

Analisis Efektivitas Jalur Evakuasi Gunung Agung Menggunakan Konsep Ruang Vektor dan Proyeksi Ortogonal

Helena Kristela Sarhawa - 13524109^{1,2}

Program Studi Teknik Informatika

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

¹13524109@std.stei.itb.ac.id, ²hkristela03@gmail.com

Abstrak—Gunung Agung merupakan salah satu gunung berapi aktif di Indonesia yang berlokasi di Bali. Gunung ini menjadi gunung yang disakralkan oleh umat Hindu sehingga banyak upacara adat yang dilakukan di sekitar gunung, seperti Upacara Eka Dasa Rudra. Gunung Agung pun dipercaya sebagai istana para dewa sehingga didirikan Pura Agung Besakih di lereng gunung yang ditujukan sebagai tempat perantara para dewa. Oleh karena banyaknya aktivitas di sekitar gunung, terlebih gunung ini masih bersifat aktif, diperlukan jalur evakuasi yang efektif dalam meminimalkan risiko korban jiwa saat terjadi erupsi. Makalah ini dibuat dengan tujuan untuk menganalisis efektivitas jalur evakuasi Gunung Agung dengan menggunakan konsep-konsep yang telah diajarkan pada mata kuliah Aljabar Linier dan Geometri, khususnya konsep terkait ruang vektor, basis vektor, norma vektor, perkalian titik, dan proyeksi ortogonal. Jalur evakuasi direpresentasikan sebagai arah evakuasi dominan yang dimodelkan sebagai vektor pada ruang Euclidean, sedangkan arah aman didefinisikan sebagai vektor radial yang menjauhi pusat erupsi. Efektivitas rute dievaluasi menggunakan dua indikator utama, yaitu nilai $\cos \theta_i$ dan besar komponen proyeksi sebagai ukuran keselarasan arah, serta besar komponen lateral sebagai ukuran deviasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu mengidentifikasi rute-rute yang memiliki deviasi arah besar, termasuk rute yang tidak selaras bahkan berlawanan dengan arah aman, sehingga berpotensi kurang efektif secara geometris.

Kata kunci—Gunung Agung, jalur evakuasi, norma vektor, proyeksi ortogonal, ruang vektor.

I. PENDAHULUAN

Piek Van Bali atau lebih dikenal dengan Gunung Agung merupakan salah satu gunung berapi aktif di Indonesia yang terletak di Pulau Bali. Menurut Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Gunung Agung masih berpotensi mengalami erupsi, baik secara eksplosif maupun secara efusif. Di balik potensi bahaya erupsinya, Gunung Agung menjadi gunung yang disakralkan oleh umat Hindu. Banyak upacara adat yang diselenggarakan di dekat gunung tersebut, salah satunya adalah Upacara Eka Dasa Rudra. Upacara ini

dilaksanakan setiap seratus tahun sekali ketika angka satuan dan puluhan sebuah tahun Saka mencapai angka nol. Upacara Eka Dasa Rudra diselenggarakan di Pura Agung Besakih yang didirikan di lereng Gunung Agung sebab gunung ini dipercaya sebagai istana para dewa. Pendirian Pura Agung Besakih ditujukan sebagai tempat perantara para dewa. Oleh karena banyaknya aktivitas adat dan keagamaan, kawasan di sekitar Gunung Agung menjadi sering dikunjungi dan dipadati oleh masyarakat. Kondisi tersebut menyebabkan faktor keselamatan, terutama jalur evakuasi saat erupsi terjadi, menjadi hal yang harus diperhatikan.

Dalam situasi darurat akibat aktivitas vulkanik, keberadaan jalur evakuasi yang efektif berperan besar dalam meminimalkan risiko korban jiwa. Jalur evakuasi yang dimaksud turut mencakup arah pergerakan evakuasi yang menjauhi dari pusat erupsi secara optimal. Diperlukan sebuah pendekatan yang mampu menganalisis efektivitas jalur evakuasi dari sudut pandang arah dan keselarasan pergerakan tanpa bergantung pada data rinci tentang kondisi infrastruktur jalan di lapangan.

Makalah ini dibuat dengan menggunakan pendekatan konsep-konsep aljabar linier dan geometri untuk menganalisis efektivitas jalur evakuasi Gunung Agung. Konsep seperti ruang vektor, norma vektor, perkalian titik, dan proyeksi ortogonal dimanfaatkan untuk memodelkan jalur evakuasi melalui arah evakuasi dominan yang direpresentasikan sebagai vektor pada ruang Euclidean. Nilai $\cos \theta_i$ antara vektor evakuasi dan vektor aman digunakan sebagai ukuran keselarasan arah, sedangkan komponen lateral, komponen tegak lurus proyeksi, digunakan untuk menilai besar deviasi terhadap arah aman.

Rumusan masalah yang mendasari pembuatan makalah ini yakni bagaimana memodelkan jalur evakuasi Gunung Agung menggunakan konsep ruang vektor serta bagaimana mengevaluasi keselarasan arah rute terhadap arah aman menggunakan nilai $\cos \theta_i$, proyeksi ortogonal, serta komponen deviasi lateral. Adapun tujuan penulisan makalah ini yakni untuk memberikan gambaran sederhana mengenai penerapan konsep aljabar linier dan

geometri dalam permasalahan nyata, khususnya dalam konteks analisis jalur evakuasi gunung berapi secara geometris.

II. DASAR TEORI

A. Representasi Vektor dan Ruang Euclidean

Kuantitas fisik dapat direpresentasikan ke dalam dua jenis, yakni skalar dan vektor. Skalar merupakan kuantitas fisik yang hanya bisa dinyatakan besarnya. Sementara itu, vektor merupakan kuantitas fisik yang bisa dinyatakan besar dan arahnya. Contoh dari vektor yakni kecepatan. Ruang tempat vektor didefinisikan disebut sebagai ruang vektor. Ruang ini juga dikenal dengan istilah ruang Euclidean. Contoh dari ruang Euclidean yakni R^2 , R^3 , dan R^n .

B. Norma Vektor

Panjang atau *magnitude* sebuah vektor dinamakan norma (*norm*). Norma vektor $\mathbf{v}$ dilambangkan dengan $\|\mathbf{v}\|$. Norma vektor juga dinamakan sebagai norma Euclidean. Norma vektor $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ di R^n adalah $\|\mathbf{v}\| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}$.

C. Jarak Euclidean

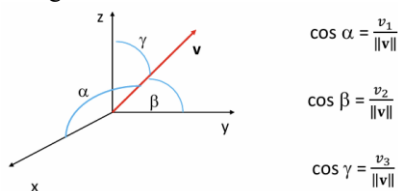
Jika $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ dan $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ adalah dua vektor di R^n maka jarak (d) kedua vektor tersebut adalah sebagai berikut.

$$d(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\| = \sqrt{(u_1 - v_1)^2 + (u_2 - v_2)^2 + \dots + (u_n - v_n)^2}$$

Jarak ini sering disebut sebagai jarak Euclidean. Jarak Euclidean berguna untuk menentukan seberapa dekat sebuah objek dengan objek lain.

D. Arah Vektor

Jika $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$ adalah vektor di R^3 maka arah vektor $\mathbf{v}$ adalah sebagai berikut.



$$\cos \alpha = \frac{v_1}{\|\mathbf{v}\|}$$

$$\cos \beta = \frac{v_2}{\|\mathbf{v}\|}$$

$$\cos \gamma = \frac{v_3}{\|\mathbf{v}\|}$$

Gambar 2.1 Gambaran tentang Arah Vektor (Sumber: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2025-2026/Algeo-11-Vektor-di-Ruang-Euclidean-Bag1-2025.pdf>)

E. Perkalian Titik

Jika $\mathbf{u}$ dan $\mathbf{v}$ adalah vektor tidak nol di R^2 atau R^3 , perkalian titik atau disebut juga Euclidean inner product adalah $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \|\mathbf{u}\| \|\mathbf{v}\| \cos \theta$, dengan θ adalah sudut yang dibentuk oleh $\mathbf{u}$ dan $\mathbf{v}$. Jika $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ dan $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$, perkalian titiknya menjadi $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3$.

F. Ortogonal dan Ortonormal

Dua buah vektor dikatakan ortogonal (saling tegak lurus) jika $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = 0$. Maka dari itu, vektor nol selalu

ortogonal dengan setiap vektor di R^n . Himpunan vektor di R^n yang setiap pasang vektornya ortogonal disebut himpunan ortogonal. Jika setiap vektor di himpunan ortogonal merupakan vektor satuan (panjangnya satu) maka dinamakan himpunan ortonormal.

G. Proyeksi Ortogonal

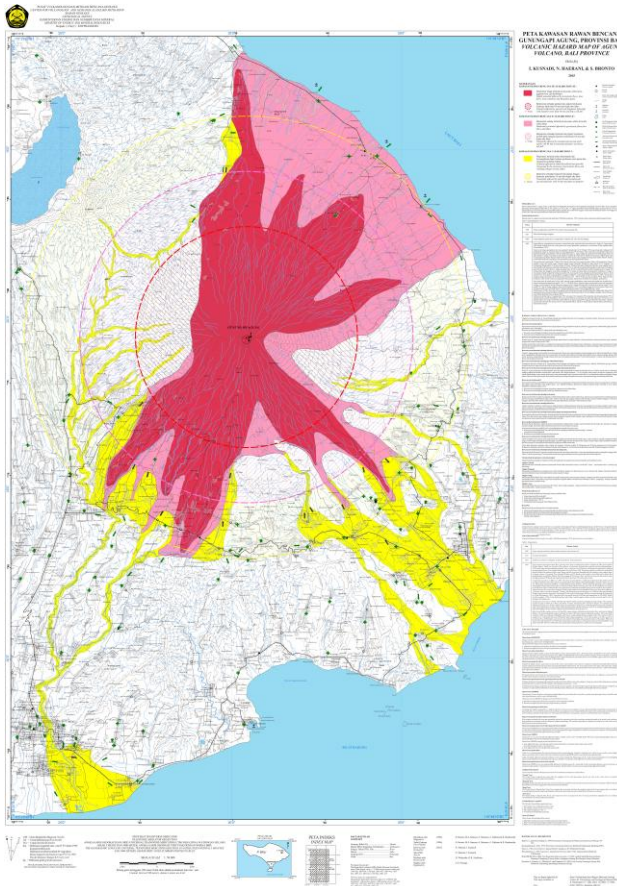
Jika $\mathbf{u}$ dan $\mathbf{v}$ merupakan dua vektor di R^n dan $\mathbf{v} \neq 0$, $\mathbf{u}$ dapat dinyatakan sebagai $\mathbf{u} = \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2$ dengan $\mathbf{w}_1$ sebagai proyeksi $\mathbf{u}$ pada $\mathbf{v}$ dan $\mathbf{w}_2$ sebagai komponen dari $\mathbf{u}$ yang ortogonal pada $\mathbf{v}$. Proyeksi $\mathbf{u}$ pada $\mathbf{v}$ dapat dinyatakan sebagai perkalian skalar k dengan $\mathbf{v}$ ($k\mathbf{v}$) sehingga $\mathbf{u} = k\mathbf{v} + \mathbf{w}_2$. Dengan begitu, perkalian titik $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = (k\mathbf{v} + \mathbf{w}_2) \cdot \mathbf{v}$ sehingga $k = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} / \|\mathbf{v}\|^2$, $\mathbf{w}_1 = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} / \|\mathbf{v}\|^2) \cdot \mathbf{v}$, dan $\mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} / \|\mathbf{v}\|^2) \cdot \mathbf{v}$.

III. METODOLOGI

A. Data dan Asumsi

Data terkait jalur evakuasi Gunung Agung diperoleh dari Peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunungapi Agung, Provinsi Bali, tahun 2015 oleh I. Kusnadi, N. Haerani, dan S. Bronto yang dirilis oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Peta ini memuat persebaran Kawasan Rawan Bencana III, II, dan I dari Gunung Agung. Dijelaskan bahwa Kawasan Rawan Bencana III berpotensi tinggi terlanda awan panas, aliran lava, guguran lava, dan gas berbahaya. Kawasan Rawan Bencana II berpotensi sedang terlanda awan panas, aliran lava, dan aliran lahar. Sementara itu, Kawasan Rawan Bencana I berpotensi terlanda aliran lahar atau banjir dan kemungkinan dapat terkena perluasan awan panas dan longsoran atau runtuh tebing. Rute evakuasi pun disertakan pada peta tersebut yang dilambangkan dengan tanda panah berwarna hijau di sekitar kawasan rawan bencana.

Peta KRB ini diperlakukan sebagai bidang dua dimensi. Dengan demikian, titik-titik pada peta dapat direpresentasikan dengan koordinat (x, y) . Untuk analisis pada makalah ini, koordinat yang digunakan merupakan koordinat piksel dari hasil pembacaan citra peta. Maka dari itu, analisis ini lebih difokuskan pada aspek keselarasan arah secara geometris, bukan analisis rute secara fisik.



Gambar 3.1 Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Agung (Sumber: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi)

B. Titik Pusat Erupsi

Analisis diawali dengan menentukan titik pusat erupsi atau kawah gunung sebagai titik acuan. Titik ini dilambangkan dengan $O = (x_0, y_0)$. Titik O digunakan untuk membangun vektor radial yang mewakili arah aman, yakni arah yang menjauhi pusat erupsi.

C. Ekstraksi Titik Rute Evakuasi

Setiap panah rute evakuasi akan direpresentasikan dengan menggunakan dua titik yakni titik $T = (x_T, y_T)$ sebagai pangkal panah dan titik $H = (x_H, y_H)$ sebagai ujung panah. Titik-titik tersebut didapatkan dengan melakukan pemilihan titik pada citra peta dan akan dicatat sebagai pasangan koordinat. Setiap panah kemudian dilabeli dengan indeks i sehingga akan diperoleh pasangan titik (T_i, H_i) dengan $i = 1, 2, \dots, n$.

D. Vektor Evakuasi dan Vektor Arah Aman

Dari pasangan titik yang diperoleh dari bagian C. Ekstraksi Titik Rute Evakuasi, vektor evakuasi akan dibentuk sebagai $u_i = H_i - T_i$. Sementara itu, vektor radial diperoleh dengan $r_i = T_i - O$. Vektor u_i menyatakan rute evakuasi yang dianalisis, sementara vektor r_i menyatakan arah aman yang menjauhi pusat erupsi dari lokasi panah.

E. Pengukuran Efektivitas Rute Evakuasi

Efektivitas rute evakuasi dianalisis melalui keselarasan

arah u_i terhadap arah aman r_i . Pengukuran keselarasan dilakukan dengan dua cara. Pertama, sudut θ_i antara u_i dan r_i dihitung dengan pendekatan perkalian titik. Jika nilai $\cos \theta_i$ mendekati 1, arah evakuasi searah dengan arah aman yang menjauhi pusat erupsi. Jika nilai $\cos \theta_i$ mendekati 0, arah evakuasi cenderung menyamping. Jika nilai $\cos \theta_i$ negatif, arah evakuasi berlawanan dengan arah aman. Kedua, keselarasan dihitung dengan pendekatan proyeksi ortogonal ($u_i = (u_i \cdot r_i / \|r_i\|^2) \cdot r_i$). Besar komponen yang searah dengan arah aman dicari melalui norma dari vektor proyeksi, yaitu $\|proj_{r_i}(u_i)\|$. Semakin besar norma menunjukkan semakin besar keselarasan antara rute evakuasi dengan arah aman.

F. Implementasi Program

Seluruh metodologi yang telah dijabarkan akan diimplementasikan menggunakan program sederhana. Program akan menerima citra peta, kemudian pengguna akan memilih titik O , T_i , dan H_i . Program akan menghitung u_i dan r_i serta melakukan analisis terhadap keselarasannya menggunakan nilai $\cos \theta_i$ dan proyeksi ortogonal u_i pada r_i . Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk tabel secara berurut sesuai indeks setiap rute dan dilengkapi dengan kategori keefektifannya.

Program sederhana ini diimplementasikan dengan menggunakan bahasa pemrograman Python dan memanfaatkan beberapa *library* seperti NumPy untuk operasi perhitungan vektor, norma, dan perkalian titik, Pandas untuk menyusun dan menyimpan hasil analisis dalam bentuk tabel, dan Matplotlib untuk menampilkan citra peta dan menerima koordinat titik melalui klik dari pengguna. Pustaka-pustaka tersebut dapat dipasang dengan perintah sebagai berikut.

```
pip install numpy pandas matplotlib
```

Berikut terlampir kode program sederhana yang digunakan untuk melakukan analisis efektivitas jalur evakuasi Gunung Agung. Hasil analisis akan disimpan ke dalam *file* CSV. Kode yang diberikan di bawah ini merupakan kode versi singkat. Kode program sesungguhnya yang memuat antarmuka input dengan fitur pendukung *zoom* terlampir di bagian lampiran.

Listing 1. Program Analisis Rute Evakuasi Gunung Agung Berbasis Vektor

```
import numpy as np, pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

img = plt.imread("peta-KRB-Agung-2015.jpg")
plt.figure(figsize=(12,9));
plt.imshow(img); plt.axis("off")
plt.title("Klik 1x kawah O, lalu klik berpasangan (T lalu H) tiap panah. ENTER selesai.")
pts = plt.ginput(n=-1, timeout=0);
plt.close()
```

```

O, A = np.array(pts[0]), pts[1:]
assert len(A) >= 2 and len(A) % 2 == 0

rows = []
for i in range(0, len(A), 2):
    T, H = np.array(A[i]),
    np.array(A[i+1])
    u, r = H - T, T - O
    dot, nu, nr = float(u @ r),
    np.linalg.norm(u), np.linalg.norm(r)
    cos_t = dot / (nu * nr)
    proj = (dot / (nr**2)) * r
    rows.append([i//2+1, *T, *H, cos_t,

    np.degrees(np.arccos(np.clip(cos_t,
    -1,1))),

    np.linalg.norm(proj),
    np.linalg.norm(u-proj)])

df = pd.DataFrame(rows,
columns=["id", "Tx", "Ty", "Hx", "Hy", "cos_
_theta", "theta_deg", "norm_proj", "norm_
lateral"])
df["kategori"] =
pd.cut(df["cos_theta"], [-
1, 0.30, 0.60, 0.85, 1.0000001],
labels=["tidak aman", "kurang
efektif", "cukup", "efektif"],
include_lowest=True)
df.to_csv("hasil_analisis.csv",
index=False)
print(df[["id", "cos_theta", "theta_deg",
"norm_proj", "kategori"]])

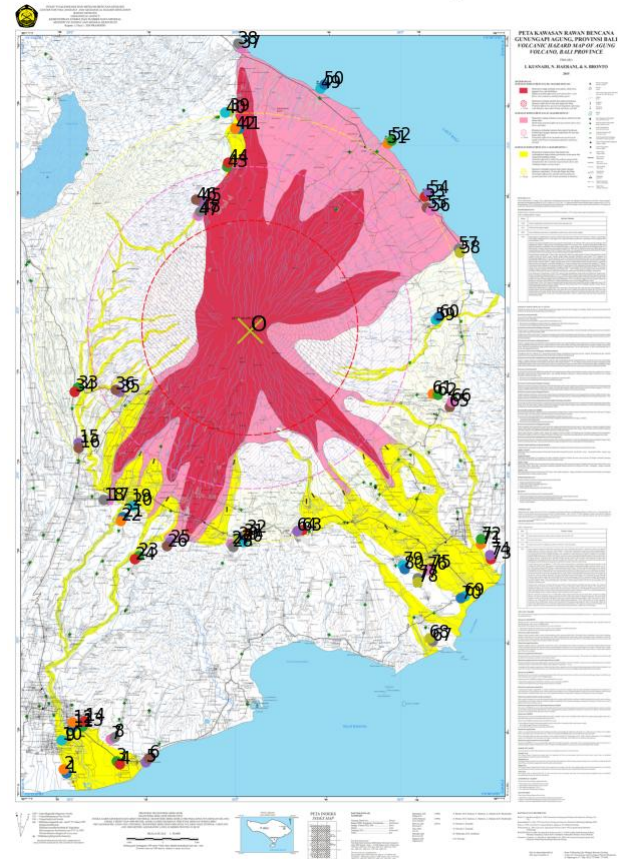
```

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Eksperimen menggunakan Program

Dari program yang telah dibuat, didapatkan hasil bahwa terdapat 40 buah vektor rute evakuasi yang terdapat pada peta KRB Gunung Agung yang digunakan. Rute-rute evakuasi tersebut tersebar meluas di sekitar kawasan rawan bencana Gunung Agung. Program yang dibuat dapat menerima input berupa klik pada titik pusat erupsi, titik pangkal panah rute evakuasi, dan titik ujung panah rute evakuasi. Setelah melakukan input pada seluruh panah rute evakuasi, didapatkan visualisasi seperti terlampir di gambar 4.1 dengan titik O sebagai pusat erupsi yang berada di tengah peta sementara titik-titik lain yang bernomor berupa titik-titik dari panah rute evakuasi. Titik dengan nomor yang berdekatan, misal titik 1 dan 2 akan menghasilkan vektor indeks ke-1, begitu pula titik-titik selanjutnya. Setelah didapatkan visualisasi seperti di gambar 4.1, lakukan *enter* untuk keluar dari jendela citra peta dan program akan memulai perhitungan. Setelah perhitungan selesai, *file* hasil_analisis.csv akan terbentuk dengan komponen atribut seperti id (indeks vektor), T_x ,

T_y , H_x , H_y , $\cos_theta$, $theta_deg$, $norm_proj$, $norm_lateral$, dan kategori. Kategori-kategori yang didefinisikan yakni tidak aman, kurang efektif, cukup, dan efektif dengan kriteria $-1 \leq \cos_theta \leq 0.30$ berkategori tidak aman, $0.30 < \cos_theta \leq 0.60$ berkategori kurang efektif, $0.60 < \cos_theta \leq 0.85$ berkategori cukup, dan $0.85 < \cos_theta \leq 1$ berkategori efektif. Dari hasil analisis, didapatkan bahwa 11 rute tergolong efektif, 6 rute tergolong cukup, 5 rute tergolong kurang efektif, dan 18 rute tergolong tidak aman. Hasil analisis berupa tabel terlampir pada gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.1 Visualisasi Peta KRB Gunung Agung yang Telah Melalui Proses Input Titik Acuan, Titik Pangkal Panah Rute, dan Titik Ujung Panah Rute (Sumber: Hasil Analisis Menggunakan Program)

	id	cos_theta	theta_deg	norm_proj	kategori
0	1	-0.452147	116.881507	27.729657	tidak aman
1	2	0.390437	67.018293	22.114430	kurang efektif
2	3	-0.922413	157.281461	57.067532	tidak aman
3	4	-0.812274	144.318699	46.480834	tidak aman
4	5	0.235547	76.376107	12.753425	tidak aman
5	6	-0.887153	152.517700	50.248521	tidak aman
6	7	-0.999862	179.047387	65.506045	tidak aman
7	8	0.513142	59.126633	31.090215	kurang efektif
8	9	0.641057	50.129294	41.914021	cukup
9	10	0.535266	57.638070	33.700896	kurang efektif
10	11	0.997817	3.786255	61.745647	efektif
11	12	0.964018	15.416739	59.516918	efektif
12	13	0.958351	16.594366	61.268824	efektif
13	14	0.896797	26.259778	41.941832	efektif
14	15	0.364203	68.641472	23.284040	kurang efektif
15	16	-0.731306	136.996016	50.089074	tidak aman
16	17	0.794960	37.348531	49.876479	cukup
17	18	0.605420	52.740919	39.114489	cukup
18	19	0.835473	33.334847	59.534963	cukup

19	20	-0.272627	105.820646	18.030957	tidak aman
20	21	0.052338	86.999873	3.405396	tidak aman
21	22	0.980825	11.238302	57.198696	efektif
22	23	0.647250	49.665385	39.958538	cukup
23	24	0.586058	54.122199	32.361093	kurang efektif
24	25	0.920415	23.013144	62.298484	efektif
25	26	0.977167	12.267338	68.602080	efektif
26	27	0.984201	10.198213	70.996246	efektif
27	28	0.228944	76.765113	14.161545	tidak aman
28	29	-0.027601	91.581637	1.567635	tidak aman
29	30	0.816738	35.240454	50.752789	cukup
30	31	0.999586	1.648095	64.322636	efektif
31	32	-0.219453	102.676902	14.249288	tidak aman
32	33	0.045908	87.368744	3.142251	tidak aman
33	34	-0.960131	163.766652	55.367819	tidak aman
34	35	-0.005624	90.322258	0.335527	tidak aman
35	36	-0.582110	125.599093	32.792890	tidak aman
36	37	-0.843237	147.483552	48.587223	tidak aman
37	38	-0.064125	93.676588	3.769559	tidak aman
38	39	0.850563	31.727002	47.587316	efektif
39	40	0.964151	15.387964	58.945597	efektif

Gambar 4.2 Tabel Hasil Analisis Efektivitas Rute Evakuasi Gunung Agung (Sumber: Hasil Analisis Menggunakan Program)

B. Pembahasan

Dari hasil analisis yang didapatkan, terlihat bahwa terdapat beberapa rute evakuasi yang dinyatakan kurang efektif dan bahkan tidak aman. Hal ini berarti rute evakuasi tidak atau kurang selaras dengan arah aman yang menjauhi pusat erupsi. Sebuah rute dikatakan efektif jika nilai $\cos \theta_i$ tinggi dan sudut θ_i kecil sehingga arah panah rute cenderung menjauhi titik pusat erupsi O. Rute-rute yang kurang efektif hingga tidak aman memiliki nilai $\cos \theta_i$ yang kecil mendekati nol atau negatif sehingga arah panah rute tidak bergerak menjauhi pusat erupsi.

Hasil analisis menunjukkan bahwa 11 rute tergolong efektif, 6 rute tergolong cukup, 5 rute tergolong kurang efektif, dan 18 rute tergolong tidak aman. Data tersebut menunjukkan bahwa rute tidak aman memiliki frekuensi tertinggi, yang berarti banyak dari rute evakuasi pada peta yang secara geometris tidak menjauh secara optimal, bahkan sebagian rutenya berlawanan arah. Jika hanya ditinjau secara geometris, temuan rute evakuasi yang tidak selaras dengan arah aman akan menjadi bahaya, terutama bagi masyarakat sekitar.

Dari 40 rute, rute indeks ke-31 dikategorikan sebagai rute yang efektif. Rute tersebut memiliki nilai $\cos \theta_i = 0,999586$, $\theta_i = 1,648095^\circ$, $\text{norm_proj} = 64.32263551975662$, dan $\text{norm_lateral} = 1.850730274465998$. Nilai 0,999586 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa vektor rute hampir searah dengan vektor aman. Contoh lain dari rute yang efektif yakni rute ke-11 dengan nilai $\cos \theta_i = 0,997817$, $\theta_i = 3,786255^\circ$, $\text{norm_proj} = 61.745647135313604$, dan $\text{norm_lateral} = 4.086263234493673$. Pada kedua contoh tersebut, komponen proyeksi searah arah aman (norm_proj) relatif lebih besar dibanding dengan komponen menyamping (norm_lateral) sehingga rute bukan hanya searah, tetapi juga minim deviasi lateral.

Rute indeks ke-7 menjadi rute yang tergolong tidak aman dengan nilai $\cos \theta_i = -0,999862$ dan $\theta_i = 179,047387^\circ$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa arah rute hampir berlawanan dengan arah aman. Secara geometris,

rute tersebut cenderung mengarah kembali ke pusat erupsi. Jika ditinjau dari nilai $\text{norm_proj} = 65,506045$ milik rute ke-7, komponen rute pada arah aman cukup besar, tetapi karena $\cos \theta_i$ bernilai negatif sehingga komponen proyeksi tersebut berada pada arah yang berlawanan dengan arah aman.

Rute-rute lain yang berkategori cukup dan kurang efektif pun menunjukkan rute yang tidak salah arah karena nilai $\cos \theta_i$ -nya masih positif. Tetapi, rute-rute tersebut dikategorikan demikian karena deviasinya masih cukup besar. Misalnya rute ke-9 dengan nilai $\cos \theta_i = 0.641057$ dan $\theta_i = 50.129294^\circ$ berkategori cukup karena nilai $\text{norm_lateral} = 50.180721918794966$ masih cukup besar. Rute ke-15 dengan nilai $\cos \theta_i = 0.364203$ dan $\theta_i = 68.641472^\circ$ pun berkategori kurang efektif karena nilai $\text{norm_lateral} = 59.540691997308706$ masih menunjukkan deviasi yang cukup besar.

Hasil analisis ini hanya ditinjau secara geometris. Banyak faktor lain seperti kondisi jalan, aksesibilitas, dan jalur aliran lava yang membuat para pembuat peta KRB Gunung Agung memutuskan rute evakuasi seperti yang dimuat di peta.

V. KESIMPULAN

Makalah ini menganalisis efektivitas jalur atau rute evakuasi Gunung Agung menggunakan metode pemodelan rute sebagai vektor evakuasi u_i dan arah aman sebagai vektor radial r_i yang menjauh dari titik pusat erupsi atau titik acuan O. Tingkat keselarasan antara rute terhadap arah aman dinilai menggunakan $\cos \theta_i$ dan perbandingan komponen proyeksi searah arah aman (norm_proj) terhadap komponen menyamping (norm_lateral).

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan program sederhana yang dapat menerima input klik di titik O, titik pangkal panah rute, dan titik ujung panah rute di Peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunungapi Agung, Provinsi Bali, tahun 2015. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa dari 40 rute yang tercantum di peta, 11 rute tergolong efektif, 6 rute tergolong cukup, 5 rute tergolong kurang efektif, dan 18 rute tergolong tidak aman. Hasil tersebut menunjukkan bahwa masih banyak rute yang secara geometris tidak menjauh secara optimal dari pusat erupsi, bahkan beberapa di antaranya memiliki arah yang berlawanan terhadap arah aman. Maka dari itu, pendekatan ruang vektor dan proyeksi ortogonal dapat digunakan sebagai salah satu cara untuk menganalisis rute-rute yang memiliki deviasi arah yang besar dan berpotensi kurang efektif secara keselarasan arah.

Dalam analisis pada makalah ini, masih banyak kekurangan dan potensi pengembangan lebih lanjut karena analisis ini hanya dilakukan dari sudut pandang geometris. Banyak faktor lapangan lain seperti kondisi infrastruktur jalan, aksesibilitas rute, dan jalur aliran lava yang dapat dikaji lebih mendalam bersama dengan konsep geometris ini untuk menghasilkan keputusan yang lebih valid dan relevan.

VI. LAMPIRAN

Berikut terlampir tautan Github yang berisi kode program analisis, hasil analisis dalam file CSV, dan gambar peta KRB Gunung Agung secara lebih jelas <https://github.com/helenakristela/MakalahAlgeo>. Video Youtube terkait penjelasan makalah dapat diakses pada link berikut <https://youtu.be/NZI8IiSxiHU>.

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan pengerjaan makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ir. Rila Mandala, M.Sc., Ph.D selaku dosen pengampu mata kuliah Aljabar Linier dan Geometri kelas K-2 atas bimbingan dan bekal ilmu yang telah diberikan, serta kepada orang tua penulis atas dukungan yang selama ini diberikan.

REFERENSI

- [1] Darwin Volcanic Ash Advisory Centre (VAAC), Bureau of Meteorology, Northern Territory Regional Office. "Volcano No. 264020 – Gunung Agung." *Global Volcanism Program, Smithsonian Institution*. Tersedia pada: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=264020> . Diakses: 12 Desember 2025.
- [2] N. K. T. C. Dewi, R. C. A. S. Surya, dan S. K. Nurani, "Banyak Alasan Gunung Agung Menarik untuk Dikunjungi," *Tempo.co*, 20 Oktober 2024, 06.15 WIB. Tersedia pada: <https://tempo.co/hiburan/banyak-alasan-gunung-agung-menarik-untuk-dikunjungi-624385> . Diakses: 12 Desember 2025.
- [3] Badan Pengelola Fasilitas Kawasan Suci Pura Agung Besakih. "Informasi Kawasan Suci Pura Agung Besakih." *Besakih.org*. Tersedia pada: <https://www.besakih.org/> . Diakses: 12 Desember 2025.
- [4] A. Pribadi, "Tanggapan Erupsi Gunung Agung," *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)*, 22 April 2019. Tersedia pada: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/tanggapan-erupsi-gunung-agung> . Diakses: 12 Desember 2025.
- [5] R. Munir, *Vektor di Ruang Euclidean (Bagian 1)*, Aljabar Geometri 2025–2026. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2025. Tersedia pada: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2025-2026/Algeo-11-Vektor-di-Ruang-Euclidean-Bag1-2025.pdf> . Diakses: 12 Desember 2025.
- [6] R. Munir, *Vektor di Ruang Euclidean (Bagian 2)*, Aljabar Geometri 2025–2026. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2025. Tersedia pada: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2025-2026/Algeo-12-Vektor-di-Ruang-Euclidean-Bag2-2025.pdf> . Diakses: 12 Desember 2025.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 24 Desember 2025



Helena Kristela Sarhawa
13524109