

CLUSTERING VAKSINASI PENYAKIT MULUT DAN KUKU (PMK) PADA HEWAN BERKUKU GENAP/BELAH (CLOVEN-HOOFED) MENGGUNAKAN ALGORITMA FUZZY C-MEANS (STUDI KASUS: PROVINSI ACEH)

Fannisa Nadira, Angga Pratama, Athiyatul Ulya

Prodi Sistem Informasi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh

Jalan Batam, Blang Pulo Muara Satu, Lhokseumawe, Aceh, Indonesia

fannisanadira623@gmail.com

ABSTRAK

Penyakit Mulut dan Kuku (PMK) merupakan penyakit menular strategis yang disebabkan oleh virus dari genus *Aphthovirus* dan menyerang hewan berkuku genap/belah sehingga berdampak besar terhadap sektor peternakan. Sejak muncul kembali pada tahun 2022, Provinsi Aceh menjadi salah satu wilayah yang terdampak karena tingginya populasi ternak dan distribusi vaksinasi yang belum merata antarwilayah. Kondisi ini menimbulkan permasalahan dalam mengidentifikasi pola persebaran vaksinasi secara efektif untuk mendukung pengendalian PMK. Penelitian ini bertujuan untuk mengelompokkan data vaksinasi PMK di Provinsi Aceh periode 2022-2024 guna mengetahui karakteristik dan pola distribusi vaksinasi pada ternak. Metode yang digunakan adalah algoritma *Fuzzy C-Means* untuk melakukan proses *clustering* berdasarkan karakteristik ternak yang telah divaksinasi. Hasil penelitian menunjukkan terbentuknya enam *cluster* dengan ukuran berbeda, di mana *Cluster 4* merupakan *cluster* terbesar dengan 168.033 data dan *Cluster 5* merupakan *cluster* terkecil dengan 37.939 data. Evaluasi hasil *clustering* menggunakan metrik *Calinski-Harabasz Index* (CHI), *Davies-Bouldin Index* (DBI), dan *Silhouette Index* (SI) menunjukkan bahwa *cluster* yang terbentuk memiliki tingkat pemisahan dan kepadatan yang baik. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *Fuzzy C-Means* efektif dalam mengidentifikasi pola persebaran vaksinasi PMK sehingga dapat mendukung perumusan strategi vaksinasi yang lebih tepat sasaran dan merata di Provinsi Aceh.

Kata kunci : Penyakit Mulut dan Kuku, Vaksinasi, Clustering, Fuzzy C-Means, Provinsi Aceh

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki sejarah panjang dalam sektor peternakan yang berperan penting dalam pertumbuhan perekonomian nasional. Sebagai negara agraris, sektor peternakan tidak hanya berfungsi sebagai penyedia pangan hewani seperti daging dan susu, tetapi juga menjadi sumber pendapatan bagi masyarakat. Meskipun demikian, sektor peternakan memiliki tingkat risiko kerugian yang relatif tinggi akibat berbagai faktor, seperti kematian ternak, kehilangan, bencana alam, serta wabah penyakit. Keberhasilan usaha peternakan sangat bergantung pada kondisi kesehatan ternak, di mana penyakit menular dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan karena menghambat produktivitas dan reproduksi ternak [1].

Salah satu penyakit hewan menular strategis yang menjadi perhatian global adalah Penyakit Mulut dan Kuku (PMK). PMK disebabkan oleh virus *Aphthovirus* dan menyerang hewan berkuku belah/genap dengan tingkat penularan yang sangat tinggi, baik melalui kontak langsung maupun tidak langsung. Penyakit ini ditandai dengan gejala seperti demam, lepuhan pada mulut, ambing, dan kaki, yang berdampak pada penurunan produksi susu, penurunan berat badan, hingga kematian pada hewan muda [2].

Indonesia pernah mengalami wabah PMK pada tahun 1887 di Jawa Timur dan dinyatakan bebas PMK tanpa vaksinasi sejak tahun 1986. Namun, pada April 2022 wabah PMK kembali muncul di Gresik, Jawa

Timur, dan kemudian menyebar ke berbagai provinsi di Indonesia, termasuk hampir seluruh wilayah Pulau Sumatera dan Provinsi Aceh (Bulu, 2023). Di Provinsi Aceh, kasus pertama PMK dilaporkan pada 8 Mei 2022 dengan 2.400 ekor ternak terinfeksi, dan jumlah tersebut meningkat menjadi lebih dari 49.000 ekor pada Juni 2022 [3].

Menghadapi penyebaran yang cepat dan dampak kerugian yang besar, Pemerintah Provinsi Aceh melakukan berbagai upaya pengendalian, antara lain melalui vaksinasi massal, karantina ternak, pembatasan pergerakan ternak, serta penerapan biosekuriti. Hingga akhir tahun 2024, ratusan ribu dosis vaksin PMK telah didistribusikan ke seluruh kabupaten/kota di Provinsi Aceh sebagai bagian dari strategi pengendalian penyakit [3].

Namun demikian, pelaksanaan vaksinasi PMK di Provinsi Aceh belum sepenuhnya merata di setiap wilayah. Perbedaan jumlah populasi ternak, karakteristik wilayah, serta keterbatasan sumber daya menyebabkan variasi capaian vaksinasi antar kabupaten/kota. Kondisi tersebut menyulitkan dalam menentukan wilayah prioritas vaksinasi secara objektif dan terukur. Oleh karena itu, diperlukan analisis berbasis data untuk mengidentifikasi pola distribusi vaksinasi dan menentukan wilayah prioritas secara objektif.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa algoritma *Fuzzy C-Means* efektif digunakan dalam mengklasifikasikan data vaksinasi PMK berdasarkan

atribut tertentu, dengan menghasilkan dua *cluster* utama dan nilai DBI sebesar 0,416 yang menunjukkan kualitas *clustering* yang cukup baik [4]. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan, antara lain cakupan data yang terbatas pada satu tahun, penggunaan metode validasi yang belum beragam, serta minimnya eksplorasi analisis lanjutan dan visualisasi interaktif. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan dengan rentang data yang lebih panjang, metode evaluasi yang lebih komprehensif, serta pemanfaatan bahasa pemrograman untuk analisis yang lebih mendalam.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan pengelompokan data vaksinasi PMK pada hewan berkuku belah/genap di Provinsi Aceh dengan mengadopsi algoritma *Fuzzy C-Means* pada periode 2022-2024. Hasil pengelompokan diharapkan dapat memberikan gambaran pola distribusi vaksinasi PMK secara lebih komprehensif dan menjadi dasar rekomendasi dalam mengoptimalkan program vaksinasi agar lebih merata, tepat sasaran, dan efektif dalam mencegah penyebaran kembali PMK di Provinsi Aceh. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemanfaatan metode data mining untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengendalian penyakit ternak di tingkat daerah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Data Mining

Penggalian pola dan informasi bernilai dari kumpulan data berskala besar sebagai inti dari *data mining*, yang penerapannya mulai ada sejak era 1990-an di ranah bisnis, pemasaran, sains, teknik, serta hiburan maupun seni. Berbagai sumber data dapat dipergunakan, termasuk aliran data yang terus masuk, gudang data, basis data, situs web, atau repositori informasi lainnya [5].

2.2. Clustering

Semua *Clustering* yaitu tahapan pengelompokan sekumpulan objek data ke dalam beberapa *cluster* sebagaimana kesamaan karakteristik. Tujuan utama dari pengelompokan adalah agar objek dalam satu *cluster* memiliki tingkat kemiripan yang tinggi, sementara objek dalam *cluster* lainnya memiliki perbedaan yang signifikan. Penilaian kemiripan dan ketidakmiripan ini didasarkan pada nilai atribut yang menggambarkan objek, yang sering kali melibatkan pengukuran jarak antar objek [6].

2.3. Fuzzy C-Means

Semua *Fuzzy C-Means* sebagai algoritma *clustering* yang dikembangkan dari *K-Means*. Daripada memaksakan setiap data masuk ke satu *cluster* secara mutlak yaitu pada *K-Means*, *Fuzzy C-Means* lebih mengimplementasikan konsep *fuzzy* sehingga sebuah data dapat mempunyai derajat keanggotaan pada lebih dari satu *cluster* [7]. Metode ini awalnya diusulkan oleh Dunn di tahun 1973

maupun diperbarui oleh Bezdek di tahun 1981, mengelompokkan objek dengan setiap objek memiliki derajat keanggotaan (antara 0 dan 1) dengan setiap *centroid cluster* [8], yang memungkinkan *Fuzzy C-Means* menangani ketidakpastian dan kompleksitas dalam data dengan memberikan tingkat keanggotaan parsial pada setiap *cluster* [9]. Keuntungan algoritma *Fuzzy C-Means* yakni kapabilitasnya yang luar biasa guna menemukan *cluster* tingkatan tinggi maupun menunjukkan hubungannya di antara berbagai model *cluster* [7].

2.4. Python

Dikembangkan pada akhir 1980-an oleh Guido van Rossum di *Centrum Wiskunde & Informatica* (CWI), Belanda, Python awalnya diperkenalkan di tahun 1991 sebagai penerus bahasa ABC. Bahasa pemrograman ini termasuk tingkatan tinggi maupun dikenal luas karena fleksibilitas serta kemampuannya yang mampu diterapkan di berbagai bidang [10]. Python merupakan bahasa pemrograman lintas *platform* yang digunakan untuk pengembangan web, perangkat lunak, skrip sistem, pemrograman mikrokontroler, serta pengolahan data dan perhitungan matematika kompleks. Kemampuannya dalam integrasi basis data, manipulasi berkas, dan pengembangan prototipe hingga aplikasi siap produksi menjadikan Python fleksibel dan banyak digunakan dalam berbagai kebutuhan pengembangan [11].

2.5. Google Colaboratory

Google Colaboratory adalah layanan Jupyter Notebook yang di hosting dan dirancang untuk memudahkan pengguna menulis serta menjalankan kode Python langsung dari *browser* tanpa memerlukan pengaturan tambahan. Layanan ini memberikan akses tanpa biaya ke sumber daya komputasi seperti GPU dan TPU, sehingga menjadi pilihan ideal untuk kebutuhan pembelajaran mesin, ilmu data, dan pendidikan. Selain itu, colab mendukung kemudahan kolaborasi dengan berbagi fitur yang intuitif, memungkinkan pengguna bekerja bersama dalam proyek secara efisien [12].

2.6. Penyakit Mulut dan Kuku (PMK)

PMK sebagai penyakit prioritas yang ditetapkan oleh Kesehatan Hewan Dunia (OIE) dan tergolong sebagai penyakit hewan menular strategis (PHMS) [13]. PMK, yang juga disebut foot and mouth disease (FMD), aphthous fever, ataupun aphthae epizootica, sebagai infeksi virus akut dengan tingkatan penularan sangat tinggi. Virus ini menyerang berbagai hewan berkuku belah, seperti ruminansia, babi, unta, serta beberapa jenis hewan liar [14].

Virus PMK mampu bertahan di lingkungan serta dalam cairan tubuh hewan terinfeksi dan secara klinis ditandai dengan demam serta pembentukan vesikel atau lepuh pada mulut dan sekitar kuku [13][14]. PMK disebabkan virus Aphthovirus dari famili Picornaviridae yang memiliki genom RNA untai

tunggal dan tidak beramplop [15]. Terdapat tujuh serotipe PMK yang berbeda secara imunologis, yakni O, A, C, SAT 1, SAT 2, SAT 3, maupun Asia 1, di mana wabah PMK di Indonesia dilaporkan disebabkan oleh serotipe O [14].

2.7. Vaksinasi

Vaksinasi adalah pemberian vaksin pada tubuh untuk membangun sistem kekebalan atau melindunginya dari penyakit, sehingga tubuh hanya akan mengalami sakit ringan atau tidak parah jika terinfeksi. Vaksinasi tidak hanya menghentikan rantai penularan suatu penyakit atau wabah, tetapi juga membunuh penyakit itu sendiri [4]. Karena PMK merupakan penyakit virus berdampak tinggi, vaksinasi terbukti efektif dan menjadi bagian penting dari pendekatan pengendalian penyakit ini, yang bertujuan untuk mengurangi angka kematian dengan meningkatkan kekebalan hewan terhadap virus serta membatasi penyebaran infeksi [16].

2.8. Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai penerapan metode *clustering* dalam analisis data kesehatan dan epidemiologi telah banyak dilakukan. Salah satu penelitian dilakukan oleh Yusril Hidayat dkk. [4] yang menerapkan algoritma *Fuzzy C-Means* untuk melakukan *clustering* data vaksinasi Penyakit Mulut dan Kuku (PMK). Penelitian tersebut berhasil mengelompokkan data vaksinasi PMK menjadi dua *cluster* utama, yaitu *cluster* dengan tingkat kekebalan tinggi sebanyak 48.704 ternak dan *cluster* dengan tingkat kekebalan rendah sebanyak 21.232 ternak. Evaluasi kualitas *cluster* menggunakan DBI menghasilkan nilai sebesar 0,416 yang menunjukkan bahwa pembentukan *cluster* tersebut termasuk optimal.

Penelitian lain dilakukan oleh Sarah dan Mustakim [7] yang menganalisis penerimaan vaksin Covid-19 menggunakan algoritma *Fuzzy C-Means*. Penelitian ini menggunakan atribut seperti jenis kelamin, umur, unit kerja, dan status vaksin dengan jumlah data sebanyak 10.325 entri. Hasil pengujian dengan beberapa jumlah *cluster* menunjukkan bahwa konfigurasi terbaik diperoleh pada lima *cluster* dengan nilai SI sebesar 0,1541. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Fuzzy C-Means* dapat digunakan untuk mengelompokkan data vaksinasi berdasarkan karakteristik tertentu.

Selanjutnya, penelitian oleh Mahardika dan Abadi [8] membandingkan metode *K-Means* dan *Fuzzy C-Means* dalam pemetaan kasus stunting pada balita di Kabupaten Gunungkidul. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kedua metode menghasilkan dua *cluster* optimal, namun metode *Fuzzy C-Means* memberikan performa yang lebih baik berdasarkan beberapa indeks evaluasi seperti SI, CHI, DBI, dan DI. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Fuzzy C-Means* memiliki kemampuan yang lebih baik dalam

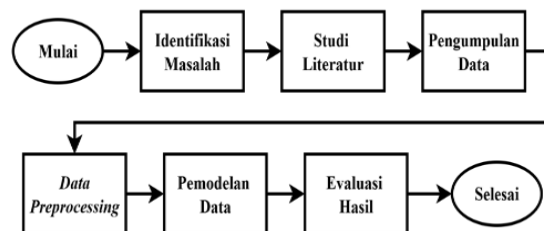
mengelompokkan data dengan karakteristik yang kompleks.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Nugraha dkk. [17] yang menerapkan metode *Fuzzy C-Means* untuk melakukan pengelompokan daerah berdasarkan persebaran penularan Covid-19. Penelitian tersebut menghasilkan beberapa *cluster* wilayah berdasarkan tingkat penyebaran kasus Covid-19 sehingga dapat membantu pemerintah dalam menentukan kebijakan penanganan pandemi di berbagai daerah.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat diketahui bahwa metode *Fuzzy C-Means* memiliki kemampuan yang baik dalam melakukan pengelompokan data berdasarkan tingkat kemiripan karakteristik tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan algoritma *Fuzzy C-Means* untuk melakukan *clustering* data vaksinasi Penyakit Mulut dan Kuku (PMK) pada ternak di Provinsi Aceh guna mengidentifikasi pola distribusi vaksinasi serta memberikan rekomendasi strategi vaksinasi yang lebih tepat sasaran.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi metode kuantitatif dengan pendekatan *data mining*. Algoritma yang diadopsi yaitu *Fuzzy C-Means* guna mengklasifikasikan data vaksinasi PMK di Provinsi Aceh periode 2022-2024 berdasarkan karakteristik spesifik ternak yang telah tervaksinasi. Agar didapatkan hasil yang tepat dengan proses yang terstruktur, prosedur penelitian yang dilakukan sebagai berikut:



Gambar 1. Prosedur Penelitian

3.1. Identifikasi Masalah

Pada tahapan ini, dirumuskan permasalahan utama terkait analisis data vaksinasi PMK pada hewan berkuku genap/belah di Provinsi Aceh. Analisis awal dilakukan untuk mengamati distribusi vaksinasi berdasarkan jenis hewan, jenis rumpun, jenis dan jumlah vaksin yang diberikan, serta sebaran lokasi vaksinasi.

3.2. Studi Literatur

Studi literatur dilaksanakan guna menambang pengetahuan dari beragam sumber, seperti jurnal ilmiah, buku referensi, serta dokumen resmi dari Dinas Peternakan Provinsi Aceh. Literatur ini digunakan untuk memberikan pemahaman mendalam mengenai topik yang diteliti dan menentukan metodologi penelitian yang paling sesuai.

3.3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilaksanakan melalui pendekatan dokumenter, dengan data sekunder sebagai sumber utama diperoleh dari Dinas Peternakan Provinsi Aceh, mencakup catatan vaksinasi PMK pada sapi, kerbau, kambing, domba, maupun babi di seluruh kabupaten/kota di Provinsi Aceh selama periode 2022-2024. Data disediakan dalam format Excel untuk memudahkan pengolahan dan analisis lebih lanjut.

3.4. Data Preprocessing

Data yang diperoleh kemudian diproses untuk memastikan kualitas dan konsistensinya sebelum dianalisis lebih lanjut. *Data preprocessing* menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan untuk menyiapkan data sebelum digunakan dalam pemodelan, meliputi *data understanding* dan *data preparation*. *Data understanding* ialah tahap menganalisis data yang digunakan dalam penelitian untuk memahami distribusi, karakteristik, dan pola yang mungkin terjadi, yaitu melakukan beberapa analisis awal seperti: cek tipe data kolom, cek *missing values*, cek nilai unik dan cek *outliers*.

Sedangkan *data preparation* mencakup serangkaian proses untuk membersihkan, mengubah, dan menyusun data agar siap untuk pemodelan. Tahap ini berfokus pada *data cleaning* meliputi penghapusan kolom yang tidak relevan, penanganan *missing values*, perbaikan format data yang tidak seragam, serta penghilangan *outliers*. Data yang telah bersih kemudian melalui proses *feature engineering* dengan mengonversi kolom umur menjadi numerik dan melakukan *encoding* terhadap atribut kategorikal.

3.5. Pemodelan Data

Tahap ini merupakan proses penerapan algoritma FCM guna melakukan mengklasifikasikan data vaksinasi PMK di Provinsi Aceh periode 2022-2024 berdasarkan karakteristik ternak yang telah tervaksinasi. Pengelompokan dilakukan dengan mempertimbangkan variabel seperti jumlah vaksinasi, jenis hewan, jenis rumpun, jenis kelamin, umur, dan lokasi vaksinasi. Berikut adalah tahap-tahap algoritma FCM [4] [8]:

- Memasukkan data yang akan dikategorikan X, berupa matriks berukuran:

$$n \times m \quad (1)$$
 dengan: n = jumlah data, m = atribut setiap data di mana: X_{ij} = data ke i (i = 1,2, ..., n) dengan atribut ke j (j = 1,2, ..., m).
- Melakukan penentuan parameter yang akan digunakan dalam proses analisis FCM yaitu:
 - Jumlah *cluster* = c (≥ 2);
 - Eksponen fuzzy = w;
 - Error terkecil yang diharapkan = ζ ;
 - Fungsi Objektif awal = $P_0=0$;
 - Iterasi awal = t=1
- Menetapkan nilai awal derajat keanggotaan μ_{ik} secara acak, lalu menyusunnya dalam bentuk

matriks U ukurannya n x c, dengan n= jumlah sampel, c = jumlah *cluster*

- Menghitung koordinat pusat *cluster* V_{kj} untuk setiap *cluster* ke-k, dengan k = 1, 2, ..., c maupun j = 1, 2, ..., m, sebagai representasi posisi *cluster* dalam ruang data

$$V_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^n ((\mu_{ij})^2 * X_{ij})}{\sum_{i=1}^n (\mu_{ij})^2} \quad (2)$$

- Menghitung nilai fungsinya yang objektif atas iterasi ke -t yaitu P_t

$$P_t = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c \left(\left[\sum_{j=1}^m (X_{ij} - V_{kj})^2 \right] (\mu_{ij})^w \right) \quad (3)$$

- Menghitung perubahan matriks partisi (μ_{ik})

$$\mu_{ij} = \frac{\left[\sum_{k=1}^c ((X_{ij} - V_{kj})^2)^{\frac{-1}{w-1}} \right]}{\sum_{k=1}^c \left[\sum_{j=1}^m ((X_{ij} - V_{kj})^2)^{\frac{-1}{w-1}} \right]} \quad (4)$$

- Terakhir periksa kondisi berhenti:

- Proses iterasi akan dihentikan apabila perbedaan antara ($|P_t - P_{t-1}| < \varepsilon$) atau ($t > \text{MaksIter}$).
- Apabila kedua kondisi tersebut tidak terpenuhi, maka t dinaikkan 1 langkah dan perhitungan dilanjutkan dengan langkah ke-4 dengan mengadopsi nilai μ_{ik} yang sudah diperbarui.

3.6. Evaluasi Hasil

Tahap evaluasi hasil dilakukan untuk menilai kualitas dan validitas hasil clustering yang dihasilkan oleh algoritma *Fuzzy C-Means*. Evaluasi *cluster* dilakukan untuk menunjukkan kelayakan hasil pengelompokan suatu metode dengan menggunakan nilai tertentu. Ada beberapa ukuran evaluasi yang digunakan, yaitu [8]:

3.7. Davies-Bouldin Index (DBI)

DBI yakni algoritma yang mengukur kualitas *clustering* dengan memperhatikan kedekatan antar *cluster* dan jarak antar *cluster*. Metode DBI ditemukan oleh dua orang sahabat, David L. Davies dan Donald W. Bouldin. Mereka memperkenalkan metode ini untuk mengevaluasi hasil *cluster* berdasarkan kuantitas dan kedekatannya antara *cluster* satu dengan yang lainnya. Jika DBI semakin kecil, maka *cluster* yang dihasilkan juga semakin optimal [4].

$$R_{i,j} = \frac{M AE_i + M AE_j}{d(C_i, C_j)} \quad (5)$$

Keterangan:

- MAE_i dan MAE_j = ukuran kepadatan masing-masing *cluster* i dan j,
- $d(C_i, C_j)$ = jarak antara pusat *cluster* i dan j.

Setelah menghitung $R_{i,j}$ untuk setiap pasangan *cluster*, nilai DBI dihitung dengan rumus:

$$DBI = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \max(R_{ij}) \quad (6)$$

Di mana M adalah jumlah *cluster* yang terbentuk. Nilai DBI yang lebih rendah memperlihatkan kualitas clustering yang dihasilkan, karena menegaskan bahwasanya *cluster* lebih padat maupun terpisah.

3.8. Silhouette Index (SI)

SI adalah cara untuk menentukan sejauh mana kelompok data dalam *clustering* itu valid. Cara ini biasanya dihitung dengan mencari rata-rata dari setiap data, baik untuk masing-masing kelompok maupun seluruh data. Secara khusus, perhitungan rerata ini didasarkan pada perbedaannya di antara nilai separasi maupun kompresi, kemudian dibagi dengan nilai tertinggi dari kedua nilai tersebut [7]. Perhitungan SI diawali dengan menentukan *Silhouette Coefficient* (SC) untuk setiap objek data (*i*) yang terdapat dalam dataset, yang dirumuskan dengan mempertimbangkan jarak setiap objek *i* dalam *cluster* dan antar *cluster* [8]:

$$SC = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{b_k - a_k}{\max(a_k, b_k)}}{n} \quad (7)$$

Keterangan:

- a_k = jarak rata-rata suatu objek tertentu (M_i) ke seluruh objek dalam *cluster* yang sama
- b_k = jarak rata-rata objek M_i ke seluruh objek dalam setiap *cluster* (selain yang berisi titik M_i)
- n = jumlah data

Setelah SC dihitung untuk setiap objek, nilai rata-rata dari semua koefisien tersebut dihitung untuk mendapatkan SI, yang merupakan nilai akhir yang digunakan untuk mengevaluasi validitas *cluster* dengan rumus [7]:

$$SI = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k SI_j \quad (8)$$

Nilai SI yang kisarannya diantara -1 hingga +1. Nilai yang mendekati +1 memperlihatkan *cluster* yang terdefinisi dengan baik, sedangkan nilai yang mendekati -1 mengungkapkan objek yang mungkin salah dikelompokkan.

3.9. Calinski-Harabasz Index (CHI)

CHI didasarkan pada hubungan diantara jumlah kuadrat jarak antara pusat setiap *cluster* dan *centroid* kumpulan data dengan jumlah kuadrat jarak antara pusat setiap *cluster* dan setiap titik dalam *cluster*. Berikut adalah persamaan untuk menentukan CHI [8]:

$$CHI = \frac{BGSS}{WGSS} \times \frac{n - c}{c - 1} \quad (9)$$

Keterangan:

- n = jumlah data
- c = jumlah cluster
- BGSS = jumlah kuadrat jarak antara pusat setiap cluster dan pusat massa seluruh data
- WGSS = jumlah kuadrat jarak antara pusat setiap cluster dan setiap titik dalam cluster

Hasil dari ketiga metrik tersebut digunakan untuk menentukan seberapa optimal jumlah *cluster* yang terbentuk dan seberapa baik performa algoritma FCM dalam mengelompokkan data vaksinasi PMK di Provinsi Aceh.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data mentah diolah dan dianalisis secara mendalam menggunakan Google Colaboratory dengan

bahasa pemrograman Python. Proses analisis yang dilakukan meliputi tiga tahapan utama: *data preprocessing*, pemodelan data, dan evaluasi hasil untuk menilai performa model yang dikembangkan.

4.1. Data Preprocessing

Setelah melalui tahap *data preprocessing* yang mencakup proses pembersihan, transformasi, dan penyesuaian format data, diperoleh dataset akhir yang siap untuk dianalisis lebih lanjut. Cuplikan hasil data bersih ditunjukkan pada gambar berikut:

ID	Program Vaksinasi	Provinsi	Kabupaten	Kecamatan	Besa	Urutan Vaksinasi	Kartu Terak	Heum	Rumpon	Jenis Kelamin	Umur
0	37511929	1	Aceh	Bireuen	Pandah	Panton	1	5365212	1	1	2 731
1	37511782	1	Aceh	Bireuen	Pandah	Panton	3	5380349	1	1	2 1137
2	3752015	1	Aceh	Bireuen	Pandah	Panton	3	5379876	1	1	2 1137
3	3758002	1	Aceh	Bireuen	Pandah	Panton	3	53745077	1	1	1 1139
4	3757964	1	Aceh	Bireuen	Pandah	Panton	3	5374284	1	1	1 1504
...											
619875	8490995	7	Aceh	Aceh Jaya	Klueng Sabee	Dayah Baro	2	5440281	1	9	2 3051
619876	8490963	7	Aceh	Aceh Jaya	Klueng Sabee	Dayah Baro	2	3586362	1	9	2 1741
619877	8490927	7	Aceh	Aceh Jaya	Klueng Sabee	Dayah Baro	2	4437022	1	9	2 1236
619878	8490797	7	Aceh	Aceh Jaya	Klueng Sabee	Dayah Baro	2	6079983	1	9	2 2322
619880	8490746	7	Aceh	Aceh Jaya	Klueng Sabee	Dayah Baro	2	36206310	1	9	2 1138

591992 rows x 12 columns

Gambar 2. Dataset Bersih Hasil *Data Preprocessing*

4.2. Pemodelan Data

Dataset yang telah bersih dari hasil data preprocessing, kemudian diolah menggunakan algoritma FCM untuk membentuk kelompok data berdasarkan kesamaan karakteristik. Sebelum dilakukan proses *clustering*, dilakukan instalasi algoritma dan pemanggilan pustaka yang diperlukan pada *platform* Google Colaboratory. Setelah seluruh persiapan selesai, algoritma FCM diterapkan melalui beberapa tahapan berikut:

- Masukan data berupa matriks X berordo $n \times m$

```

Ukuran matriks X: (591992, 6)
Contoh isi matriks X:
[[ 1 1 1 1 1 2 731]
 [ 1 3 1 1 1 2 1137]
 [ 1 3 1 1 1 2 1137]
 ...
 [ 7 2 1 9 2 1236]
 [ 7 2 1 9 2 2322]
 [ 7 2 1 9 2 1138]]

```

Gambar 3. *Input Data Matriks X*

- Tentukan parameter yang akan digunakan dalam algoritma FCM

```

c = 6
w = 2.0
epsilon = 1e-3
max_iter = 150
p0 = 0
t = 1

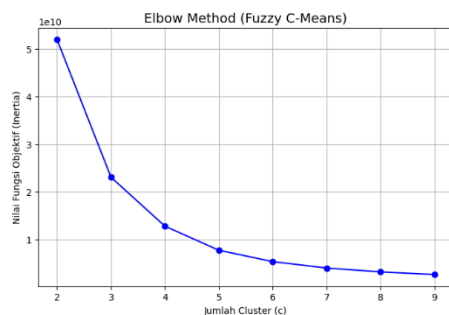
```

Gambar 4. Parameter Perhitungan FCM

Untuk menentukan jumlah *cluster* disini menggunakan *Elbow Method* yang bekerja dengan membandingkan nilai *Sum of Squared Errors* (SSE) yang diperoleh dari setiap percobaan dengan jumlah *cluster* yang berbeda untuk merekomendasikan jumlah total *cluster* terbaik, yang dapat memberikan hasil terbaik selama proses *clustering*. SSE merupakan jumlah kuadrat jarak

setiap titik data terhadap pusat *cluster* terdekat [17].

Hasil *Elbow Method* menunjukkan titik siku pertama pada 3 *cluster*. Namun, penurunan inertia masih terlihat cukup tajam, dimana mulai melandai pada rentang 4 hingga 6 *cluster*, yang mengindikasikan titik optimal jumlah *cluster* berada pada kisaran tersebut sebelum grafik mulai melandai pada jumlah *cluster* yang lebih tinggi. Dapat disimpulkan bahwasanya penggunaan 6 *cluster* adalah pilihan yang paling tepat dimana akan memberikan segmentasi yang lebih detail dan representatif untuk menggambarkan keragaman data yang besar dan kompleks.



Gambar 5. *Elbow Method* Penentuan Jumlah Cluster

- c. Mulai dengan membangkitkan nilai acak μ_{ik} sebagai derajat keanggotaan, yang kemudian disusun dalam matriks U berordo $n \times c$.

Ukuran Matriks U0: (591992, 6)

Matriks Partisi Awal (U0):

```
[[[0.11494356 0.03740401 0.12197008 0.24891622 0.23758768 0.23917845]
[0.19398543 0.10423091 0.10230881 0.17000068 0.23074277 0.1987314 ]
[0.14217867 0.09243419 0.23639249 0.02337764 0.12080274 0.38481426]
...
[0.05490813 0.16014236 0.0682436 0.23778802 0.19996354 0.27895436]
[0.20099003 0.20876536 0.19832242 0.12937981 0.19376854 0.06877384]
[0.05264717 0.08703477 0.09358375 0.13039906 0.60197375 0.0343615 ]]]
```

Gambar 6. Bilangan Random μ_{ik} atau Matriks U0

- d. Setelah itu, tentukan posisi pusat masing-masing *cluster*. Pada tahap ini, matriks partisi awal U_0 dipangkatkan sesuai parameter w , lalu dihitung koordinat pusat *cluster* berdasarkan hasil tersebut:

Matriks Partisi Awal Dipangkatkan (U^w):

```
[[[0.01321202 0.00139906 0.0148767 0.06105929 0.05644791 0.05720633]
[0.03763035 0.01086408 0.01046709 0.02890023 0.05324223 0.03949417]
[0.02021477 0.00854408 0.05588141 0.00054651 0.0145933 0.14808202]
...
[0.0030149 0.02564557 0.00465719 0.05654314 0.03998542 0.07781553]
[0.04830699 0.04358298 0.03933178 0.01673914 0.03754625 0.00472984]
[0.00277172 0.00757505 0.00875792 0.01700391 0.3623724 0.00118071]]]
```

Gambar 7. Matriks Partisi Awal U_0 Dipangkatkan

Pusat *cluster* (centers):

```
[[[ 3.45741687 1.52544865 1.6338137 7.76268687 1.6261684
1309.2936561 ]
[ 3.46212891 1.52713942 1.6314579 7.75665157 1.6264168
1310.62737622 ]
[ 3.46136265 1.52552527 1.63294787 7.75500247 1.62586348
1310.32238064 ]
[ 3.45858437 1.52624529 1.63441122 7.76424156 1.62582357
1308.56081047 ]
[ 3.45753633 1.52657296 1.63129014 7.75754895 1.62625016
1309.17816337 ]
[ 3.4576994 1.52945346 1.6329513 7.76514442 1.62601588
1310.6006766 ]]]
```

Gambar 8. Pusat *Cluster* Iterasi Pertama

- e. Dengan pusat *cluster* yang sudah diperoleh, langkah berikutnya melakukan penghitungan nilai fungsi objektif pada iterasi pertama (P_1), yang bernilai 47447208374,9393.
- f. Selanjutnya, evaluasi perubahan matriks partisi μ_{ik} untuk menghasilkan matriks partisi terbaru:

Matriks Partisi Baru (U):

```
[[[0.1669368 0.16616959 0.16634459 0.16736063 0.16700353 0.16618485]
[0.16756519 0.16500576 0.16558604 0.168997 0.16779007 0.16505594]
[0.16756519 0.16500576 0.16558604 0.168997 0.16779007 0.16505594]
...
[0.16874746 0.16278631 0.16412112 0.17216404 0.16927882 0.16290224]
[0.16651163 0.16695109 0.16685044 0.16627091 0.16647366 0.16694227]
[0.16757168 0.16499377 0.16557798 0.16901411 0.16779772 0.16504474]]]
```

Gambar 9. Matriks Partisi Baru U1

- g. lakukan pengecekan:

Pada ($t=1$), nilai $P_1 = 47447208374,9393$ sedangkan $P_{t-1} = 0$. Karena $|47447208374,9393|$ masih lebih besar dari 1×10^{-5} , proses dilanjutkan dengan kembali ke langkah ke-4 mempergunakan nilai μ_{ik} yang telah diperbarui.

Konvergen pada iterasi 85 dengan $P_t = 5358655163.6106$

Akhir Iterasi

Pusat *cluster* terakhir:

```
[[[3.54603902e+00 1.58293137e+00 1.52850543e+00 7.52804663e+00
1.59547032e+00 1.38159366e+03]
[3.62434488e+00 1.73897865e+00 1.23071820e+00 7.48274554e+00
1.86635593e+00 2.17787129e+03]
[3.70802725e+00 1.69769574e+00 1.33470507e+00 7.35547259e+00
1.74918158e+00 1.76008713e+03]
[3.10129475e+00 1.28661960e+00 2.03123890e+00 8.19912878e+00
1.54612903e+00 6.39613704e+02]
[3.38146837e+00 1.51196055e+00 1.83101384e+00 8.28122555e+00
1.52672480e+00 1.01972404e+03]
[3.68667962e+00 1.72437683e+00 1.18731504e+00 7.36699786e+00
1.90617994e+00 2.68346679e+03]]]
```

Gambar 10. Akhir Iterasi dan Pusat *Cluster* Akhir

Hasil ini menunjukkan bahwasanya algoritma *clustering* telah konvergen atau berhenti setelah mencapai iterasi ke-85 dengan nilai fungsi objektif adalah 5358655163,6106. Di bawahnya, ditampilkan pusat-pusat *cluster* terakhir yang telah diperbarui, yang merupakan hasil akhir dari proses pengelompokan.

Setelah proses *clustering* selesai, setiap entri data telah diberi label *cluster* yang sesuai, seperti yang terlihat pada kolom *Cluster* di gambar. Kolom ini menunjukkan hasil pengelompokan setiap data ke dalam salah satu dari *cluster* yang telah ditentukan.

	ID	Program Vaksinasi	Instansi	Kabupaten	Kecamatan	Desa	Urutan Vaksinasi	Kartu Terakun	Umur	Jenis Kelamin	Usia	Cluster
	0	37511029	1	Acch	Bleum	Pandah	Pantou	1	83650212	1	1	2 731 3
	1	37511182	1	Acch	Bleum	Pandah	Pantou	3	53030409	1	1	2 1137 4
2	37512015	1	Acch	Bleum	Pandah	Pantou	3	53798796	1	1	2	1137 4
3	37500002	1	Acch	Bleum	Pandah	Pantou	3	53740077	1	1	1	1139 4
4	37579964	1	Acch	Bleum	Pandah	Pantou	3	53740204	1	1	1	1504 0
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61075	8400095	7	Acch	Acch Jaya	Koang Sabee	Dayah Baro	2	54440061	1	9	2	3001 5
61076	8400063	7	Acch	Acch Jaya	Koang Sabee	Dayah Baro	2	53080362	1	9	2	1741 2
61077	8400027	7	Acch	Acch Jaya	Koang Sabee	Dayah Baro	2	44377022	1	9	2	1236 0
61078	8400737	7	Acch	Acch Jaya	Koang Sabee	Dayah Baro	2	60799653	1	9	2	2332 1
61080	8400146	7	Acch	Acch Jaya	Koang Sabee	Dayah Baro	2	30206310	1	9	2	1136 4

61095000 to 61330000

Gambar 11. Hasil *Clustering* Dataset Vaksinasi PMK

Proses *clustering* menghasilkan enam kelompok data dengan jumlah anggota yang bervariasi. *Cluster* terbesar adalah *Cluster* 4 (168.003 data), diikuti *Cluster* 3 (140.057 data), *Cluster* 0 (115.033

data), *Cluster 2* (72.143 data), *Cluster 1* (58.787 data), dan *Cluster 5* (37.939 data). Distribusi ini menunjukkan adanya variasi alami populasi ternak berdasarkan wilayah, umur, dan tahapan vaksinasi di Provinsi Aceh. Secara umum, populasi ternak yang divaksinasi didominasi oleh sapi dengan proporsi sekitar 69% dari total keseluruhan populasi, diikuti oleh kambing, kerbau, dan domba dalam jumlah lebih kecil. Jenis kelamin betina lebih dominan pada hampir seluruh *cluster*, sedangkan jenis vaksin yang paling banyak digunakan adalah Vaksinasi PMK Nasional 2023-Cavac, dimana sebagian besar ternak masih berada pada tahap awal hingga menengah vaksinasi, terutama pada dosis pertama dan kedua, yang memerlukan upaya pemerintah dalam memperluas cakupan perlindungan PMK di lapangan.

Berdasarkan hasil pengelompokan, karakteristik tiap *cluster* dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Cluster 0* menunjukkan kelompok ternak dewasa muda pada tahap awal-menengah vaksinasi, didominasi vaksin *Cavac*, jenis hewan yaitu sapi (72,48%), kambing (19,34%), serta kerbau (6,27%). Rumpun utama terdiri atas sapi lokal (34,67%), sapi Aceh (32,58%), dan kambing lokal (11,10%). Sebagian besar berjenis kelamin betina (58,17%) dengan rata-rata umur 3,7 tahun, menggambarkan ternak produktif muda.
- Cluster 1* menggambarkan populasi ternak dewasa matang, didominasi vaksin *Cavac* dengan jenis hewan sapi (84,18%) dan kerbau (11,02%). Rumpun utama yaitu sapi lokal (44,99%), sapi Aceh (33,44%), serta kerbau lokal (8,81%). Proporsi betina (86,15%) jauh lebih tinggi, dengan rata-rata umur 5,9 tahun, menunjukkan hewan dewasa produktif yang aktif secara reproduktif.
- Cluster 2* merepresentasikan tahap menengah vaksinasi dengan dominasi vaksin *Cavac*. Jenis hewan terdiri atas sapi (80,07%), kambing (10,77%), dan kerbau (8,68%), dengan rumpun utama sapi lokal (40,67%) dan sapi Aceh (33,96%). Jenis kelamin betina (73,71%) mendominasi, rata-rata umur 4,8 tahun, menandakan hewan produktif puncak yang difokuskan untuk menjaga keberlanjutan produksi.
- Cluster 3* menggambarkan populasi hewan muda pada tahap awal vaksinasi, didominasi vaksin *Cavac* dengan dosis pertama (75,02%). Jenis hewan meliputi sapi (49,72%), kambing (42,21%), kerbau (4,42%), dan domba (3,66%). Rumpun utama adalah sapi Aceh (27,76%), kambing lokal (25,74%), dan sapi lokal (18,06%). Proporsi betina (54,77%) sedikit lebih tinggi, dengan umur rata-rata 1,8 tahun, menunjukkan sasaran vaksinasi primer untuk pembentukan kekebalan awal.
- Cluster 4* merupakan kelompok terbesar yang mencerminkan hewan muda dewasa dengan vaksin *Cavac*. Jenis hewan terdiri dari sapi (59,25%),

kambing (31,60%), kerbau (5,50%), dan domba (3,65%). Rumpun utama yaitu sapi lokal (30,09%), sapi Aceh (24,81%), kambing lokal (18,90%), serta kambing kacang (11,11%). Proporsi betina (52,92%) sedikit lebih tinggi, dengan rata-rata umur 2,8 tahun, menggambarkan ternak muda produktif pada masa awal produksi.

Cluster 5 merupakan kelompok dengan populasi paling sedikit yang didominasi vaksin *Cavac* dan jenis hewan yaitu sapi (83,20%), kerbau (14,11%), serta sedikit kambing dan domba. Rumpun utama sapi Aceh (37,82%), sapi lokal (37,48%), dan kerbau lokal (10,74%). Jenis kelamin sangat didominasi oleh betina (90,47%), dengan umur rata-rata 7,3 tahun, menandakan kelompok hewan tua yang menjadi fokus pemeliharaan kesehatan dan reproduksi jangka panjang.

4.3. Evaluasi Hasil

Bagian ini ada tiga metrik evaluasi dipergunakan dalam mengukur kualitas model dengan hasil evaluasi seperti gambar berikut:

Metric Evaluation	Score
Calinski Harabasz	3237949.606157
Davies Bouldin	0.476466
Silhouette	0.586379

Gambar 12. Hasil Evaluasi Metrik *Clustering*

Hasil evaluasi mengungkapkan bahwasanya model *clustering* mempunyai kualitas yang sangat baik. Setiap metrik memberikan perspektif yang berbeda tentang seberapa baik *cluster-cluster* tersebut terbentuk.

- Calinski-Harabasz*: 3,237,970.54, yang sangat tinggi ini menandakan bahwasanya *cluster-cluster* yang terbentuk sangat padat dan terpisah dengan baik. Metrik ini mengukur rasio antara variabilitas antarcluster dan variabilitas dalam cluster. Nilai yang besar menunjukkan bahwasanya *cluster-cluster* berbeda satu sama lain (variabilitas antarcluster tinggi) sementara anggota di dalam setiap cluster saling berdekatan (variabilitas dalam cluster rendah).
- Davies-Bouldin*: 0.476, yang sangat rendah ini menunjukkan bahwasanya *cluster-cluster* yang dihasilkan kompak dan terpisah dengan baik. Metrik ini mengukur seberapa mirip suatu cluster dengan cluster terdekatnya. Nilai yang mendekati nol menandakan pemisahan cluster yang optimal karena setiap cluster memiliki kesamaan yang rendah dengan cluster lain di sekitarnya.
- Silhouette*: 0.586, mendekati 1 ini adalah indikator yang kuat bahwasanya data dikelompokkan dengan sangat baik, yang berarti bahwasanya berbagai objek dalam cluster berada sangat dekat satu sama lain dan cukup jauh dari objek di cluster lain.

Secara keseluruhan, ketiga metrik ini secara konsisten menunjukkan bahwasanya proses *clustering* telah berhasil membagi data menjadi *cluster-cluster* yang sangat jelas, padat, dan terpisah secara definitif. Hasil, Pengujian dan pembahasan tentang skripsi yang telah dilakukan

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis data vaksinasi Penyakit Mulut dan Kuku (PMK) periode 2022–2024 di Provinsi Aceh, dapat disimpulkan bahwa algoritma Fuzzy C-Means mampu mengelompokkan data secara optimal menjadi enam cluster utama, yaitu Cluster 0 (115.033 data), Cluster 1 (58.787 data), Cluster 2 (72.143 data), Cluster 3 (140.057 data), Cluster 4 (168.003 data), dan Cluster 5 (37.939 data), dengan kualitas pengelompokan yang sangat baik berdasarkan nilai CHI sebesar 3.237.970,54, DBI 0,476, dan SI 0,586 yang menunjukkan struktur cluster padat, terpisah jelas, dan valid secara statistik. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa sapi merupakan hewan yang paling banyak divaksin ($\pm 69\%$), dengan dominasi penggunaan vaksin PMK Nasional 2023-Cavac serta mayoritas ternak yang divaksin berjenis kelamin betina ($\pm 70\%$), sehingga menegaskan pentingnya prioritas pada sapi betina produktif dalam strategi pengendalian. Temuan ini membuktikan bahwa Fuzzy C-Means efektif dalam mengidentifikasi pola distribusi vaksinasi PMK dan dapat menjadi dasar ilmiah bagi perencanaan distribusi vaksin yang lebih efisien, merata, dan berkelanjutan. Oleh karena itu, disarankan agar program vaksinasi diprioritaskan berdasarkan kelompok umur dan jenis kelamin ternak, difokuskan pada wilayah dengan kepadatan tinggi, diperkuat pada daerah dengan cakupan rendah, serta didukung oleh monitoring dan evaluasi berkala berbasis evidence-based policy. Selain itu, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengembangkan sistem pendukung keputusan terintegrasi dengan visualisasi GIS atau dashboard interaktif, membandingkan Fuzzy C-Means dengan metode clustering lainnya, serta menambahkan variabel pendukung agar perencanaan pengendalian PMK di Provinsi Aceh menjadi lebih komprehensif dan adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Septiani, R. H. Hirzi, and N. U. Fikriah, "Analisis Penyebaran Jumlah Kasus PMK Pada Hewan Ternak Sapi Di Kabupaten Lombok Tengah Menggunakan Indeks Moran Tahun 2022," *Var. J. Stat. Its Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 159–168, 2023, doi: 10.30598/variancevol5iss2page159-168.
- [2] P. M. Bulu, "Review: Epidemiologi, Penanggulangan dan Pemberantasan Penyakit Mulut dan Kuku (Pembelajaran dari Wabah PMK Indonesia 1887-1997)," *Partner*, vol. 28, no. 1, pp. 62–72, 2023, doi: 10.35726/jp.v28i1.6840.
- [3] Safrina, "Aceh Bebas Kasus Ternak Terinfeksi Penyakit Mulut dan Kuku," Pemerintah Provinsi Aceh. Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://acehprov.go.id/berita/kategori/kesehatan/aceh-bebas-kasus-ternak-terinfeksi-penyakit-mulut-dan-kuku>.
- [4] Y. Hidayat, A. Nazir, R. M. Candra, S. Sanjaya, and F. Syafria, "Clustering Vaksinasi Penyakit Mulut dan Kuku Menggunakan Algoritma Fuzzy C-Means," *J. Comput. Syst. Informatics*, vol. 4, no. 3, pp. 587–593, 2023, doi: 10.47065/josyc.v4i3.3416.
- [5] Amna et al., *Data Mining*, 1st ed. Sumatera Barat: PT Global Eksekutif Teknologi, 2023.
- [6] J. Han, J. Pei, and H. Tong, *Data Mining Concepts and Techniques*, 4th ed. United States of America: Morgan Kaufmann, 2022.
- [7] S. Sarah and Mustakim, "Analisis Penerimaan Vaksin Covid-19 Berbasis Fuzzy Clustering Machine Learning di Provinsi Riau," *JURIKOM (Jurnal Ris. Komputer)*, vol. 8, no. 6, pp. 213–218, 2021, doi: 10.30865/jurikom.v8i6.3636.
- [8] B. W. Mahardika and A. M. Abadi, "Implementation of K-Means and Fuzzy C-Means Clustering for Mapping Toddler Stunting Cases in Gunungkidul District," *BAREKENG J. Math. Its Appl.*, vol. 18, no. 4, pp. 2231–2246, 2024, doi: 10.30598/barekengvol18iss4pp2231-2246.
- [9] F. Sulianta, *Basic Data Mining from A to Z - Dasar Membangun Tindakan Bisnis*. 2023.
- [10] Wikipedia, "Python (Bahasa Pemrograman)," Wikipedia. [Online]. Available: [https://id.wikipedia.org/wiki/_\(bahasa_pemrograman\)](https://id.wikipedia.org/wiki/_(bahasa_pemrograman))[https://id.wikipedia.org/wiki/_\(bahasa_pemrograman\)](https://id.wikipedia.org/wiki/_(bahasa_pemrograman))
- [11] A. Ma'arif, "Buku Ajar Pemrograman Lanjut Bahasa Pemrograman Python," Universitas Ahmad Dahlan. Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://eprints.uad.ac.id/32743/1/buku.pdf>
- [12] Colab, "Welcome to Colab!," Colab. [Online]. Available: <https://colab.research.google.com/?hl=en-GB>
- [13] R. A. N. Fathurrohman and D. S. K. Dewi, "Dinamika Kebijakan Pemerintah Indonesia dalam Menangani Endemi Penyakit Mulut dan Kuku (PMK) Tahun 2022," *J. Ilmu Sos. dan Ilmu Polit.*, vol. 12, no. 3, pp. 317–327, 2023, doi: 10.33366/jisip.v12i3.2670.
- [14] Nuryani Zainuddin et al., *Kesiagaan Darurat Veteriner Indonesia Seri: Penyakit Mulut dan Kuku (Kiat Vetindo PMK)*, 3.1. Kementerian Pertanian Dirjen Peternakan dan Kesehatan Hewan, 2022.
- [15] Wikipedia, "Virus Penyakit Mulut dan Kuku," Wikipedia. Accessed: Jun. 23, 2025. [Online]. Available: https://id.wikipedia.org/wiki/Virus_penyakit_m

- ulut_dan_kuku
- [16] N. L. P. D. Rysdayeni, I. K. Puja, and I. W. Sukernayasa, "Association of Foot and Mouth Disease Vaccination with Fertility Performance of Bali Cattle on Farmers in Badung District," *Bul. Vet. Udayana*, vol. 17, no. 2, pp. 417–423, 2025.
- [17] G. S. Nugraha *et al.*, "Implementasi Fuzzy C-Means untuk Pengelompokkan Daerah Berdasarkan Persebaran Penularan Covid-19," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 10, no. 1, pp. 97–103, 2023, doi: 10.25126/jtiik.2023105796.