah karena berhubungan erat dengan kualitas sumber daya manusia di wilayah tersebut. Salah satu parameter yang dapat dimanfaatkan dalam pengukuran tingkat pembangunan manusia adalah Indeks Pembangunan Manusia (IPM). IPM adalah indikator untuk menilai tingkat perkembangan dan capaian pembangunan manusia (Matdoan & Noya Van Delsen, 2020). IPM mengukur tingkat pencapaian pembangunan berdasarkan tiga aspek utama, yaitu umur panjang dan hidup sehat, pendidikan serta standar hidup layak. Aspek umur panjang dan hidup sehat diukur melalui indikator Umur Harapan Hidup (UHH) saat lahir. Aspek pendidikan direpresentasikan oleh dua indiaktor, yaitu Harapan Lama Sekolah (HLS) dan Rata-rata Lama Sekolah (RLS). Sementara itu, aspek taraf standar hidup layak diukur menggunkaan indikator pengeluaran per kapita yang disesuaikan. Keempat variabel ini secara langsung membentuk nilai IPM dan mencerminkan kualitas hidup masyarakat di suatu wilayah (BPS Sumatera Utara, 2022).

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2024), IPM Provinsi Sumatera Utara pada tahun 2024 mencapai 75,76, meningkat 0,63 poin (0,84 persen) dibandingkan tahun sebelumnya sebesar 75,13. Peningkatan IPM tersebut didukung oleh semua dimensi penyusunnya, terutama pada indikator pengeluaran per kapita yang disesuaikan dan pengetahuan. Salah satu indikator yang mengalami percepatan pertumbuhan adalah Pengeluaran Riil per Kapita per Tahun (yang disesuaikan) dengan kenaikan sebesar 3,72 persen. Sementara itu, tiga indikator lainnya mengalami perlambatan, yaitu Umur Harapan Hidup (UHH) yang tumbuh dari 0,38 persen menjadi 0,31 persen, Harapan Lama Sekolah (HLS) yang menurun dari 1,28 persen menjadi 0,07 persen, serta Rata-rata Lama Sekolah (RLS) yang tumbuh dari 1,13 persen menjadi 1,12 persen pada tahun 2024 (BPS SUMUT, 2024). Data tersebut menunjukkan bahwa meskipun IPM Sumatera Utara terus mengalami peningkatan, pertumbuhan antar indikator tidak seimbang, yang menandakan adanya perbedaan kualitas pembangunan antar dimensi dan antar wilayah. Berdasarkan data BPS, IPM tertinggi dicapai oleh Kota Medan (83,23 – sangat tinggi), sedangkan yang terendah adalah Kabupaten Nias Barat (65,66 – sedang) (BPS SUMUT, 2024). Kondisi ini menggambarkan disparitas yang cukup besar dalam pembangunan manusia antar kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Utara, sehingga diperlukan pendekatan analisis yang mampu menangkap kompleksitas hubungan antar variabel IPM secara lebih fleksibel dan akurat.

Menurut Badan Pusat Statistik Sumatera Utara, klasifikasi pembangunan manusia terbagi ke dalam empat kategori, apabila nilai IPM < 60 dikategorikan rendah, $60 \leq IPM < 70$ dikategorikan sedang, $70 \leq IPM < 80$ dikategorikan tinggi dan ≥ 80 IPM sangat tinggi. Berdasarkan klasifikasi tersebut, Indeks Pembangunan Manusia (IPM) Sumatera Utara pada tahun 2024 tercatat sebesar 75,76 termasuk kategori "tinggi". Pengelompokan ini bertujuan untuk mengidentifikasi kesenjangan capaian pembangunan antar daerah. Namun, beberapa kabupaten/kota di Sumatera Utara masih berada pada kategori sedang, sementara kota-kota besar seperti Medan telah mencapai kategori sangat tinggi (BPS SUMUT, 2024). Hal ini memperlihatkan adanya disparitas pembangunan manusia antarwilayah, sehingga diperlukan pendekatan analisis yang lebih fleksibel dan adaptif untuk menggambarkan kondisi nyata di setiap daerah. Klasifikasi wilayah berdasarkan Indeks Pembangunan Manusia (IPM) memberikan gambaran yang lebih mendalam tentang kebutuhan pembangunan di setiap daerah. IPM sendiri memiliki data bersifat kompleks, yang terdiri tiga aspek utama, seperti kesehatan, pendidikan dan standar hidup layak, yang masing-masing memiliki karakteristik data yang beragam (Nizhamul et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analisis yang mampu menangkap kompleksitas hubungan antarindikator tersebut secara lebih fleksibel. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan dalam mengklasifikasikan wilayah berdasarkan IPM yaitu dengan menggunakan logika fuzzy.

Menurut Urbanowicz dan Moore, Fuzzy memiliki kelebihan dalam mengolah data yang tidak pasti dan kompleks dengan pendekatan yang fleksibel dan berbasis linguistik. Dibandingkan dengan metode pendekatan lain, logika fuzzy memberikan hasil keputusan yang lebih adil dan berorientasi pada sisi kemanusiaan (Putri & Astuti, 2020). Dengan demikian, penerapan logika fuzzy dalam klasifikasi wilayah berdasarkan IPM memungkinkan terbentuknya hasil klasifikasi yang lebih realistis dan memperhatikan kondisi nyata setiap daerah. Logika fuzzy, atau yang sering disebut logika samar, berfungsi untuk memodelkan data yang tidak pasti dengan cara mengubah nilai tegas (crisp) menjadi bentuk linguistik melalui proses fuzzifikasi. Nilai-nilai linguistik ini kemudian diolah berdasarkan aturan-aturan (*rule base*) yang disusun sesuai dengan pengetahuan pakar. Logika fuzzy didasarkan pada teori himpunan fuzzy, di mana derajat keanggotaan (membership function) menjadi aspek penting yang menunjukkan sejauh mana suatu elemen termasuk dalam suatu kategori. Keunggulan utama logika fuzzy terletak pada kemampuannya menangani data yang tidak presisi, fleksibel dalam

penerapan, toleran terhadap ketidakpastian, serta mudah dipahami karena menggunakan bahasa alami (Putri & Astuti, 2020).

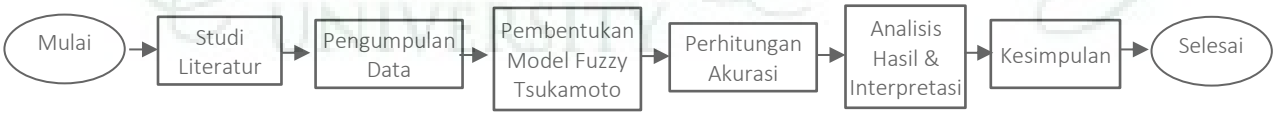
Dalam penerapannya, setiap variabel input diklasifikasikan berdasarkan beberapa derajat keanggotaan yang menggambarkan Tingkat ketidakpastian. Setelah proses fuzzifikasi, dilakukan inferensi fuzzy, yaitu penggabungan aturan-aturan fuzzy yang relevan untuk menghasilkan keputusan. Salah satu metode inferensi fuzzy yang banyak digunakan adalah metode Fuzzy Tsukamoto. Pada metode ini, setiap aturan (rule) memiliki keluaran yang direpresentasikan dengan fungsi keanggotaan monoton, dan hasil akhirnya diperoleh melalui proses defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai tegas (crisp) sebagai output. Dalam konteks penelitian ini, metode Fuzzy Tsukamoto digunakan untuk mengklasifikasikan wilayah di Provinsi Sumatera Utara berdasarkan IPM, dengan variabel masukan berupa UHH, HLS, RLS, dan pengeluaran per kapita (Ramadhani et al., 2024).

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Putra Andika Eka & Rismawan Tedy, 2023) yaitu "Klasifikasi Kualitas Udara Berdasarkan Indeks Standar Pencemaran Udara Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto" dimana dalam penelitian ini hasil pengujian dengan pendekatan metode Fuzzy Tsukamoto menunjukkan akurasi 97%. Metode Tsukamoto menghasilkan output dalam bentuk nilai crisp, yaitu nilai numerik akhir yang diperoleh setelah proses fuzzyfikasi dan inferensi dilakukan. Selanjutnya ada penelitian dari (Reynaldi et al., 2021) dalam penelitian " Analisis Perbandingan Akurasi Metode Fuzzy Tsukamoto dan Fuzzy Sugeno dalam prediksi penentuan harga mobil bekas" hasilnya yaitu metode Fuzzy Tsukamoto mendapat tingkat error hanya sebesar 8%, artinya Metode Fuzzy Tsukamoto lebih akurat digunakan pada permasalahan tersebut. Berdasarkan hasil penjelasan di atas, Fuzzy Tsukamoto efektif dalam mengatasi masalah data yang tidak pasti dan samar serta dapat menghasilkan keputusan yang toleran terhadap ambiguitas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian tingkat akurasi klasifikasi Indeks Pembangunan Manusia (IPM) menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Selain itu, belum banyak penelitian yang menerapkan metode Fuzzy Tsukamoto secara spesifik untuk mengklasifikasikan wilayah berdasarkan IPM di tingkat provinsi, khususnya di Provinsi Sumatera Utara."

Pentingnya penelitian ini terletak pada upaya untuk pengambilan keputusan pada pembangunan antar wilayah di Sumatera Utara, meningkatkan kualitas hidup masyarakat di daerah yang tertinggal, serta memberikan dasar yang kuat bagi pengambil kebijakan dalam merencanakan dan mengalokasikan sumber daya guna mendukung pembangunan yang berkelanjutan. Dalam konteks klasifikasi wilayah berdasarkan IPM, Fuzzy Tsukamoto dapat dimanfaatkan untuk memodelkan hubungan antar variabel yang membentuk IPM, seperti umur harapan hidup, rata-rata lama sekolah, harapan lama sekolah, dan pengeluaran per kapita. Melalui penerapan ini dapat dilakukan dengan cara yang lebih fleksibel dan lebih mampu mencerminkan kompleksitas data yang ada, sehingga membantu dalam merumuskan kebijakan yang lebih responsif terhadap kondisi nyata masyarakat di wilayah tersebut.

METODE PENELITIAN

Data yang digunakan adalah data sekunder yang diperoleh dari website resmi Badan Pusat Statistik (BPS) Sumatera Utara mencakup data Umur Harapan Hidup (UHH) dalam satuan Tahun, Harapan Lama Sekolah (HLS) dalam satuan Tahun, Rata-rata Lama Sekolah (RLS) dalam satuan Tahun dan Pengeluaran perkapita disesuaikan dengan rupiah (Rp) pada 33 kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Utara Tahun 2024. Untuk menyelesaikan permasalahan dalam penelitian ini, analisis prosedur penelitian disusun sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Prosedur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data yang mencakup variabel- variabel yang menjadi indikator dalam perhitungan IPM seperti Umur Harapan Hidup (UHH), Harapan Lama Sekolah (HLS), Rata-rata Lama Sekolah (RLS) dan pengeluaran perkapita yang disesuaikan dengan rupiah, tahun 2024 di Provinsi Sumatera Utara berdasarkan Kabupaten/Kota. Variabel Input yaitu Umur Harapan Hidup (UHH) -Tahun, Rata-rata Lama Sekolah (RLS) – Tahun, Harapan Lama Sekolah (HLS) – Tahun, Pengeluaran perKapita – Rupiah. Variabel Outputnya Adalah Indeks Pembangunan Manusia (IPM) yang akan digunakan untuk menentukan kategori klasifikasi. Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan secara

manual dengan menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Langkah awal pengolahan data adalah menetapkan variabel serta batasan semesta pembicaraan untuk setiap variabel. Semesta Pembicaraan pada penelitian ini ditentukan berdasarkan data studi kasus yang diperoleh dari BPS Sumatera Utara. Selanjutnya, pembentukan himpunan fuzzy bertujuan untuk mengubah nilai-nilai input yang bersifat tegas menjadi bentuk keanggotaan fuzzy. Dari data yang diperoleh dari BPS, rentang nilai (interval) yang mencakup nilai minimum hingga maksimum dari masing-masing variabel. Lihat pada tabel 1 berikut.

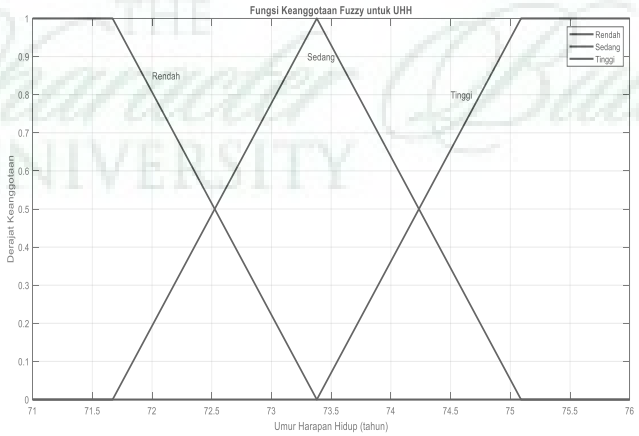
Tabel 1. Semesta Pembicaraan dan Himpunan Fuzzy

Fungsi	Variabel	Himpunan Fuzzy	Semesta Pembicaraan	Domain
Input	Umur Harapan Hidup (UHH)	Rendah	[71,67-75,09]	$[71{,}67 - 73{,}38]$
		Sedang		$[71{,}67 - 75{,}09]$
		Tinggi		$[73{,}38 - 75{,}09]$
	Harapan Lama Sekolah (HLS)	Rendah	[12,65-14,79]	$[12{,}65 - 13{,}72]$
		Sedang		$[12{,}65 - 14{,}79]$
		Tinggi		$[13{,}72 - 14{,}79]$
	Rata-rata Lama Sekolah (RLS)	Rendah	[6,40-11,82]	$[6{,}40 - 9{,}11]$
		Sedang		$[6{,}40 - 11{,}82]$
		Tinggi		$[9{,}11 - 11{,}82]$
	Pengeluaran perKapita	Rendah	[6.740-16.069]	$[6.740 - 11.405]$
		Sedang		$[6.740 - 16069]$
		Tinggi		$[11.405 - 16.069]$
Output	Indeks Pembangunan Manusia (IPM)	Rendah	[60-80]	$[60 - 70]$
		Sedang		$[65 - 75]$
		Tinggi		$[70 - 80]$
		Sangat Tinggi		$[80 - 85]$

Penentuan fungsi keanggotaan pada setiap variabel input dilakukan berdasarkan rentang nilai data aktual yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Sumatera Utara tahun 2024. Nilai minimum dan maksimum dari masing-masing variabel digunakan sebagai batas bawah dan batas atas pada semesta pembicaraan. Selanjutnya, untuk himpunan fuzzy kategori *sedang*, nilai tengah (b) ditentukan dengan cara mengambil rata-rata antara nilai minimum dan maksimum, yaitu (Putri & Astuti, 2020):

$$b = \frac{(\text{nilai minimum} + \text{nilai maksimum})}{2}$$

Dengan demikian, setiap variabel input dibagi ke dalam tiga himpunan fuzzy, yaitu *rendah*, *sedang*, dan *tinggi*, di mana masing-masing himpunan memiliki domain yang saling tumpang tindih (overlap) agar seluruh nilai data memiliki derajat keanggotaan lebih dari nol. Pendekatan ini bertujuan agar fungsi keanggotaan dapat merepresentasikan variasi data aktual secara lebih realistis dan memastikan bahwa setiap nilai input terwakili di dalam salah satu himpunan fuzzy. Variabel Umur Harapan Hidup (UHH) terbagi menjadi tiga himpunan fuzzy yaitu rendah, sedang dan tinggi yang direpresentasikan dengan kurva kurva linear turun, segitiga dan linear naik seperti gambar 2 dan Fungsi keanggotaannya dapat dilihat pada persamaan-persamaan berikut



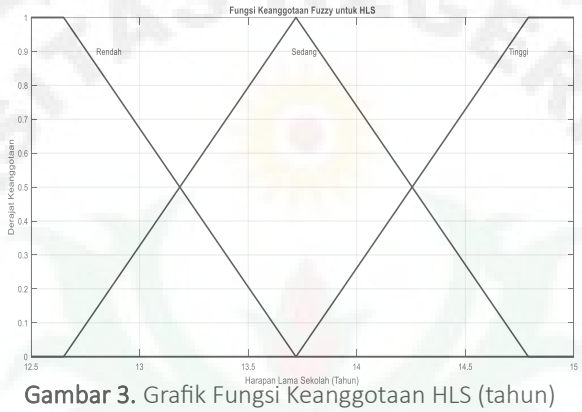
Gambar 2. Grafik Fungsi Keanggotaan UHH (tahun)

$$:\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 71{,}67 \\ \frac{73.38 - x}{73.38 - 71{,}67} & ; 71{,}67 \leq x \leq 73{,}38 \\ 0 & ; x \geq 73{,}38 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 71{,}67 \cup x \geq 75{,}09 \\ \dfrac{x - 71{,}67}{73{,}38 - 71{,}67}; & 71{,}67 \leq x \leq 73{,}38 \\ 1; & x = 73{,}38 \\ \dfrac{75{,}09 - x}{75{,}09 - 73{,}38}; & 73{,}38 \leq x \leq 75{,}09 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq 73{,}38 \\ \dfrac{x - 73{,}38}{75{,}09 - 73{,}38} & ; 73{,}38 \leq x \leq 75{,}09 \\ 1 & ; x \geq 75{,}09 \end{cases} \quad (3)$$

kemudian Variabel Harapan Lama Sekolah terbagi menjadi tiga himpunan fuzzy yaitu rendah, sedang dan tinggi yang direpresentasikan kurva linear turun, segitiga dan linear naik dapat dilihat pada gambar 3 dan Fungsi keanggotaannya pada persamaan 4 - 6



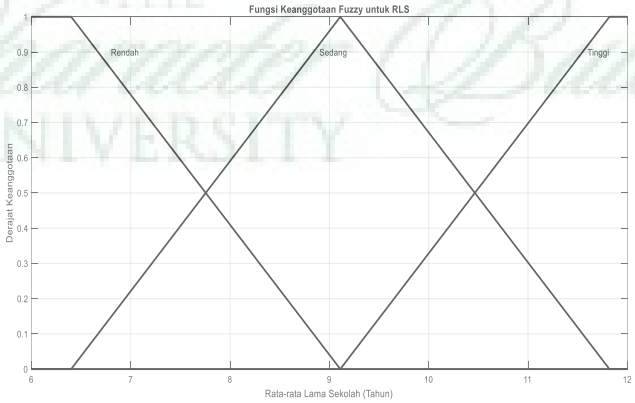
Gambar 3. Grafik Fungsi Keanggotaan HLS (tahun)

$$\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 12{,}65 \\ \dfrac{13{,}72 - x}{13{,}72 - 12{,}65} & ; 12{,}65 \leq x \leq 13{,}72 \\ 0 & ; x \geq 13{,}72 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 12{,}65 \cup x \geq 14{,}79 \\ \dfrac{x - 12{,}65}{13{,}72 - 12{,}65}; & 12{,}65 \leq x \leq 13{,}72 \\ 1; & x = 13{,}72 \\ \dfrac{14{,}79 - x}{14{,}79 - 13{,}72}; & 13{,}72 \leq x \leq 14{,}79 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq 13{,}72 \\ \dfrac{x - 13{,}72}{14{,}79 - 13{,}72} & ; 13{,}72 \leq x \leq 14{,}79 \\ 1 & ; x \geq 14{,}79 \end{cases} \quad (6)$$

Selanjutnya, variabel Rata-rata Lama Sekolah (RLS) terdapat tiga himpunan fuzzy yaitu rendah, sedang dan tinggi yang direpresentasikan dengan kurva linear turun, segitiga dan linear naik dapat dilihat pada gambar 4 dan Fungsi keanggotaannya persamaan 7-9



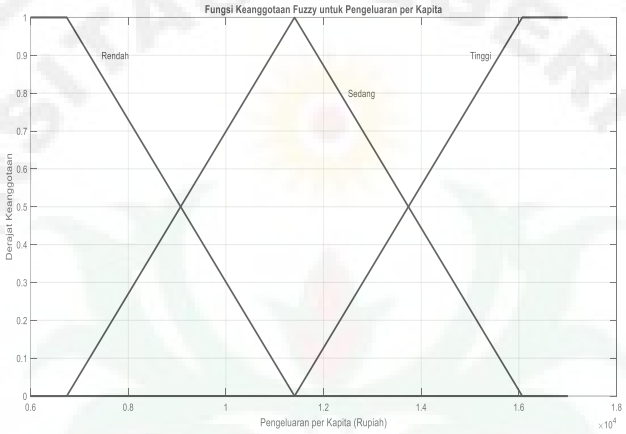
Gambar 4. Grafik Fungsi Keanggotaan RLS (tahun)

$$\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 6{,}40 \\ \dfrac{9{,}11 - x}{9{,}11 - 6{,}40} & ; 6{,}40 \leq x \leq 9{,}11 \\ 0 & ; x \geq 9{,}11 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 6{,}40 \cup x \geq 11{,}82 \\ \dfrac{x - 6{,}40}{9{,}11 - 6{,}40}; & 6{,}40 \leq x \leq 9{,}11 \\ 1; & x = 9{,}11 \\ \dfrac{11{,}82 - x}{11{,}82 - 9{,}11}; & 9{,}11 \leq x \leq 11{,}82 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq 9{,}11 \\ \dfrac{x - 9{,}11}{11{,}82 - 9{,}11} & ; 9{,}11 \leq x \leq 11{,}82 \\ 1 & ; x \geq 11{,}82 \end{cases} \quad (9)$$

Kemudian untuk variabel pengeluaran perkapita yg disesuaikan dengan Rupiah terbagi menjadi tiga himpunan fuzzy yaitu rendah, sedang dan tinggi yang direpresentasikan dengan kurva linear turun, segitiga dan naik ditunjukkan pada gambar 5 dan fungsi keanggotaannya pada persamaan 10 - 12



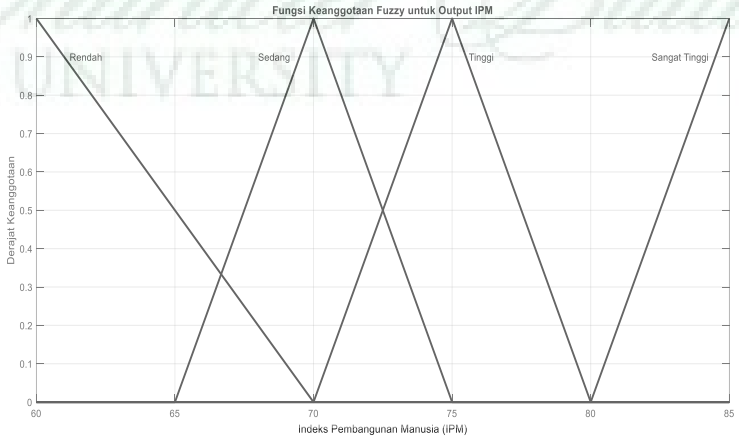
Gambar 5. Grafik Fungsi Keanggotaan Pengeluaran Per Kapita (rupiah)

$$\mu_{rendah}(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 6.740 \\ \dfrac{11.405 - x}{11.405 - 6740} & ; 6.740 \leq x \leq 11.405 \\ 0 & ; x \geq 11.405 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 6.740 \cup x \geq 16.069 \\ \dfrac{x - 6.740}{11.405 - 6.740}; & 6.740 \leq x \leq 11.405 \\ 1; & x = 11.405 \\ \dfrac{16.069 - x}{16.069 - 11.405}; & 11.405 \leq x \leq 16.069 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq 11.405 \\ \dfrac{x - 11.405}{16.069 - 11.405} & ; 11.405 \leq x \leq 16.069 \\ 1 & ; x \geq 16.069 \end{cases} \quad (12)$$

Dalam mempresentasikan variabel Indeks Pembangunan Manusia himpunan fuzzy RENDAH digunakan dengan kurva linear turun dan himpunan fuzzy SANGAT TINGGI dengan kurva linear naik sementara itu, untuk himpunan fuzzy SEDANG dan TINGGI direpresentasikan dengan kurva segitiga seperti pada gambar berikut.



Gambar 6. Grafik fungsi Keanggotaan IPM

$$\mu_{rendah}(z) = \begin{cases} 1 & ; z \leq 60 \\ \dfrac{70 - z}{70 - 60} & ; 60 \leq z \leq 70 \\ 0 & ; z \geq 70 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{sedang}(z) = \begin{cases} 0; & z \leq 65 \cup x \geq 75 \\ \dfrac{z - 65}{70 - 65}; & 65 \leq z \leq 70 \\ 1; & z = 70 \\ \dfrac{75 - z}{75 - 70}; & 70 \leq z \leq 75 \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{tinggi}(z) = \begin{cases} 0; & z \leq 70 \cup x \geq 80 \\ \dfrac{z - 70}{75 - 70}; & 70 \leq z \leq 75 \\ 1; & z = 75 \\ \dfrac{80 - z}{80 - 75}; & 75 \leq z \leq 80 \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{sangat_tinggi}(z) = \begin{cases} 0 & ; z \leq 80 \\ \dfrac{z - 80}{85 - 80} & ; 80 \leq z \leq 85 \\ 1 & ; z \geq 85 \end{cases} \quad (16)$$

Pembentukan basis aturan (*rule base*) pada metode Fuzzy Tsukamoto dilakukan dengan mempertimbangkan hubungan logis antara variabel input (UHH, HLS, RLS, dan Pengeluaran per Kapita) terhadap variabel output (IPM). Setiap aturan disusun berdasarkan prinsip umum bahwa peningkatan nilai pada masing-masing indikator pembangunan manusia akan berdampak pada peningkatan Indeks Pembangunan Manusia (IPM). Secara konseptual, aturan-aturan tersebut disusun mengikuti logika pembangunan manusia yang telah dijelaskan oleh Badan Pusat Statistik dan *United Nations Development Programme* (UNDP), bahwa dimensi kesehatan (UHH), pendidikan (HLS dan RLS), serta standar hidup layak (pengeluaran per kapita) merupakan tiga dimensi utama yang menentukan capaian pembangunan manusia. Apabila salah satu atau lebih dari dimensi tersebut berada pada kategori rendah, maka nilai IPM cenderung menurun; sebaliknya, apabila ketiga dimensi menunjukkan nilai tinggi, maka IPM akan meningkat. Aturan fuzzy dalam penelitian ini dirumuskan dalam bentuk pernyataan ”jika (variabel input), maka (variabel output), dengan setiap variabel input dihubungkan menggunakan operator AND. Berdasarkan prinsip logika fuzzy, dengan empat variabel input dana masing-masing memiliki tiga himpunan fuzzy (nilai linguistik), maka dapat dibentuk sebanyak 81 aturan fuzzy (Putri & Astuti, 2020). Aturan-aturan tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses inferensi Fuzzy Tsukamoto untuk menentukan klasifikasi Indeks Pembangunan Manusia (IPM) pada setiap wilayah.

Selanjutnya, akan dilakukan proses fuzzyfikasi terhadap masing-masing variabel input dalam model, yaitu dengan mengubah nilai-nilai tegas menjadi nilai fuzzy berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Di mana variabel inputnya yaitu Umur Harapan Hidup, Harapan Lama Sekolah, Rata-rata Lama Sekolah dan Pengeluaran Perkapita yang disesuaikan dengan Rupiah untuk 33 Kabupaten/kota. Proses fuzzyfikasi ini bertujuan untuk menghasilkan derajat keanggotaan dari setiap variabel berdasarkan nilai *crisp* yang diinput. Digunakan data inputnya untuk wilayah Nias yaitu dengan Umur Harapan Hidup (UHH) = 71,89, Harapan Lama Sekolah (HLS) = 13,13, Rata-rata Lama Sekolah (RLS) = 6,4, dan Pengeluaran per Kapita = 7.698. Indeks Pembangunan Manusia yang sebenarnya adalah 66,13. Untuk mencari derajat keanggotaan masing-masing variabel pada setiap himpunan dan 33 kabupaten/kota yaitu menggunakan persamaan (1) - (12).

Untuk Variabel Umur Harapan Hidup dengan nilai 71,89 diperoleh nilai derajat keanggotaannya, nilai umur harapan hidup pada kabupaten Nias termasuk dalam kategori RENDAH dengan derajat keanggotaannya sebesar 0,871 karena berada pada domain $[71{,}67 - 73{,}38]$. Kemudian Nilai umur harapan hidup pada kabupaten Nias termasuk dalam kategori SEDANG dengan derajat keanggotaannya sebesar 0,128 karena berada pada domain $[71{,}67 - 75{,}09]$. Nilai umur harapan hidup pada kabupaten Nias tidak termasuk dalam kategori TINGGI dengan derajat keanggotaannya sebesar 0 karena berada pada domain $[73{,}38 - 75{,}09]$. Untuk variabel Harapan Lama Sekolah (HLS) dengan nilai 13,13 diperoleh nilai derajat keanggotaannya, nilai harapan lama sekolah pada kabupaten Nias termasuk dalam kategori RENDAH dengan derajat keanggotaannya sebesar 0,383 karena berada pada domain $[12{,}65 - 13{,}72]$. Nilai harapan lama sekolah pada kabupaten Nias termasuk dalam kategori SEDANG dengan derajat keanggotaannya sebesar 0,616 karena berada pada domain $[12{,}65 - 14{,}79]$. Nilai harapan lama sekolah pada kabupaten Nias tidak termasuk dalam kategori TINGGI dengan derajat keanggotaannya sebesar 0 karena berada pada domain $[13{,}72 - 14{,}79]$.

Kemudian untuk variabel rata-rata Lama Sekolah (RLS) dengan nilai 6,40 diperoleh nilai derajat keanggotaannya adalah sebagai berikut. Nilai rata-rata lama sekolah pada kabupaten Nias termasuk dalam kategori RENDAH dengan

derajat keanggotaannya sebesar 1 karena berada pada domain [6,40 – 9,11]. Nilai rata-rata lama sekolah pada kabupaten Nias tidak termasuk dalam kategori SEDANG dan TINGGI dengan derajat keanggotaannya sebesar 0 karena berada pada domain $[6{,}40 - 11{,}82]$ dan $[9{,}11 - 11{,}82]$. Selalnjutnya untuk variabel Pengeluaran perkapita dengan nilai 7.698 diperoleh nilai derajat keanggotaannya, nilai pengeluaran per kapita pada kabupaten Nias termasuk dalam kategori RENDAH dengan derajat keanggotaannya sebesar 0,7946 karena berada pada domain $[6.740 - 11.405]$. Nilai pengeluaran per kapita pada kabupaten Nias termasuk dalam kategori SEDANG dengan derajat keanggotaannya sebesar 0,2053 karena berada pada domain $[6.740 - 16069]$. Nilai pengeluaran per kapita pada kabupaten Nias tidak termasuk dalam kategori TINGGI dengan derajat keanggotaannya sebesar 0 karena berada pada domain $[11.405 - 16.069]$.

Langkah selanjutnya setelah menyusun aturan fuzzy adalah melakukan proses inferensi. Inferensi dilakukan dengan menggunakan metode Tsukamoto yang menghitung $\alpha - predikat$ dari setiap aturan menggunakan operator minimum dan nilai z dihitung dengan persamaan (4.13) – (4.16). Dimana setiap aturan fuzzy akan menghasilkan nilai output yang bersifat tegas (crisp). Pada langkah ini, seluruh aturan yang telah disusun sebelumnya (sebanyak 81 aturan) akan dievaluasi guna menentukan aturan-aturan mana yang aktif, yaitu aturan yang memiliki nilai derajat kebenaran (α-predikat) lebih besar dari nol. Untuk menentukan rule yang aktif, dilakukan pencocokan antara kategori fuzzy input dari masing-masing variabel (UHH, HLS, RLS, Dan PPK) dengan aturan yang tersedia. Pada masing-masing aturan, diambil derajat keanggotaan (μ) dari setiap variabel input sesuai kategori dalam aturan tersebut. Setelah itu, α-predikat dari aturan ke-i dihitung menggunakan operator minimum dari keempat derajat keanggotaan input serta nilai z_i dihitung berdasarkan α_i dengan rumus invers dari fungsi keanggotaan sesuai kategori output dari aturan tersebut.

Pada Kabupaten Nias, sesuai dengan derajat keanggotaan yang didapat setiap variabel jumlah aturan yang aktif yaitu ada 8 aturan. Berikut merupakan perhitungan untuk masing-masing aturan.

$$\alpha - predikat_1 = min(\mu UHH_{RENDAH} \cap \mu HLS_{RENDAH} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{RENDAH})$$
$$= \min(0{,}871; 0{,}383; 1; 0{,}7946)$$
$$= 0{,}383$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia RENDAH, $z_1 = 70 - 10\alpha = 70 - 10(0{,}383) = 70 - 3{,}83 = 66{,}17$, Kemudian Pengeluaran per Kapita SEDANG THEN IPM RENDAH

$$\alpha - predikat_2 = min(\mu UHH_{RENDAH} \cap \mu HLS_{RENDAH} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{SEDANG})$$
$$= \min(0{,}871; 0{,}383; 1; 0{,}2053)$$
$$= 0{,}2053$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia RENDAH, $z_2 = 70 - 10\alpha = 70 - 10(0{,}2053) = 70 - 2{,}053 = 67{,}947$, Pengeluaran per Kapita RENDAH THEN IPM RENDAH

$$\alpha - predikat_3 = min(\mu UHH_{RENDAH} \cap \mu HLS_{SEDANG} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{RENDAH})$$
$$= \min(0{,}871; 0{,}616; 1; 0{,}7946)$$
$$= 0{,}616$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia RENDAH, $z_3 = 70 - 10\alpha = 70 - 10(0{,}616) = 70 - 6{,}16 = 63{,}84$, Pengeluaran per Kapita Sedang THEN IPM SEDANG

$$\alpha - predikat_4 = min(\mu UHH_{RENDAH} \cap \mu HLS_{SEDANG} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{SEDANG})$$
$$= \min(0{,}871; 0{,}616; 1; 0{,}2053)$$
$$= 0{,}2053$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia SEDANG, $z_4 = 5\alpha + 65 = 5(0{,}2053) + 65 = 1{,}0265 + 65 = 66{,}0265$, Pengeluaran per Kapita RENDAH THEN IPM RENDAH

$$\alpha - predikat_5 = min(\mu UHH_{SEDANG} \cap \mu HLS_{RENDAH} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{RENDAH})$$
$$= \min(0{,}128; 0{,}383; 1; 0{,}7946)$$
$$= 0{,}128$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia RENDAH, $z_5 = 70 - 10\alpha = 70 - 10(0{,}128) = 70 - 1{,}28 = 68{,}72$, pengeluaran per Kapita SEDANG THEN IPM SEDANG

$$\alpha - predikat_6 = min(\mu UHH_{SEDANG} \cap \mu HLS_{RENDAH} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{SEDANG})$$
$$= \min(0{,}128; 0{,}383; 1; 0{,}2053)$$
$$= 0{,}128$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia SEDANG, $z_6 = 5\alpha + 65 = 5(0{,}128) + 65 = 0{,}64 + 65 = 65{,}64$, pengeluaran per Kapita RENDAH THEN IPM SEDANG

$$\alpha - predikat_7 = min(\mu UHH_{SEDANG} \cap \mu HLS_{SEDANG} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{RENDAH})$$

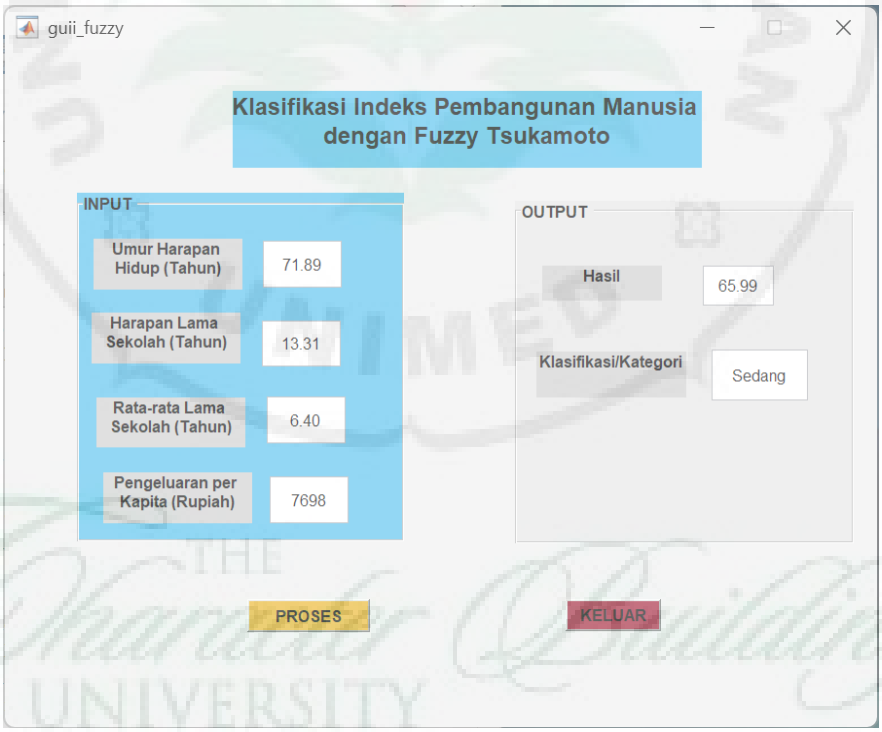
$$= \min(0{,}128; 0{,}616; 1; 0{,}7946)$$
$$= 0{,}128$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia SEDANG, $z_7 = 5\alpha + 65 = 5(0{,}128) + 65 = 0{,}64 + 65 = 65{,}64$, pengeluaran per Kapita SEDANG THEN IPM TINGGI

$$\alpha - predikat_8 = min(\mu UHH_{SEDANG} \cap \mu HLS_{SEDANG} \cap RLS_{RENDAH} \cap Pengeluaran_{SEDANG})$$
$$= \min(0{,}128; 0{,}616; 1; 0{,}2053)$$
$$= 0{,}128$$

Lihat himpunan Indeks Pembangunan Manusia Tinggi, $z_8 = 5\alpha + 70 = 5(0{,}128) + 70 = 0{,}64 + 70 = 70{,}64$

Langkah berikutnya adalah melakukan proses defuzzyfikasi dengan menggunakan metode rata-rata berbobot. Metode ini bertujuan mengubah nilai fuzzy hasil inferensi menjadi nilai tegas yang jelas. Output akhir dari defuzzifikasi adalah nilai IPM yang optimal yang sesuai dengan aturan fuzzy yang digunakan. Proses defuzzifikasi dilakukan berdasarkan persamaan (2.12), dengan perhitungan sebagai berikut. Setelah dilakukan proses defuzzifikasi dengan menggunakan metode rata-rata terbobot (*weighted average*), diperoleh nilai keluaran (*crisp output*) Indeks Pembangunan Manusia (IPM) hasil model Fuzzy Tsukamoto untuk Kabupaten Nias sebesar 65,99. Nilai tersebut termasuk ke dalam kategori SEDANG, karena berada pada rentang $60 \leq IPM < 70$ sesuai klasifikasi yang ditetapkan oleh Badan Pusat Statistik (BPS, 2024). Berdasarkan tahapan yang telah lakukan pada penerapan metode Fuzzy Tsukamoto secara manual, langkah berikutnya yaitu untuk mempermudah perhitungan dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan pemanfaatan *Graphical User Interface* (GUI) pada Matlab. Setelah melakukan perhitungan secara manual, kemudian diimplementasikan ke dalam model menggunakan GUI Matlab, dan diperoleh hasil sebagai berikut.



Gambar 7. Hasil Klasifikasi Menggunakan GUI Matlab

Gambar 7 adalah hasil klasifikasi Indeks Pembangunan Manusia (IPM) dengan menginput variabel UHH, HLS, RLS dan Pengeluaran per Kapita pada GUI Matlab metode Fuzzy Tsukamoto. Hasil yang diperoleh menujukkan tingkat presisi yang baik antara perhitungan menggunakan GUI Matlab dan perhitungan secara manual. Langkah selanjutnya yaitu dengan menginput seluruh data sebanyak 33 kabupaten/kota ke dalam program, sehingga diperoleh hasil sebagaimana disajikan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 1. Hasil Perhitungan Fuzzy Tsukamoto Menggunakan GUI Matlab dan Data Aktual

No	Kab/kota	IPM Aktual	Klasifikasi Aktual	IPM Tsukamoto	Klasifikasi dengan Tsukamoto	Hasil
1.	Nias	66.13	S	65,99	S	Sesuai
2.	Mandailing Natal	73.44	T	72,25	T	Sesuai

3.	Tapanuli Selatan	75.18	T	73,41	T	Sesuai
4.	Tapanuli Tengah	73.34	T	71,25	T	Sesuai
5.	Tapanuli Utara	77.48	T	73,65	T	Sesuai
6.	Toba Samosir	78.44	T	73,12	T	Sesuai
7.	Labuhan Batu	75.2	T	71,18	T	Sesuai
8.	Asahan	74.17	T	72,07	T	Sesuai
9.	Simalungun	75.88	T	72,58	T	Sesuai
10.	Dairi	75.88	T	72,63	T	Sesuai
11.	Karo	77.49	T	72,99	T	Sesuai
12.	Deli Serdang	77.56	T	72,68	T	Sesuai
13.	Langkat	74.85	T	71,46	T	Sesuai
14.	Nias Selatan	65.87	S	65,68	S	Sesuai
15.	Humbang Hasundutan	73.33	T	71,38	T	Sesuai
16.	Pakpak Bharat	73.09	T	70,98	T	Sesuai
17.	Samosir	73.77	T	71,20	T	Sesuai
18.	Serdang Bedagai	74.15	T	74,87	T	Sesuai
19.	Batu Bara	74.14	T	70,95	T	Sesuai
20.	Padang Lawas Utara	74,14	T	71,02	T	Sesuai
21.	Padang Lawas	73.10	T	70,88	T	Sesuai
22.	Labuhan Batu Selatan	75.11	T	71,70	T	Sesuai
23.	Labuhan Batu Utara	76.2	T	72,88	T	Sesuai
24.	Nias Utara	66.42	S	66,86	S	Sesuai
25.	Nias Barat	65.66	S	66,64	S	Sesuai
26.	Sibolga	77.52	T	72,78	T	Sesuai
27.	Tanjungbalai	75.95	T	72,65	T	Sesuai
28.	Pematang Siantar	81,17	ST	79,86	T	Tidak Sesuai
29.	Tebing Tinggi	78.68	T	73,15	T	Sesuai
30.	Medan	83.23	ST	84,89	ST	Sesuai
31.	Binjai	78.67	T	74,41	T	Sesuai
32.	Padang Sidempuan	78.61	T	74,04	T	Sesuai
33.	Gunungsitoli	72.30	T	71,99	T	Sesuai

Keterangan : S : Sedang, T : Tinggi, ST : Sangat Tinggi

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto dan dengan pemanfaatan melalui apklikasi GUI Matlab, diperoleh nilai Indeks Pembangunan Manusia (IPM) untuk 33 kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Utara sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2. Nilai IPM hasil Fuzzy Tsukamoto dibandingkan dengan data aktual IPM dari Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2024. Klasifikasi IPM dibagi menjadi empat kategori, yaitu: Rendah (R): $IPM < 60$; Sedang (S): $60 \leq IPM < 70$; Tinggi (T): $70 \leq IPM < 80$; dan Sangat Tinggi (ST): $IPM \geq 80$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah di Provinsi Sumatera Utara termasuk dalam kategori tinggi, hanya beberapa wilayah berada pada kategori sedang, dan sebagian kecil wilayah perkotaan termasuk kategori sangat tinggi. Kategori Sedang, Wilayah dengan IPM hasil Tsukamoto dibawah 70 tergolong dalam kategori sedang. Terdapat empat kabupaten yang masuk dalam kategori ini, yaitu ada Kabupaten Nias Selatan (65,68), Kabupaten Nias (65,99), Kabupaten Nias Barat (66,64) dan Kabupaten Nias Utara (66,86). Keempat kabupaten tersebut terletak di wilayah kepulauan, sehingga akses terhadap Pendidikan, Kesehatan, dan ekonomi relatif terbatas dibandingkan kabupaten lain di daratan Sumatera. Faktor utama yang menyebabkan nilai IPM pada wilayah ini tergolong sedang Adalah rendahnya rata-rata lama sekolah dan pengeluaran per kapita yang masih dibawah rata-rata provinsi, meskipun Umur Harapan Hidup (UHH) menunjukkan tren yang meningkat.

Kemudian kategori tinggi, Sebanyak 27 kabupaten/kota tergolong dalam kategori tinggi, dengan nilai IPM hasil Fuzzy Tsukamoto berkisar antara 70,88 hingga 79,86. Wilayah-wilayah ini mencakup: Pakpak Bharat (70,99), Padang Lawas (70,88), Padang Lawas Utara (71,02), Batu Bara (70,95), Tapanuli Tengah (71,25), Humbang Hasundutan (71,38), Langkat (71,46), Labuhan Batu (71,18 Labuhan Batu Selatan (71,70), Samosir (71,20), Mandailing Natal (72,25), Asahan (72,07) Simalungun (72,58), Dairi (72,63), Tanjungbalai (72,65), Deli Serdang (72,68), Sibolga (72,78), Labuhan Batu Utara (72,88), Karo (72,99), Toba (73,12), Tapanuli Selatan (73,41), Tapanuli Utara (73,65), Serdang Bedagai (74,87), Padang Sidempuan (74,04), Binjai (74,41), Tebing Tinggi (73,15), Gunungsitoli (71,99), Pematang Siantar (79,86). Hampir seluruh kabupaten/kota kelompok ini memiliki hasil Fuzzy Tsukamoto yang sangat mendekati nilai aktual dari BPS. Kategori tinggi ini mencerminkan bahwa Pembangunan manusia di wilayah-wilayah tersebut telah cukup baik, ditandai dengan peningkatan harapan hidup, Pendidikan yang lebih merata, serta daya beli masyarakat yang membaik.

Kategori sangat tinggi mencakup wilayah dengan IPM hasil Fuzzy Tsukamoto ≥ 80. Kota Medan dengan nilai IPMnya sebesar 84,89. Kota ini menjadi wilayah dengan Indeks Pembangunan manusia tertinggi di Sumatera Utara. Hal ini dapat dilihat dari indikator rata-rata lama sekolah dan penegeluaran per kapita yang jauh lebih tinggi dibandingkan kabupaten lainnya. Akses terhadap fasilitas kesehatan dan pendidikan yang lebih baik juga memperkuat posisinya sebagai satu-satunya kota dengan kategori *sangat tinggi* pada hasil Fuzzy Tsukamoto.

Berdasarkan paparan di atas, IPM tertinggi dengan metode Fuzzy Tsukamoto adalah 84,89 dan IPM terendah adalah 65,99, yaitu terdapat pada wilayah Kota Medan dan Nias. Dibandingkan dengan data aktualnya, IPM yang paling tinggi adalah 83,23 dan IPM paling rendah 65,66 yang terdapat pada Kota Medan dan Nias Barat. Dari jumlah data sebanyak 33, diperoleh sebanyak 32 data yang sesuai dengan klasifikasi aktual yang tercantum dalam data BPS. Hal ini menunjukkan kinerja model yang sangat baik, mengingat sebagian besar hasil klasifikasi sesuai dengan klasifikasi aktual. Dari 33 kabupaten/kota tersebut, hanya Kota Pematang Siantar yang mengalami perbedaan klasifikasi antara data aktual dan hasil Fuzzy Tsukamoto . Nilai IPM aktualnya sebesar 81,17 (Kategori Sangat Tinggi), sedangkan hasil Fuzzy Tsukiamoto menghasilkan 79,86 (kategori Tinggi). Selisih sebesar 1,31 poin ini menyebabkan perubahan klasifikasi meskipun perbedaannya sangat kecil. Perbedaan tersebut disebabkan oleh nilai variabel input Kota Pematang Siantar (UHH, HLS, RLS dan pengeluaran per kapita) tidak semuanya berada pada Tingkat tertinggi, terutama pada aspek pengeluaran per kapita sedikit lebih rendah di bawah Medan, nilai derajat keanggotaannya pada kategori “tinggi” belum mencapai maksimum. Akibatnya kekuatan aturan (rule strength) pada himpunan keluaran “sangat tinggi” menjadi lebih kecil dibandingkan “tinggi”. Hal ini menyebabkan hasil deffuzifikasi akhir lebih condong ke kategori “tinggi”. Dapat disimpulkan, bahwa beberapa input terutama pengeluaran per kapita tidak memiliki derajat keanggotaan penuh pada himpunan tinggi, sehingga kontribusi aturan sangat tinggi tidak cukup besar mendorong z_final atau hasil akhir mencari nilai IPMnya.

Pada pengujian dilakukan evaluasi dengan melihat seberapa besar akurasi dari hasil klasifikasi IPM menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto, dengan Tingkat akurasi 96,96%. Berdasarkan hasil implementasi metode Fuzzy Tsukamoto terhadap 33 kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Utara, diperoleh hasil klasifikasi IPM yang menghasilkan output yang cukup baik. Dari 33 total data, sebanyak 32 kabupaten/kota berhasil diklasifikasikan dengan benar sesuai dengan klasifikasi aktual yang dikeluarkan oleh BPS, sementara hanya 1 kabupaten/kota yang mengalami kesalahan klasifikasi. Hasil pengujian akurasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa model Fuzzy Tsukamoto untuk klasifikasi wilayah berdasarkan Indeks Pembangunan Manusia (IPM) di Provinsi Sumatera Utara memiliki tingkat akurasi sebesar 96,96%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model yang dikembangkan mampu mengklasifikasikan wilayah secara tepat berdasarkan variabel angka harapan hidup, harapan lama sekolah, rata-rata lama sekolah, dan pengeluaran per kapita. Dengan akurasi di atas 90%, sistem ini dapat dikatakan sangat layak dan reliabel untuk digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam analisis pembangunan manusia. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Mulyono et al., 2020) yang menerapkan metode *Fuzzy Tsukamoto* pada sistem pakar diagnosis penyakit diabetes. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dirancang dapat berjalan dengan baik dengan tingkat akurasi mencapai 94%, yang membuktikan bahwa metode Tsukamoto efektif dalam mengolah data yang bersifat samar untuk menghasilkan keputusan diagnosis yang akurat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan yaitu Model Fuzzy Tsukamoto untuk klasifikasi wilayah berdasarkan Indeks Pembangunan Manusia (IPM) di Provinsi Sumatera Utara, maka dapat disimpulkan, pertama metode Fuzzy Tsukamoto berhasil digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat Indeks Pembangunan Manusia (IPM) di 33 kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Utara yaitu dari keseluruhan wilayah, sebanyak 32 daerah memiliki hasil klasifikasi yang sesuai antara data aktual dan hasil perhitungan Fuzzy Tsukamoto, sedangkan 1 daerah (Kota Pematang Siantar) menunjukkan hasil yang sedikit berbeda karena nilai IPM fuzzy (79,86) berada pada batas peralihan antara kategori tinggi dan sangat tinggi. Model Fuzzy Tsukamoto ini, mampu digunakan secara efektif dalam mengklasifikasikan wilayah berdasarkan IPM. Dengan memanfaatkan empat variabel input utama yaitu Umur Harapan Hidup (UHH), Harapan Lama Sekolah (HLS), Rata-rata Lama Sekolah (RLS), dan Pengeluaran per Kapita, sistem fuzzy ini dapat memberikan hasil klasifikasi IPM ke dalam kategori rendah, sedang, Tinggi, dan sangat tinggi secara lebih fleksibel dan realistis. Kedua tingkat akurasi dari model klasifikasi fuzzy Tsukamoto yaitu sebesar 96,96%. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa metode ini memiliki kemampuan klasifikasi yang cukup tinggi yang berarti metode ini layak diterapkan dalam pengambilan keputusan dalam pengklasifikasian.

DAFTAR PUSTAKA

Afiat Muhammad Nur, Saenong Zainuddin, & Dewangga Puspa. (2024). Pengaruh Indeks Pembangunan Manusia dan Pertumbuhan Ekonomi Terhadap Pengangguran di Sulawesi Tenggara. *Ekonomi, Manajemen, Dan Akuntansi*, *3*(6).

Almuzani, N., Teguh Purnomo, dan, Singosari Raya, J., & Tengah, J. (2022). EducationTo Increase Awareness Of Fishermen's Safety and Security Through Certification In Order To Increase Human Develpment Index In Central Java: Literature Study. In *Asian Journal of Aquatic Sciences* (Vol. 5, Issue 1).

Arafat, L., Rindayati, W., & Sahara. (2018). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Indeks Pembangunan Manusia di Provinsi Kalimantan Tengah. *Jurnal Ekonomi Dan Kebijakan Pembangunan*, *7*(2), 140–158.

Arofah Irvana, & Rohimah Siti. (2019). Analisis Jalur UntukPengaruh Angka Harapan Hidup, Harapan Lama Sekolah, Rata-rata Lama Sekolah Terhadap Indeks Pembangunan Manusia Melalui Pengeluaran Riil Per Kapita di Provinsi Nusa Tenggara Timur. *SAINTIKA UNPAM*, *2*(1).

Azfirmawan, D., Magriasti, L., & Yulhendri. (2023). Indeks Pembangunan Manusia Di Indonesia (Kajian Perubahan Metodologi Penghitungan) Universitas Pahlawan Tuanku Tambusai. *Jurnal Pendidikan Dan Konseling*, *5*.

Badan Pusat Statistik. (2023). *Indeks Pembangunan Manusia Provinsi Sumatera Utara 2023* (Vol. 9). Badan Pusat Statistik Sumatera Utara.

Fatwa Muhamad, Ristu Ristu, Pandingan Sriwinarty, & Supriyadi Edi. (2022). Pengaplikasian Matlab Pada Perhitungan Matriks. *Papanda Journal Of Mathematics and Sciences Research (PJMSR)*, *1*, 81–93.

Lathifah Nadziratul, Suri Nurul Permata, & Amanda Tiara. (2024). Peran Self Confidence Siswa Terhadap Kemampuan Pemecahan Masalah Matematika. *Prosiding Konferensi Ilmiah Pendidikan*.

Matdoan, M. Y., & Noya Van Delsen, M. S. (2020). Penerapan Analisis Cluster dengan Metode Hierarki Untuk Klasifikasi Kabupaten/Kota di Provinsi Maluku Berdasarkan Indikator Indeks Pembangunan Manusia. *Jurnal Statistika Dan Matematika*, *2*(2).

Mulyono, I. U. W., Kusumawati, Y., Susanto Ajib, Ihya Dimas Irawan, & Ulumuddin. (2020). E-Sistem Pakar Diagnosa Dini Penyakit Diabetes Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto. *Seminar Nasional Universitas Muhammadiyah Purwokerto*, 456–463.

Nizhamul, D. L., Istighfarah, V., & Damayanti, N. D. (2023). Faktor-Faktor Pengaruh Indeks Pembangunan Manusia (IPM) di Hongkong dan Singapura. *Jurnal Edukasi (Ekonomi, Pendidikan Dan Akuntansi)*, *11*(2).

Putra Andika Eka, & Rismawan Tedy. (2023). Klasifikasi Kualitas Udara Berdasarkan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto. *Coding : Jurnal Komputer Dan Aplikasi*, *11*(1).

Putri, D., & Astuti, P. (2020). Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto dan Fuzzy Sugeno Dalam Penentuan Harga Jual Sepeda Motor. *UNNES Journal of Mathematics*, *9*(2). http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ujm

Rahmaniar, R., Widiharih, T., Ispriyanti, D., Statistika, D., Sains, F., & Matematika, D. (2018). GUI Matlab Untuk Metode Fuzzy Saw dan Fuzzy Topsis Dalam Pemilihan Penerima Beasiswa PPA dengan Pembobotan Entropi (Studi Kasus : Pemilihan Penerima Beasiswa PPA tahun 2017 Mahasiswa FSM UNDIP, Semarang). *Jurnal Gaussian*, *7*(2), 187–199. https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/gaussian/

Ramadhani, D. H., Srikandi, R., Ikhwan, M., & Saputra, R. A. (2024). Penerapan Logika Fuzzy Dalam Klasifikasi Status Gizi Balita di Puskesmas Pondidaha Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, *12*(2). https://doi.org/10.23960/jitet.v12i2.4017

Reynaldi, Syafrizal, W., & Faris Al Hakim, M. (2021). Analisis Perbandingan Akurasi Metode Fuzzy Tsukamoto dan Fuzzy Sugeno Dalam Prediksi Penentuan Harga Mobil Bekas. In *Indonesian Journal of Mathematics and Natural* Sciences (Vol. 44, Issue 2). http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JM

Rizky Mochamad, & Mulyoto Ari. (2023). Sistem Pendukung Keputusan Pengangkatan Karyawan Tetap Pada PT. Tangguh Duta Merlin Menggunakan Metode Logika Fuzzy Tsukamoto. *Ilmu Komputer Dan Pendidikan*, *2*(1).

Santika, Hanum Nurlaila, & Safuridar. (2022). Pengaruh Jumlah Penduduk, Angka Harapan Hidup dan Rata-rata Lama Sekolah Terhadap Indeks Pembangunan Manusia di Kabupaten Aceh Tamiang. *Ekonomi Dan Manajemen*, *2*(4).

Setiawan, A., Yanto, B., & Yasdomi, K. (2018). *Logika Fuzzy dengan Matlab (Contoh Kasus Penelitian Penyakit Bayi dengan Fuzzy Tsukamoto)*. Jayapangus Press. http://jayapanguspress.org

Setiyawan, D., Arbansyah, A., & Latipah, A. J. (2023). Fuzzy Inference System Metode Tsukamoto Untuk Penentuan Program Studi Fakultas Sains dan Teknologi di Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur. *JIKO (Jurnal Informatika Dan Komputer)*, *7*(1), 23. https://doi.org/10.26798/jiko.v7i1.657

Syaidatussalihah, S., Mala, F., Permata, R. A., & Khalil, A. A. (2025). Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Indeks Pembangunan Manusia Di Indonesia dengan Metode Regresi Linear Berganda. *JSN : Jurnal Sains Natural*, *3*(1), 20–26. https://doi.org/10.35746/jsn.v3i1.699

Yusra Amaliyah Harahap, A., Syasmita, I., Annisa, L., Ramadan Akbar, F., & Kunci, K. (2025). *Matematika Dalam Perkembangan Ilmu Pengetahuan Alam*. *15*(1), 136. https://doi.org/10.30829/alirsyad.v15i1.24079.