

Analisis Numerik Pengaruh Diameter dan Kedalaman Cavity Tunggal Bentuk Lingkaran Dalam Lapisan Batu Kapur (Limestone) Terhadap Daya Dukung Fondasi Dangkal Di Atasnya

Johannes Andigan*

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
E-mail: andiganjohannes@gmail.com

Adhikrita Arif Permana

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
E-mail: adhikritap@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh diameter dan kedalaman cavity tunggal berbentuk lingkaran terhadap daya dukung fondasi dangkal pada lapisan batuan kapur (limestone) menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method). Parameter utama yang dievaluasi adalah daya dukung relatif (R) berdasarkan variasi diameter cavity (D) dan kedalaman cavity (H) yang relatif terhadap lebar fondasi (B). Karakteristik massa batuan dimodelkan menggunakan kriteria keruntuhan Hoek-Brown. Hasil analisis menunjukkan bahwa dalam kondisi batuan lemah, mekanisme keruntuhan utama adalah *punching failure*, di mana fondasi menembus lapisan atas batuan yang tidak mampu menahan beban. Cavity dengan diameter besar ($D>B$) pada kedalaman dangkal ($H<B$) diidentifikasi sebagai kondisi risiko tinggi, dengan pengurangan daya dukung 70-90% dibandingkan kondisi tanpa cavity. Kondisi ini membutuhkan prioritas penanganan pertama. Penelitian ini juga mengidentifikasi hubungan eksponensial yang mempermudah interpretasi data tanpa melibatkan variabel lebar fondasi (B), sehingga lebih praktis untuk aplikasi teknis. Dalam studi kasus, tiga kriteria desain diajukan: menghindari cavity risiko tinggi, memperkuat cavity, dan menggunakan desain fondasi adaptif. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam memahami pengaruh cavity pada fondasi dangkal di kawasan karst dan menyediakan panduan teknis yang praktis.

Kata Kunci: Cavity, batuan kapur, daya dukung fondasi dangkal, finite element method, Hoek-Brown.

Abstract

This study analyzes the effects of circular single cavity diameter and depth on the bearing capacity of shallow foundations in limestone layers using the Finite Element Method. Key parameters include relative bearing capacity (R) based on cavity diameter (D) and depth (H) relative to foundation width (B). The rock mass was modeled using the Hoek-Brown failure criterion. The results show that in weak rock conditions, the dominant failure mechanism is *punching failure*, where the foundation penetrates the weak upper rock layer. Cavities with large diameters ($D>B$) at shallow depths ($H<B$) are identified as high-risk conditions, reducing bearing capacity by 70-90% compared to conditions without cavities. These conditions require priority handling. The study identifies an exponential relationship simplifying data interpretation without involving foundation width (B), making it more practical for technical applications. In the case study, three design criteria are proposed: avoiding high-risk cavities, reinforcing cavities, and adopting adaptive foundation designs. These findings contribute significantly to understanding cavity effects on shallow foundations and provide practical guidelines for karst region structures.

Keywords: Cavity, limestone, shallow foundation bearing capacity, finite element method, Hoek-Brown.

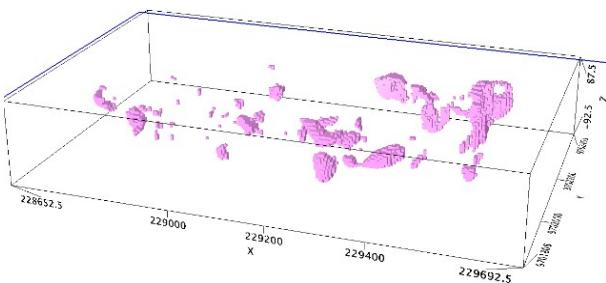
1. Pendahuluan

Dalam bidang rekayasa geoteknik, kehadiran tanah lunak sering menjadi tantangan dalam perencanaan fondasi atau struktur. Namun, bagi daerah yang berada di atas batuan kapur atau limestone, masalah utama bukan pada tanah lunak, tetapi juga adanya rongga bawah tanah atau *cavity* yang dapat mempengaruhi stabilitas serta daya dukung fondasi. *Cavity* ini terbentuk akibat proses pelarutan batuan oleh air dalam

jangka waktu lama, membentuk jaringan rongga yang bervariasi ukurannya.

Salah satu kawasan yang menjadi studi kasus dalam penelitian ini adalah Fakfak, Papua Barat. Daerah ini memiliki karakteristik geologi karst dengan batu kapur yang tersembunyi di bawah vegetasi lebat. Hasil survei geolistrik menunjukkan bahwa rongga di bawah batuan tersebar secara tidak merata dan berpotensi mengganggu stabilitas fondasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Metode geolistrik

* Penulis Korespondensi: andiganjohannes@gmail.com



Gambar 1. Indikasi persebaran cavity analisis resistivitas 3D (Perkasa, 2023)

digunakan untuk mengidentifikasi zona resistivitas rendah yang menandakan keberadaan *cavity* berisi udara atau air, yang berisiko menyebabkan keruntuhan atau amblesan.

Struktur rongga yang besar di lapisan dangkal bisa menyebabkan kegagalan mendadak, sedangkan rongga kecil yang berkembang perlahan dapat menurunkan permukaan batuan secara bertahap. Jika tidak ditangani dengan baik, kondisi ini bisa menyebabkan kerugian material yang besar.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menganalisis dampak *cavity* terhadap daya dukung fondasi menggunakan berbagai pendekatan, termasuk metode numerik dan eksperimental.

Penelitian oleh (Yao Xiao M. Z., 2018) menggunakan *Finite Element Limit Analysis* (FELA) untuk menyelidiki dampak *cavity* berbentuk persegi terhadap kapasitas dukung fondasi. Hasilnya menunjukkan semakin besar ukuran *cavity*, semakin signifikan pengurangan daya dukung fondasi, terutama jika *cavity* berada di kedalaman dangkal. Studi ini mengasumsikan batuan dengan parameter geoteknik tertentu tanpa mempertimbangkan variasi kondisi lapangan yang lebih kompleks.

Penelitian lain oleh (Piyush Kumar, 2022) menganalisis *cavity* berbentuk lingkaran menggunakan pendekatan numerik. Fokus utama studi ini adalah batuan dengan parameter kekuatan tekan uniaksial atau *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) 25 MPa dan *Geological Strength Index* (GSI) sebesar 40. Simulasi dilakukan dengan variasi kedalaman *cavity*,

menunjukkan bahwa *cavity* yang lebih dangkal dan berdiameter besar memiliki dampak yang lebih signifikan terhadap kapasitas dukung fondasi.

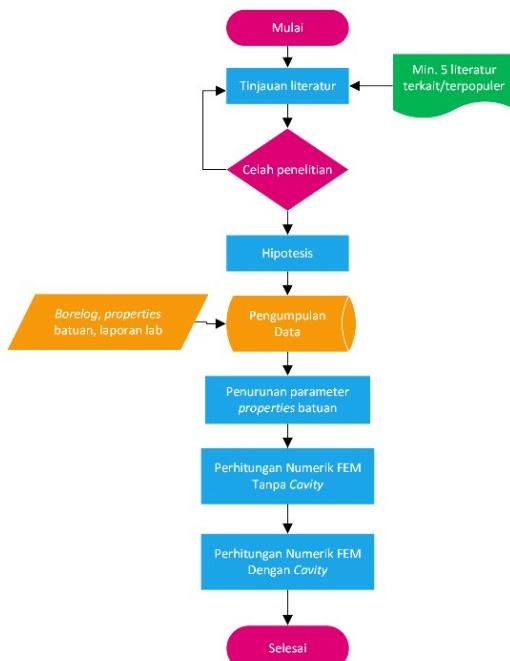
Sementara itu, studi terbaru oleh (Yao Xiao M. Z., 2023) menggunakan metode *Upper Bound Finite Element Limit Analysis* (UB FELA) dengan pemodelan *cavity* berbentuk persegi panjang. Studi ini menunjukkan bahwa *cavity* besar yang dangkal dapat mengurangi daya dukung hingga 70%, terutama pada massa batuan dengan sifat mekanik yang lebih rapuh. Namun, studi ini masih terbatas pada model geometri tertentu, belum mencakup variasi batuan lemah yang lebih umum ditemukan di lapangan.

Meski demikian, studi-studi sebelumnya masih memiliki keterbatasan. Banyak penelitian hanya berfokus pada batuan dengan kekuatan tekan sedang hingga tinggi (UCS \geq 25 MPa) dan jarang membahas kondisi batuan lemah (UCS $<$ 25 MPa). Selain itu, belum banyak kajian mengenai *cavity* kecil. Dalam penelitian ini, *cavity* kecil didefinisikan sebagai *cavity* dengan diameter kurang dari setengah lebar fondasi yaitu 1 meter. **Tabel 1** menunjukkan perbandingan tinjauan penelitian terdahulu dibandingkan dengan penelitian ini. Faktor-faktor lain seperti interaksi antara *cavity* dan pola distribusi tegangan pada fondasi belum sepenuhnya dianalisis dalam penelitian terdahulu. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan menganalisis dampak *cavity* kecil pada massa batuan lemah serta memberikan rekomendasi teknis terkait daya dukung fondasi di atasnya.

Dengan meninjau berbagai parameter seperti ukuran dan kedalaman *cavity*, serta karakteristik batuan di lokasi penelitian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih komprehensif mengenai dampak *cavity* terhadap stabilitas fondasi. Hasil studi ini juga akan menjadi acuan bagi perencanaan dan mitigasi risiko bagi konstruksi di wilayah dengan karakteristik geologi serupa, sehingga dapat diterapkan dalam perencanaan teknis fondasi yang aman dan efisien. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjadi kontribusi penting dalam pengembangan metode analisis dan desain fondasi di kawasan karst yang memiliki *cavity* dengan berbagai ukuran dan kedalaman.

Table 1. Studi literatur pengaruh cavity terhadap daya dukung fondasi dangkal di massa batuan

Parameter	(Yao Xiao M. Z., 2018)	(Piyush Kumar, 2022)	(Yao Xiao M. Z., 2023)	Penelitian Ini
<i>Uniaxial Compressive Strength</i> (σ_{ci})	$\sigma_{ci}=40$ MPa	$\sigma_{ci} \geq 25$ MPa	$\sigma_{ci}/B=100$	$\sigma_{ci}=21$ MPa
Klasifikasi batuan menurut UCS	Medium strong	Medium strong to very strong	Very strong	Weak
Tinjauan ukuran <i>cavity</i>	Segi empat $0.5B \leq W \leq 5B$ $0.5B \leq H \leq 3B$	Lingkaran d_v konstan	$2B \leq W \leq 5B$ $B \leq H \leq 2B$	Lingkaran $0.25B \leq D \leq 3B$
Tinjauan kedalaman <i>cavity</i>	$1.5B \leq Y \leq 4B$	$0.5B \leq Z \leq 4.5B$	$1.5B \leq H \leq 5.5B$	$0.25B \leq H \leq 3B$
Kekhususan dibanding penelitian lain	<i>Cavity</i> kembar dengan jarak berdekatan	Parameter batuan GSI dan σ_{ci} divariasi	Rentang tinjauan kedalaman dan jarak yang panjang	Klasifikasi batuan 'weak', tinjauan ukuran <i>cavity</i> kecil ($0.25B$), memberikan rekomendasi teknis dan praktis untuk kasus serupa kedepannya



Gambar 2. Diagram alir penelitian

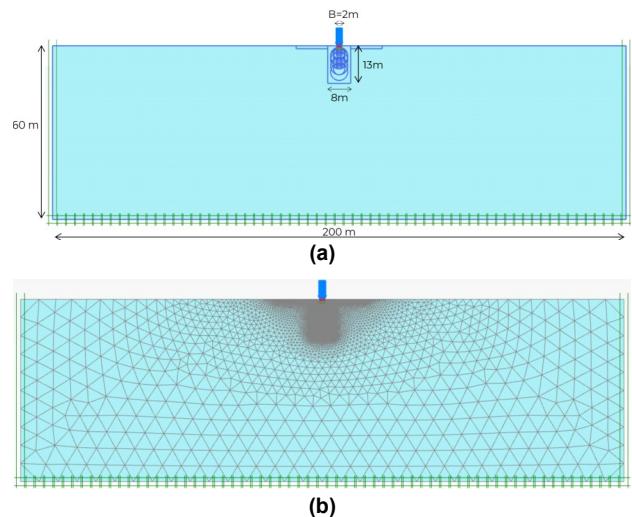
2. Metodologi

Metodologi penelitian ini dirancang untuk memahami pengaruh diameter dan kedalaman *cavity* terhadap daya dukung fondasi yang berdiri di atasnya. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan utama, dimulai dengan tinjauan literatur, formulasi hipotesis, pengumpulan data, penurunan parameter batuan, serta perhitungan numerik menggunakan perangkat lunak Plaxis sebagaimana yang ditunjukkan pada **Gambar 2**.

Penelitian diawali dengan tinjauan literatur untuk memahami studi terdahulu dan mengidentifikasi celah penelitian yang akan diisi. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa *cavity* dalam batuan kapur dapat berpengaruh terhadap kapasitas dukung fondasi, tetapi masih terdapat keterbatasan dalam memahami dampak *cavity* kecil serta kondisi batuan lemah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi kondisi tersebut secara lebih mendalam.

Setelah tinjauan literatur dilakukan, penelitian ini menetapkan hipotesis bahwa diameter dan kedalaman *cavity* memiliki pengaruh terhadap daya dukung fondasi. Hipotesis ini diuji melalui pendekatan numerik dengan membandingkan daya dukung fondasi pada kondisi dengan *cavity* yang memiliki berbagai variasi dimensi dan kedalaman dengan pada kondisi tanpa *cavity*.

Pengumpulan data dilakukan dengan mengacu pada data sekunder dari laporan penyelidikan tanah yang mencakup *boring log*, foto *core box* batu, dokumentasi lokasi batuan, serta hasil uji laboratorium seperti uji sifat fisik dan mekanik batuan, uji beban titik, dan uji kuat tekan uniaksial. Data ini digunakan untuk menentukan parameter geoteknik batuan yang akan diterapkan dalam analisis numerik. Selain itu, parameter Hoek-Brown juga diturunkan melalui kombinasi data laboratorium dan



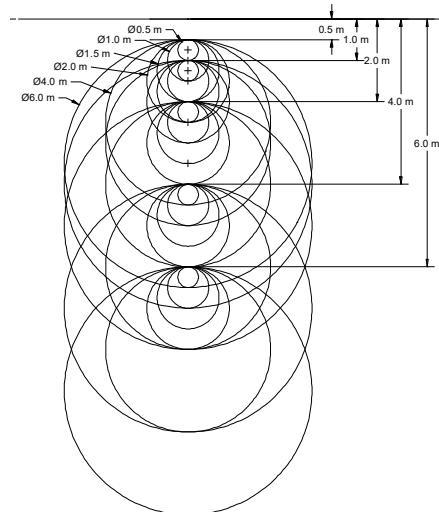
Gambar 3. (a) Model numerik dengan Plaxis (b) Penetapan mesh pada model

perhitungan empiris. Parameter-parameter tersebut kemudian dikonversi menjadi data numerik untuk digunakan dalam perangkat lunak Plaxis. Penentuan parameter ini sangat penting karena akan menentukan akurasi hasil simulasi dalam merepresentasikan kondisi aktual di lapangan.

Analisis numerik dalam penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) melalui perangkat lunak Plaxis. Model numerik disusun dalam skala dua dimensi dengan pendekatan *plane strain*. Pemodelan diawali dengan kondisi awal tanpa *cavity*, kemudian dilakukan variasi kondisi dengan adanya *cavity* yang memiliki berbagai diameter (D) dan kedalaman (H). Model dibuat dengan ukuran *boundary* yang cukup besar untuk memastikan bahwa pengaruh *cavity* pada daya dukung fondasi dapat teramat dengan baik. Dimensi model ditentukan berdasarkan prinsip bahwa ukuran domain harus cukup besar agar tidak terjadi efek batas yang mempengaruhi hasil simulasi. Oleh karena itu, model diperpanjang hingga 200 meter dalam arah horizontal dan 60 meter dalam arah vertikal untuk mencakup berbagai variasi *cavity* yang diuji seperti pada **Gambar 3 (a)**.

Untuk geometri fondasi dangkal (*footing*), bagian ini dimodelkan dengan material plate di atas permukaan batuan dengan lebar fondasi $B=2m$. Dengan tebal fondasi 50 cm dan menggunakan mutu beton f_c' 50 MPa, maka dimasukkan parameter material plate ke dalam Plaxis yaitu $Ea_1 = 16,617,009 \text{ kN/m}$ dan $EI = 346,1888 \text{ kN.m}^2/\text{m}$. Untuk membatasi perilaku antara struktur fondasi dan batuan diberikan elemen interface sepanjang lebar fondasi

Pembebaan dalam simulasi dilakukan dengan menerapkan beban garis seragam di atas fondasi. Pembebaan dilakukan dengan menggunakan prosedur *Load Advancement Ultimate Level* pada Plaxis yang dikontrol dengan pengali total (*total multiplier*) yang disebut $\Sigma MStage$ di dalam Plaxis. Nilai $\Sigma MStage$ pada *cavity* dengan kedalaman Hi dan diameter Dj merepresentasikan nilai daya dukung relatif $R_{Hi:Dj}$



Gambar 4. Variasi ukuran dan kedalaman cavity tunggal yang dimodelkan

adalah perbandingan daya dukung fondasi pada kondisi dengan *cavity* dengan kedalaman H_i dan diameter D_j ($q_{uH_iD_j}$) dengan daya dukung fondasi pada kondisi tanpa *cavity* (q_u).

$$R_{H_iD_j} = \frac{\text{Daya dukung dengan } cavity H_iD_j}{\text{Daya dukung tanpa cavity}} = \frac{q_{uH_iD_j}}{q_u} \dots \\ = \Sigma MStage \text{ (di Plaxis)}$$

Nilai beban yang digunakan adalah sebesar 2,950 kN/m², yang diperoleh dari hasil simulasi awal daya dukung tanpa *cavity* (q_u). Beban ini diterapkan dalam model untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh *cavity* terhadap kapasitas dukung fondasi.

Kondisi muka air tanah tidak dimasukkan dalam pemodelan menyesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan yang tidak didapati adanya muka air tanah.

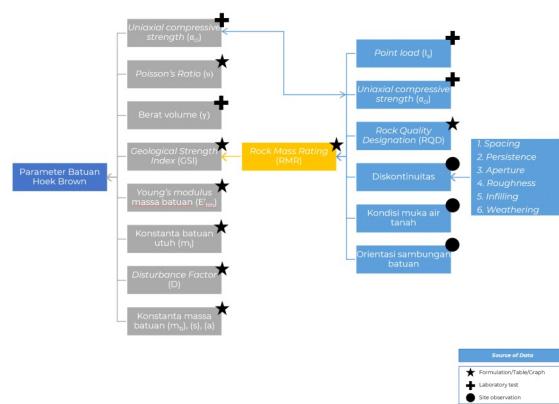
Pembuatan *mesh* dalam simulasi dilakukan dengan tingkat ketelitian tinggi di sekitar *cavity* dan fondasi, di mana area di bawah fondasi menggunakan *mesh* "very fine", sedangkan area lainnya menggunakan *mesh* "medium" untuk mengoptimalkan efisiensi waktu perhitungan seperti pada **Gambar 3 (b)**. Jumlah elemen dalam model sekitar 21,416 elemen dengan 43,518 titik nodal.

Fase perhitungan dilakukan secara bertahap yang mencakup berbagai skenario kondisi *cavity*. Dalam penelitian ini, jumlah sampel yang digunakan mencakup 30 kombinasi diameter dan kedalaman *cavity* yang berbeda. *Cavity* yang dimodelkan memiliki 6 (enam) variasi diameter (D) dari $0.25B=0.5$ m, $0.5B=1$ m, $0.75B=1.5$ m, $B=2$ m, $2B=4$ m, hingga $3B=6$ m dengan kedalaman (H) yang divariasi 5 (lima) variasi dari $0.25B=0.5$ m, $0.5B=1$ m, $B=2$ m, $2B=4$ m hingga $3B=6$ m, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Setiap kombinasi *cavity* dimodelkan dalam dua fase, yaitu satu fase tanpa beban untuk melihat perubahan tegangan akibat *cavity* saja dan satu fase dengan pembebanan untuk menganalisis pengaruh *cavity* terhadap kapasitas dukung fondasi. Dengan demikian, terdapat total 60 fase perhitungan dalam analisis ini seperti pada Tabel 2. Setiap variasi diameter dan kedalaman *cavity* diuji satu per satu untuk memahami dampaknya terhadap stabilitas fondasi dan massa batuan di sekitarnya.

Tabel 2. Urutan fase-fase perhitungan

Phase No	Start from	Phase Name	Phase No	Start from	Phase Name
InitialPhase	-	-	Phase_31	InitialPhase	Cavity H3; D4
Phase_1	InitialPhase	Cavity H1; D1	Phase_32	Phase_31	Beban
Phase_2	Phase_1	Beban	Phase_33	InitialPhase	Cavity H3; D5
Phase_3	InitialPhase	Cavity H1; D2	Phase_34	Phase_33	Beban
Phase_4	Phase_3	Beban	Phase_35	InitialPhase	Cavity H3; D6
Phase_5	InitialPhase	Cavity H1; D3	Phase_36	Phase_35	Beban
Phase_6	Phase_5	Beban	Phase_37	InitialPhase	Cavity H4; D1
Phase_7	InitialPhase	Cavity H1; D4	Phase_38	Phase_37	Beban
Phase_8	Phase_7	Beban	Phase_39	InitialPhase	Cavity H4; D2
Phase_9	InitialPhase	Cavity H1; D5	Phase_40	Phase_39	Beban
Phase_10	Phase_9	Beban	Phase_41	InitialPhase	Cavity H4; D3
Phase_11	InitialPhase	Cavity H1; D6	Phase_42	Phase_41	Beban
Phase_12	Phase_11	Beban	Phase_43	InitialPhase	Cavity H4; D4
Phase_13	InitialPhase	Cavity H2; D1	Phase_44	Phase_43	Beban
Phase_14	Phase_13	Beban	Phase_45	InitialPhase	Cavity H4; D5
Phase_15	InitialPhase	Cavity H2; D2	Phase_46	Phase_45	Beban
Phase_16	Phase_15	Beban	Phase_47	InitialPhase	Cavity H4; D6
Phase_17	InitialPhase	Cavity H2; D3	Phase_48	Phase_47	Beban
Phase_18	Phase_17	Beban	Phase_49	InitialPhase	Cavity H5; D1
Phase_19	InitialPhase	Cavity H2; D4	Phase_50	Phase_49	Beban
Phase_20	Phase_19	Beban	Phase_51	InitialPhase	Cavity H5; D2
Phase_21	InitialPhase	Cavity H2; D5	Phase_52	Phase_51	Beban
Phase_22	Phase_21	Beban	Phase_53	InitialPhase	Cavity H5; D3
Phase_23	InitialPhase	Cavity H2; D6	Phase_54	Phase_53	Beban
Phase_24	Phase_23	Beban	Phase_55	InitialPhase	Cavity H5; D4
Phase_25	InitialPhase	Cavity H3; D1	Phase_56	Phase_55	Beban
Phase_26	Phase_25	Beban	Phase_57	InitialPhase	Cavity H5; D5
Phase_27	InitialPhase	Cavity H3; D2	Phase_58	Phase_57	Beban
Phase_28	Phase_27	Beban	Phase_59	InitialPhase	Cavity H5; D6
Phase_29	InitialPhase	Cavity H3; D3	Phase_60	Phase_59	Beban
Phase_30	Phase_29	Beban			



Gambar 5. Penurunan parameter batuan

Dalam hal studi kasus, akan dianalisis diameter dan kedalaman *cavity* yang aman dan tidak aman berdasarkan beban desain sebesar 13.5 t/m². Nilai daya dukung ultimit fondasi (q_u Hi:D) akan dibagi dengan faktor keamanan (SF=3) untuk mendapatkan nilai daya dukung izin fondasinya yang kemudian dibandingkan dengan beban desain untuk menentukan kondisi *cavity* mana beban desain masih aman dan tidak aman pada studi kasus tersebut.

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa batasan yang perlu diperhatikan antara lain sebagai berikut.

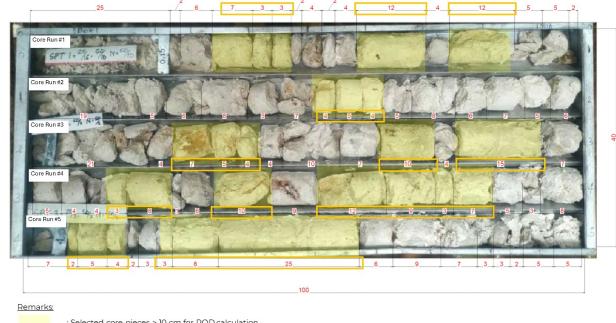
1. Parameter-parameter batuan yang digunakan bersifat spesifik untuk lokasi penelitian di Kabupaten Fakfak, Papua Barat, sehingga hasil penelitian ini perlu dikaji lebih lanjut sebelum diterapkan pada lokasi geologi berbeda.
2. Tidak mempertimbangkan variasi kondisi diskontinuitas batuan, dimana kenyataannya, massa batuan memiliki orientasi bedding planes yang bervariasi.
3. *Cavity* berbentuk lingkaran sempurna. Dalam kenyataannya jarang ditemukan *cavity* berbentuk lingkaran sempurna.
4. Parameter batuan di seluruh massa batuan dianggap sama baik di dekat *cavity* maupun yang jauh dengan *cavity*.
5. Beban yang diaplikasikan bersifat spesifik untuk studi kasus penelitian yaitu 13.5 ton/m².

3. Hasil

Dalam analisis numerik menggunakan perangkat lunak Plaxis dengan kriteria non-linear Hoek-Brown, parameter-parameter batuan harus ditentukan secara akurat agar simulasi yang dilakukan sesuai dengan karakteristik batuan di lapangan. Penurunan parameter ini dilakukan berdasarkan hasil uji laboratorium, observasi lapangan, serta metode empiris yang mengacu pada grafik atau tabel. Dalam penelitian ini, terdapat 13 (tiga belas) parameter utama yang dikaji untuk memperoleh representasi yang akurat terhadap kondisi batuan ditunjukkan dalam **Gambar 5**.

1. Uniaxial Compressive Strength (UCS)

Diperoleh melalui uji laboratorium terhadap sampel batuan utuh. Nilai UCS yang diperoleh adalah 21.36



Gambar 6. Perhitungan RQD batuan

MPa, sesuai dengan klasifikasi batuan "weak" dalam sistem (Hoek, Strength of Jointed Rock Masses, 1983). Ini menempatkan batuan dalam kategori seperti *chalk*, *claystone*, *marl*, *siltstone*, dan *shale*.

2. Poisson's Ratio (v)

Ditentukan berdasarkan literatur yang mengkaji berbagai jenis batuan dengan karakteristik serupa (Vásárhelyi, 2013). Dari rentang nilai 0.05 hingga 0.40 yang ditemukan dalam referensi, dipilih nilai rata-rata sebesar 0.20 untuk mewakili sifat elastis batuan tersebut.

3. Berat volume (γ) batuan

Ditetapkan berdasarkan hasil uji laboratorium, dengan nilai *dry density* sebesar 2.443 gr/cm³ atau setara dengan 23.97 kN/m³. Nilai ini digunakan untuk menentukan berat unit massa batuan dalam perhitungan numerik.

4. Point Load Strength Index (I_s)

Juga diuji di laboratorium, menghasilkan nilai 0.76 MPa. Nilai ini menjadi parameter tambahan dalam analisis karakteristik kekuatan batuan.

5. Rock Quality Designation (RQD)

Dihitung berdasarkan core box hasil pengeboran lapangan. Nilai RQD yang diperoleh adalah 38%, yang menunjukkan kualitas batuan tergolong "Poor" (buruk) dalam klasifikasi RQD (25-50%). Analisis RQD dilakukan dengan menghitung persentase *core* yang utuh dengan panjang lebih dari 10 cm terhadap total panjang inti batuan yang diuji (Deere & Deere, 1963) seperti ditunjukkan **Gambar 6**.

6. Kondisi diskontinuitas batuan

Dievaluasi melalui berbagai parameter, termasuk *spacing*, *persistence*, *aperture*, *roughness*, *infilling*, dan *weathering*. Digunakan *Spacing* rata-rata antar diskontinuitas dihitung sebesar 4.9 cm, yang dikategorikan sebagai "very close" dalam sistem klasifikasi diskontinuitas (Barani & Ghafoori, 2014). Panjang atau *persistence* diskontinuitas diestimasikan antara 3-10 meter, dikategorikan sebagai "medium persistence" (ISRM, Commission on standardization of laboratory and field tests: suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, 1978). *Aperture* atau lebar bukaan diskontinuitas, diukur 11.5 mm, yang masuk dalam kategori "widely open" (Mayne, Christopher, & DeJong, 2001). Sementara itu, *roughness* atau

Tabel 3. Rock Mass Rating (RMR) batuan

No	Parameter	Value	Classification	Rating	Max Value
R1	Point Load Index	0.76 MPa	< 1 MPa		
	Unconfined Compressive	21.36 MPa	10-25 MPa	2	15
R2	RQD	38%	Poor	8	20
R3	Spacing	4.9 cm	Very Close	5	20
R4a	Persistence	Assume 3-10m	Medium persistence	2	6
R4b	Aperture	11.5 mm	Widely open	0	6
R4c	Roughness	Rough	Rough	5	6
R4d	Infilling	None	None	6	6
R4e	Weathering	Slightly weathered	Slightly weathered	5	6
R5	Groundwater Condition	Completely dry	Completely dry	15	15
R6	Adjustment Orientation	Very favorable	Very favorable	0	0
			RMR	46	100

kekasaran bidang diskontinuitas dikategorikan sebagai "rough". Tidak ditemukan material pengisi atau *infilling* dalam celah diskontinuitas, sehingga diklasifikasikan sebagai "none". Batuannya juga mengalami sedikit pelapukan (*slightly weathered*).

7. Kondisi muka air tanah

Menunjukkan bahwa lokasi titik investigasi dalam keadaan kering, sehingga dikategorikan sebagai "completely dry". Selain itu, orientasi sambungan diasumsikan dalam kondisi "very favorable" yang tidak mempengaruhi stabilitas batuan secara signifikan.

8. Rock Mass Rating (RMR)

Nilai *Rock Mass Rating (RMR)* dihitung dengan menjumlahkan rating dari setiap aspek (Goodman, 1989).

$$\begin{aligned} \text{1RMR} &= R1 + R2 + R3 + R4a + R4b + R4c + R4d + \\ &\quad R4e + R5 + R6 \\ &= 2 + 8 + 5 + 2 + 0 + 5 + 6 + 5 + 15 + 0 \\ &= 46 \end{aligned}$$

Nilai yang diperoleh adalah 46, yang diklasifikasikan sebagai "Class III Fair Rock" sesuai dengan sistem klasifikasi RMR 41-60 (Goodman, 1989). Lihat **Tabel 3**.

9. Geological Strength Index (GSI)

Dihitung menggunakan korelasi dengan RMR (Bieniawski Z. T., 1989) yaitu sebagai berikut.

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5$$

$$\text{GSI} = 46 - 5$$

$$\text{GSI} = 41$$

Dengan persamaan ini dihasilkan nilai 41, yang juga menempatkan batuan dalam kategori "Class III Fair Rock" dengan rentang GSI 36-55 (Goodman, 1989).

10. Konstanta batuan utuh (m_i)

Diperoleh dari tabel empiris berdasarkan jenis batuan yang telah diidentifikasi (Hoek, Brown, & ASCE, *Empirical Strength Criterion for Rock Masses*, 1980). Nilai rerata m_i yang dipilih 6.00.

11. Disturbance Factor (D)

Berdasarkan observasi di lapangan, tidak ditemukan adanya kegiatan peledakan atau penggalian yang dapat mengubah karakteristik batuan, sehingga nilai D ditetapkan sebesar 0 (Evert Hoek C. C.-T., 2002).

12. Young's Modulus Massa Batuan (E'_{rm})

Dihitung berdasarkan nilai Young's Modulus batuan utuh yang diperoleh dari uji laboratorium, dengan nilai awal sebesar $E_i = 2,069,910 \text{ kN/m}^2$. Setelah dikoreksi menggunakan formula Hoek-Brown dengan mempertimbangkan nilai GSI dan D , diperoleh nilai akhir sebesar $353,824 \text{ kN/m}^2$.

$$\begin{aligned} E_{rm} &= E_i (0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60+15(D)-GSI)/11}}) \\ &= 2,069,910 (0.02 + \frac{1 - (0)/2}{1 + e^{(60+15(0)-41)/11}}) \\ &= 353,824 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

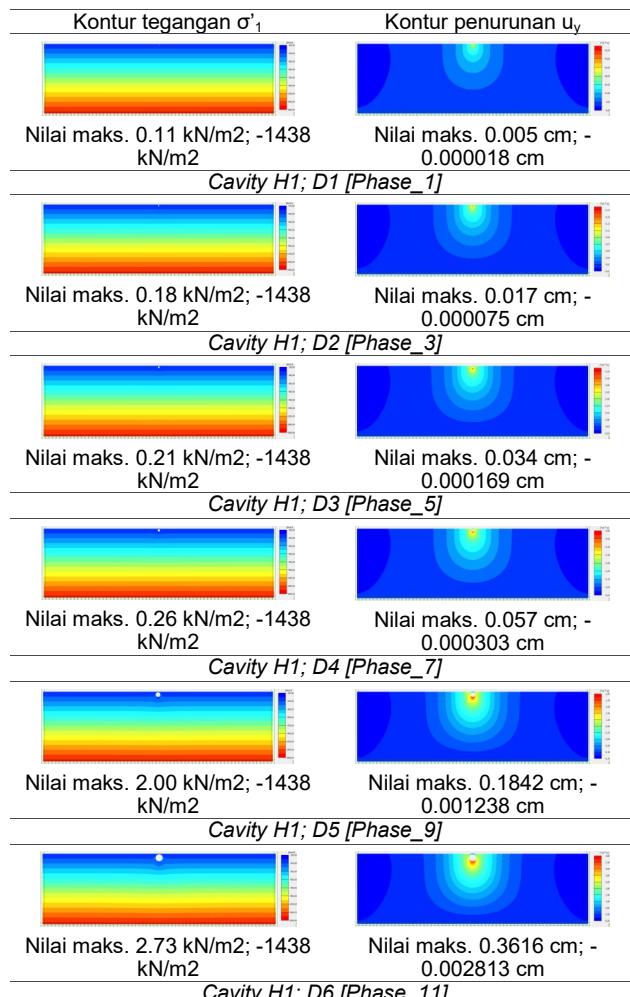
13. Konstanta massa batuan (m_b , s , dan a)

Dihitung berdasarkan formulasi Hoek-Brown, dengan hasil sebagai berikut: $m_b=0.73$, $s=0.0014$, dan $a=0.511$

Dari seluruh parameter yang telah dihitung, dapat disimpulkan bahwa massa batuan yang dianalisis tergolong dalam kategori batuan lemah hingga sedang, sesuai dengan nilai UCS, RQD, RMR, dan GSI. Batuan ini memiliki tingkat diskontinuitas yang tinggi, dengan jarak antar celah yang sangat dekat, bukaan yang besar, serta kondisi yang telah mengalami sedikit pelapukan. Untuk merangkum hasil analisis ini, **Tabel 4** berikut menyajikan parameter-parameter utama yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 4. Hasil penurunan parameter batuan

No	Parameter	Simbol	Satuan	Besaran
1	Uniaxial compressive strength	σ_{ci}	MPa	21.36
2	Poisson's ratio	ν_{ur}'	-	0.20
3	Berat volume	γ_{unsat}	kN/m^3	23.97
4	Point load strength index	I_s	MPa	0.76
5	Rock Quality Designation	RQD	%	38.00
6	Rock Mass Rating	RMR	-	46.00
7	Geological Strength Index	GSI	-	41.00
8	Konstanta batuan utuh	m_i	-	6.00
9	Disturbance factor	D	-	0.00
10	Young's modulus	E'_{rm}	kN/m^2	353,824.00
11	Konstanta massa batuan	m_b	-	0.73
		s	-	0.0014
		a	-	0.511

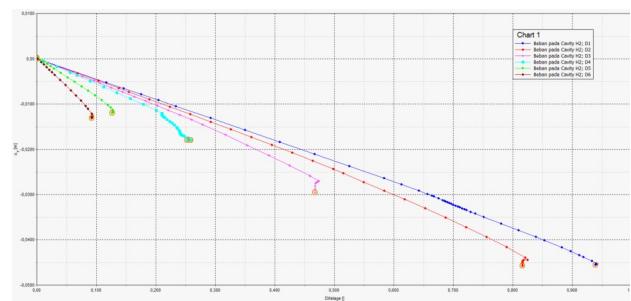


Gambar 7. Kontur tegangan dan penurunan sebelum pembebahan, hanya ada cavity (H1)

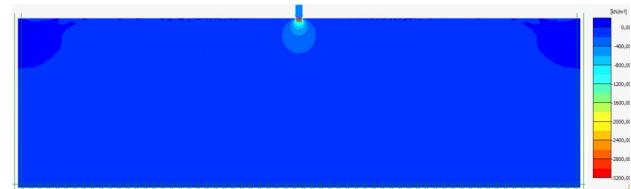
Analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) telah dilakukan dengan Plaxis untuk mengevaluasi pengaruh *cavity* terhadap daya dukung fondasi dangkal pada batu kapur. Simulasi ini mencakup berbagai skenario, mulai dari kondisi awal tanpa *cavity*, kondisi sebelum pembebahan dengan *cavity*, hingga kondisi setelah pembebahan diterapkan.

Sebelum *cavity* diperkenalkan, kondisi tegangan dalam massa batuan masih dalam keadaan geostatik, di mana distribusi tegangan terjadi secara merata akibat berat sendiri batuan. Tegangan maksimum yang terjadi berada di dasar model, dengan nilai sebesar -1438 kN/m^2 .

Ketika *cavity* diperkenalkan, redistribusi tegangan terjadi di sekitar dinding *cavity*, menghasilkan zona tegangan tinggi di sekitarnya dan zona tegangan rendah di atas *cavity*. Perubahan ini menyebabkan batuan di sekitar *cavity* mengalami pelembahan dan deformasi. Pada kondisi kedalaman *cavity* $H1=0.25B$, hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun *cavity* telah terbentuk, distribusi tegangan vertikal maksimum dalam massa batuan masih -1438 kN/m^2 , sama seperti kondisi awal tanpa *cavity*. Namun, terjadi deformasi kecil, dengan nilai penurunan maksimum sebesar -0.3616 cm untuk *cavity* terbesar (H1; D6). Lihat **Gambar 7**.



Gambar 8. Kurva load-displacement cavity H2



Gambar 9. Kontur tegangan akibat pembebahan saja, tanpa cavity

Situasi serupa juga terjadi pada kedalaman lainnya ($H2=0.5B$, $H3=B$, $H4=2B$, dan $H5=3B$), dimana tegangan maksimum masih dalam batas geostatik, namun nilai penurunan bervariasi tergantung pada ukuran *cavity*. Semakin besar diameter *cavity*, semakin besar redistribusi tegangan dan semakin besar pula penurunan yang terjadi.

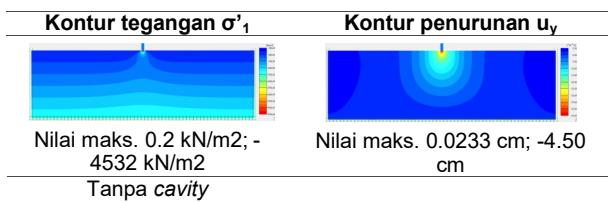
Ketika beban mulai diterapkan di atas fondasi, massa batuan dengan *cavity* mengalami deformasi lebih besar dibandingkan kondisi tanpa *cavity*. Grafik *load-displacement* menunjukkan bahwa hubungan antara beban dan perpindahan memiliki pola non-linear, mengindikasikan bahwa deformasi plastis mulai mendominasi pada tahap akhir pembebahan.

Pada *cavity* dengan diameter kecil (D1), beban maksimum dicapai dengan perpindahan sebesar 4.5 cm . Sementara itu, *cavity* dengan diameter besar (D6) mengalami kegagalan lebih awal, dengan pola deformasi yang lebih besar, **Gambar 8**.

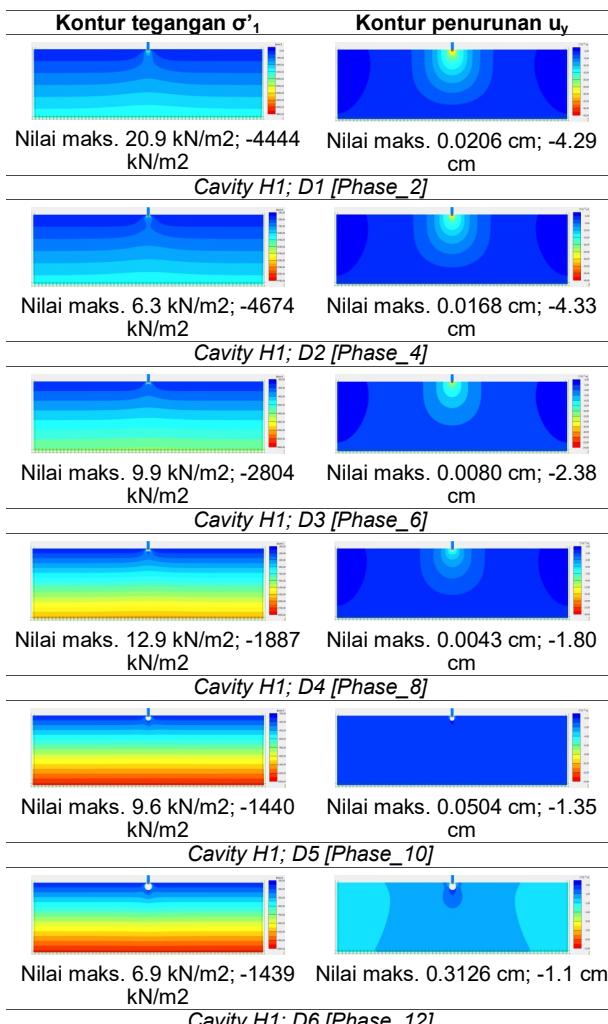
Saat pembebahan diterapkan, distribusi tegangan menunjukkan pola radial dengan konsentrasi tegangan tertinggi di bawah fondasi, **Gambar 9**. Tegangan ini mengikuti pola yang mirip dengan teori Boussinesq, dimana tegangan menyebar berbentuk kerucut dengan nilai maksimum di pusat fondasi.

Setelah beban diaplikasikan, pola tegangan dan penurunan massa batuan menunjukkan bahwa *cavity* memiliki pengaruh signifikan terhadap daya dukung. Pada kondisi tanpa *cavity*, tegangan maksimum yang terjadi di bawah fondasi adalah -4532 kN/m^2 , dengan penurunan -4.50 cm , **Gambar 10**.

Namun, ketika *cavity* hadir, nilai tegangan dan penurunan bergantung diameter dan kedalaman *cavity*. Untuk *cavity* lebih kecil dan lebih dangkal, tegangan vertikal maksimum meningkat, sedangkan untuk *cavity* lebih besar dan lebih dalam, nilai tegangan menurun tetapi penurunan lebih besar.



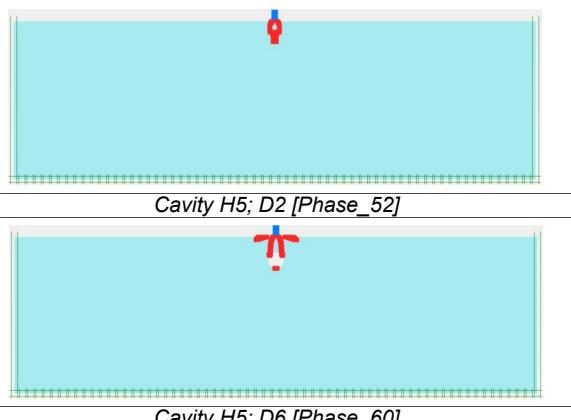
Gambar 10. Kontur tegangan dan penurunan setelah pembebahan, tanpa cavity



Gambar 11. Kontur tegangan dan penurunan setelah pembebahan, cavity (H1)

Untuk *cavity* dengan kedalaman $H1=0.25B$, tegangan vertikal maksimum mencapai -4674 kN/m^2 , sedangkan penurunan maksimum adalah 4.33 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Pada kedalaman yang lebih besar ($H5=3B$), tegangan maksimum lebih kecil (-3529 kN/m^2), tetapi penurunan lebih besar (3.50 cm), menunjukkan bahwa *cavity* yang lebih dalam tidak memperburuk deformasi vertikal.

Mekanisme keruntuhan utama yang diamati dalam simulasi ini adalah *punching shear failure*, yang terjadi ketika tegangan vertikal dari fondasi melampaui kapasitas geser batuan. Pola deformasi plastis menunjukkan bahwa batuan tidak mampu



Gambar 12. Mekanisme keruntuhan *cavity* kecil dan besar

mendistribusikan beban secara merata, sehingga zona plastis berkembang secara progresif menuju *cavity*.

Cavity dengan diameter kecil menghasilkan jalur plastis berbentuk "X" atau *arching*, sedangkan *cavity* besar menyebabkan jalur plastis langsung menuju mahkota *cavity* seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Hal ini mengindikasikan bahwa *cavity* berdiameter besar mempercepat kegagalan struktur batuan dibanding diameter kecil.

Dalam hal daya dukung fondasi, output perhitungan numerik menunjukkan bahwa dalam setiap kondisi *cavity* yang dimodelkan, nilai rasio daya dukung yang diperoleh (\bar{DM}_{stage}) selalu kurang dari 1. Hal ini menunjukkan bahwa beban merata sebesar $2,950 \text{ kN/m}^2$ tidak dapat sepenuhnya dimobilisasi oleh batuan dalam kondisi terdapat *cavity* di dalamnya, yang mengindikasikan terjadi kegagalan sebelum mencapai kapasitas penuh.

Semakin besar nilai \bar{DM}_{stage} atau $R_{Hi;Dj}$, pengaruh *cavity* pada massa batuan tersebut semakin kecil sehingga daya dukungnya mendekati daya dukung dengan kondisi tidak ada *cavity*. Sebaliknya, nilai \bar{M}_{stage} atau $R_{Hi;Dj}$ yang semakin kecil menandakan pengaruh *cavity* pada massa batuan tersebut semakin signifikan yang berarti daya dukung pada kondisi tersebut semakin kecil. Pada Tabel 5 dan Gambar 13, disajikan matriks dan grafik nilai daya dukung relatif untuk setiap kondisi *cavity*.

Matriks dan kurva pada Tabel 5 dan Gambar 13 menggambarkan bagaimana daya dukung berkurang seiring dengan bertambahnya diameter *cavity* atau berkurangnya kedalaman *cavity*.

Panduan klasifikasi *cavity* dapat dilihat dalam Tabel 6. *Cavity* besar dengan diameter besar $D > B$ yang terletak pada kedalaman dangkal $H < B$ menunjukkan penurunan drastis pada rasio daya dukung, ditandai dengan kurva yang menuik tajam ke bawah. Sebaliknya, *cavity* dengan diameter kecil $D \leq 0.5B$ atau *cavity* yang berada pada kedalaman lebih dalam $H > B$ memiliki pengaruh yang jauh lebih kecil terhadap rasio daya dukung, sebagaimana terlihat dari kurva yang cenderung mendatar. Hal ini menunjukkan bahwa *cavity* dengan kombinasi diameter besar dan

Tabel 5. Matriks nilai daya dukung relatif $R_{Hi;Dj}$

H_i/D_j	$R_{Hi;Dj}$					
	No Cavity	$H_1=0.25B$	$H_2=0.5B$	$H_3=B$	$H_4=2B$	$H_5=3B$
No Cavity	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$D_1=0.25B$	1.0000	0.8806	0.9388	0.9317	0.8416	0.7684
$D_2=0.5B$	1.0000	0.7620	0.8164	0.8240	0.6444	0.8131
$D_3=0.75B$	1.0000	0.3744	0.4675	0.6337	0.5600	0.7346
$D_4=B$	1.0000	0.2260	0.2528	0.4979	0.5174	0.6703
$D_5=2B$	1.0000	0.0851	0.1264	0.2252	0.4092	0.5709
$D_6=3B$	1.0000	0.0503	0.0922	0.1767	0.3457	0.5123

Tabel 7. Kelas resiko pengaruh cavity terhadap daya dukung

Resiko Tinggi ($\geq 70\%$)	Resiko Sedang (30-70%)	Resiko Rendah ($\leq 30\%$)
Diameter besar $D>B$ dan kedalaman dangkal $H < B$	Diameter sedang $0.5B < D \leq B$ di semua kedalaman $\geq 0.25B$, Diameter besar $D > B$ dan kedalaman dalam $H \geq B$	Diameter kecil $D \leq 0.5B$ hampir di semua kedalaman $\geq 0.25B$

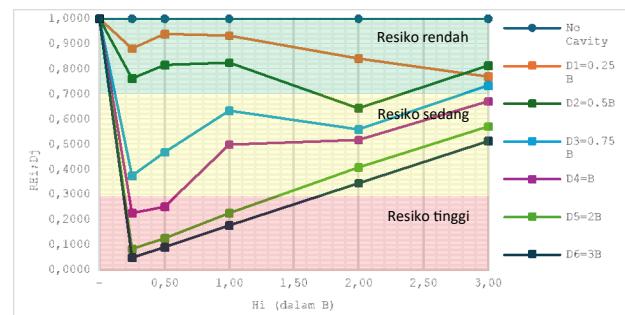
kedalaman dangkal memiliki dampak paling signifikan terhadap penurunan daya dukung fondasi, sedangkan *cavity* kecil atau dalam memberikan pengaruh yang lebih minimal.

Panduan klasifikasi *cavity* dapat dilihat dalam **Tabel 6**. *Cavity* besar dengan diameter besar $D > B$ yang terletak pada kedalaman dangkal $H < B$ menunjukkan penurunan drastis pada rasio daya dukung, ditandai dengan kurva yang menuik tajam ke bawah. Sebaliknya, *cavity* dengan diameter kecil $D \leq 0.5B$ atau *cavity* yang berada pada kedalaman lebih dalam $H > B$ memiliki pengaruh yang jauh lebih kecil terhadap rasio daya dukung, sebagaimana terlihat dari kurva yang cenderung mendatar. Hal ini menunjukkan bahwa *cavity* dengan kombinasi diameter besar dan kedalaman dangkal memiliki dampak paling signifikan terhadap penurunan daya dukung fondasi, sedangkan *cavity* kecil atau dalam memberikan pengaruh yang lebih minimal.

Cavity dengan diameter besar dan kedalaman dangkal adalah penyebab utama penurunan daya dukung. Diameter besar mengurangi volume material penopang di atas *cavity*, sehingga beban fondasi tidak dapat terdistribusi secara merata. Kondisi ini semakin diperburuk oleh kedalaman dangkal, di mana zona plastis yang berkembang dari fondasi dapat dengan mudah menyambung ke mahkota *cavity*, memicu keruntuhan yang bersifat progresif. Pada kondisi ini, daya dukung dapat menurun hingga lebih dari 70%, membuat *cavity* dengan karakteristik ini menjadi prioritas utama dalam penanganan.

Grouting atau pengurangan diameter *cavity* dengan material berkekuatan tinggi, seperti semen *grouting* sangat diperlukan untuk memperkuat mahkota *cavity* dan mengembalikan daya dukung material di atasnya. Lihat **Tabel 7** untuk penjelasan rincinya.

Cavity dengan diameter sedang, yang berkisar $0.5B < D \leq B$, memiliki dampak moderat terhadap pengurangan daya dukung. Pengaruh *cavity* ini terlihat



Gambar 13. Grafik pengaruh cavity terhadap daya dukung relatif $R_{Hi;Dj}$

pada kurva yang menurun tetapi tidak setajam *cavity* dengan diameter besar. *Cavity* sedang yang terletak di kedalaman lebih besar $H \geq B$ memberikan efek yang lebih kecil dibandingkan *cavity* pada kedalaman dangkal, karena material di atas *cavity* dapat membantu mendistribusikan beban dengan lebih baik. Meski begitu, *cavity* dengan diameter sedang dapat memengaruhi daya dukung dalam jangka panjang, terutama jika deformasi plastis berkembang secara bertahap. *Cavity* dalam kategori ini dapat menjadi prioritas kedua untuk diperkuat, dengan fokus pada pengurangan diameter *cavity* untuk meningkatkan stabilitas.

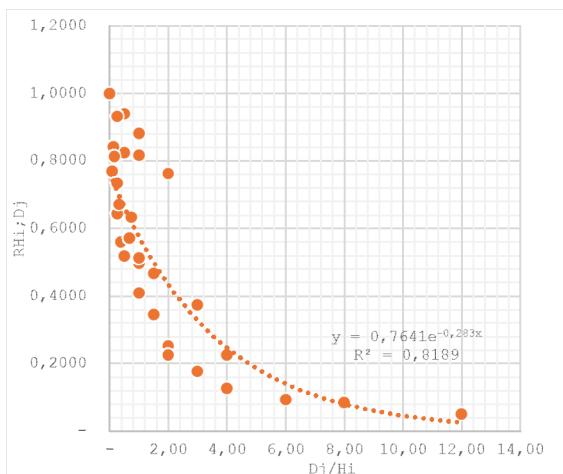
Cavity diameter kecil memiliki pengaruh yang relatif kecil terhadap pengurangan daya dukung hanya kurang dari 30%. *Cavity* ini cenderung menyebabkan kurva yang stabil dan mendekati kondisi tanpa *cavity*, karena diameter kecil memungkinkan tegangan di sekitar *cavity* terdistribusi dengan lebih merata. Kedalaman *cavity* yang lebih besar semakin mengurangi pengaruh *cavity* terhadap daya dukung, karena material di atasnya mampu menahan beban dengan baik. *Cavity* kecil hanya perlu diperkuat jika terdapat indikasi potensi kegagalan jangka panjang, seperti deformasi plastis signifikan atau akumulasi keruntuhan progresif.

Dengan memahami dampak *cavity* berdasarkan grafik tersebut, prioritas penanganan dapat dilakukan secara efisien. *Cavity* dengan diameter besar dan kedalaman dangkal harus menjadi fokus utama dalam perbaikan, diikuti oleh *cavity* dengan diameter sedang, sementara *cavity* kecil hanya membutuhkan penanganan tambahan jika ditemukan potensi masalah di masa mendatang.

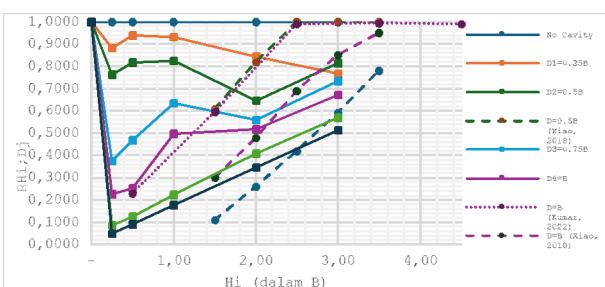
Setelah penanganan dilakukan, dilakukan survei geolistrik untuk memastikan ukuran dan kedalaman *cavity* baru. Dengan strategi ini, risiko kegagalan akibat *cavity* dapat diminimalkan, dan stabilitas struktur di atasnya dapat dijaga secara optimal.

Gambar 14 menyajikan hubungan antara rasio Dj/Hi dan daya dukung relatif $R_{Hi;Dj}$. Pola eksponensial dengan persamaan $y=0.7641e^{-0.283x}$ dan nilai koefisien determinasi $R^2=0.7619$ menunjukkan penurunan daya dukung relatif yang signifikan seiring meningkatnya rasio Dj/Hi .

Pada nilai $Dj/Hi < 0.4$, $R_{Hi;Dj}$ tetap tinggi (>0.70), menandakan bahwa *cavity* kecil atau dalam memiliki pengaruh minimal terhadap stabilitas struktur. Namun,



Gambar 14. Hubungan Dj/Hi dengan daya dukung relatif



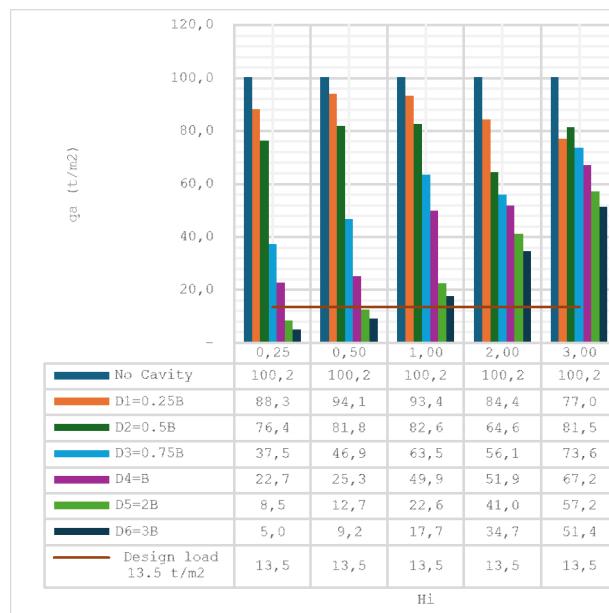
Gambar 15. Perbandingan hasil analisis dengan penelitian lain

saat D/H berada di antara 0.4 hingga 1.6, daya dukung relatif mulai menurun tajam ke kisaran 0.5-0.70. Kondisi ini menunjukkan *cavity* dengan diameter sedang yang mulai mendekati kedalamannya. Pada nilai $D/H \geq 1.6$, $R_{Hi;Dj}$ turun ke bawah 0.50, menunjukkan *cavity* besar relatif terhadap kedalamannya yang menyebabkan penurunan daya dukung signifikan.

Grafik ini dapat lebih praktis digunakan karena menghilangkan pengaruh lebar fondasi B , sehingga fokus langsung pada parameter utama *cavity*: diameter D dan kedalaman H . Penurunan daya dukung kini dapat dievaluasi lebih cepat dan sederhana berdasarkan rasio Dj/Hi .

Terkait potensi resiko *cavity* sesuai **Tabel 7**, *cavity* dengan $D/H \geq 1.6$ memiliki risiko tertinggi dan harus menjadi prioritas utama untuk perbaikan, seperti pengurangan diameter *cavity* melalui *grouting*. Pada $0.4 \leq D/H < 1.6$, risiko moderat dapat dikelola dengan penguatan setelah *cavity* dengan risiko tinggi diatasi. Sementara itu, $D/H < 0.4$ menunjukkan risiko kecil, sehingga penanganannya dapat ditunda kecuali terdapat indikasi kegagalan progresif.

Grafik perbandingan pada **Gambar 15** menunjukkan bahwa penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian (Yao Xiao M. Z., 2018) dan (Piyush Kumar, 2022) dalam hal tren pengaruh kedalaman *cavity* (Hi) terhadap daya dukung relatif (R). Secara umum, semakin besar Hi , daya dukung relatif cenderung meningkat, menunjukkan bahwa pengaruh *cavity*

Gambar 16. Daya dukung izin fondasi terhadap beban desain 13.5t/m²

terhadap penurunan daya dukung semakin kecil pada kedalaman yang lebih besar.

Namun, terdapat beberapa perbedaan penting dalam nilai daya dukung relatif. Pada diameter $D=B$, daya dukung relatif dari penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan (Piyush Kumar, 2022), terutama pada kedalaman *cavity* $Hi < 2.0$. Sebaliknya, untuk $Hi > 2.0$, hasil dari penelitian ini cenderung mendekati nilai daya dukung relatif (Piyush Kumar, 2022). Tren ini menunjukkan bahwa pada diameter $D=B$, hasil penelitian ini memberikan nilai R yang lebih konservatif dibandingkan dengan (Piyush Kumar, 2022) pada kedalaman lebih dangkal.

Disajikan grafik yang menunjukkan besarnya daya dukung izin fondasi untuk setiap kondisi *cavity* yang dibandingkan terhadap beban desain 13.5 t/m^2 sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 16**. Nilai 13.5 t/m^2 adalah nilai beban desain yang spesifik untuk studi kasus dalam penelitian ini

Cavity yang berada pada kedalaman dangkal ($H1=0.25B$ dan $H2=0.5B$) menunjukkan potensi risiko yang paling besar. Pada kedalaman ini, *cavity* dengan diameter $D5=2B$ dan $D6=3B$ tidak aman karena daya dukung izin fondasi masing-masing hanya mencapai 5.0 sampai 12.7 t/m^2 , yang berada di bawah beban desain.

Diusulkan kriteria desain yang dapat diterapkan untuk Rencana Pembangunan Pabrik Amonia dan Urea, Kabupaten Fakfak, Papua Barat dengan beban desain 13.5 t/m^2 dengan parameter batuan spesifik untuk lokasi tersebut.

1. Pemilihan lokasi fondasi.

Desain harus memastikan bahwa lokasi fondasi berada di area dengan *cavity* yang memiliki kedalaman cukup besar dibandingkan diameter *cavity*-nya $H \geq 2B$ dan

$D \leq 0.5B$. Grafik menunjukkan bahwa pada kondisi ini daya dukung izin jauh lebih besar dari beban desain sebesar 13.5 ton/m^2 , sehingga memberikan margin keamanan yang signifikan. Pemilihan lokasi yang tepat bertujuan untuk menghindari risiko kegagalan akibat interaksi zona plastis dari beban fondasi dengan mahkota *cavity*. Jika memungkinkan, hindari area dengan *cavity* yang dangkal $H < B$ dan diameter besar $D > B$, karena daya dukungnya sering berada di bawah beban desain.

2. Perkuatan *cavity* dengan risiko tinggi

Untuk *cavity* yang tidak dapat dihindari, terutama *cavity* dengan kedalaman dangkal $H < B$ dan diameter besar $D > B$, perkuatan harus dilakukan untuk meningkatkan daya dukung izin. Metode *grouting* menggunakan material berkekuatan tinggi adalah solusi utama untuk mengurangi diameter *cavity* secara efektif. Prioritas perkuatan harus diberikan pada *cavity* dengan risiko tinggi terlebih dahulu, di mana daya dukung izin sangat rendah.

3. Desain sistem fondasi yang adaptif

Jika *cavity* dengan risiko tinggi tidak dapat sepenuhnya diperbaiki atau dihindari, maka sistem fondasi harus dirancang untuk mendistribusikan beban secara lebih merata. Penggunaan fondasi *bored pile* dapat mengurangi tekanan langsung di atas *cavity*. Selain itu, dalam kondisi tertentu, pengurangan beban desain dapat dilakukan untuk memastikan bahwa tekanan pada *cavity* berada di bawah daya dukung izin. Kombinasi desain ini memberikan fleksibilitas dalam menghadapi *cavity* tanpa mengorbankan stabilitas struktur secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

1Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut.

1. Dalam kondisi batuan lemah seperti yang dimodelkan, mekanisme keruntuhan utama yang diamati adalah *punching failure*. Keruntuhan ini terjadi ketika fondasi menembus lapisan atas batuan yang rapuh.
2. *Cavity* dengan diameter besar ($D > B$) yang terletak pada kedalaman dangkal ($H < B$) adalah *cavity* resiko tinggi yang berdampak terbesar terhadap penurunan daya dukung, dengan nilai pengurangan 70-90% dibandingkan kondisi tanpa *cavity*. Dalam hal prioritas penanganan, *cavity* dengan kondisi ini menjadi perhatian utama untuk penanganannya.
3. Terdapat hubungan eksponensial yang memudahkan pembacaan pengaruh *cavity* terhadap daya dukung tanpa melibatkan variabel lebar fondasi (B). Pendekatan ini menyederhanakan interpretasi hasil dan mempermudah penerapannya dalam desain teknis.
4. Dalam hal studi kasus penelitian, diajukan tiga kriteria desain untuk perencanaan yakni (1) pemilihan lokasi menghindari *cavity* resiko tinggi (2) perkuatan *cavity* resiko tinggi , dan (3) desain fondasi yang adaptif.
5. Perlu diperhitungkan perbedaan parameter batuan antara area di sekitar *cavity* dan jauh dari *cavity*. Hal ini dapat dilakukan dengan investigasi lapangan tambahan seperti pengeboran untuk mendapatkan data aktual.

6. Terdapat beberapa inkonsistensi pada nilai daya dukung relatif (R) untuk *cavity* kecil ($D \leq 0.5B$). Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengklarifikasi dan memahami fenomena ini, baik melalui simulasi numerik yang lebih detail atau pengumpulan data tambahan.
7. Validasi lanjutan melalui eksperimen fisik, baik di laboratorium maupun lapangan, diperlukan untuk meningkatkan keandalan tiga kriteria desain yang diajukan.

Daftar Pustaka

Barani, H. R., & Ghafoori, G. L. (2014). *A Proposal for Geological Groutability Index (GGI) of Cement Grouting in Rock Foundations*. Indian Journal of Science and Technology, 95-103.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Canada: John Wiley & Sons.

Bieniawski, Z., & Bernede, M. (1979). *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part I. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 138-140.

D. U. Deere, D. W. (1988). *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Deere, D. U., & Deere, D. W. (1963). *Technical Description of Rock Cores for Engineering Purpose*. Rock Mechanics and Engineering Geology, 16-22.

Doruk, P. (1991). *Analysis of the laboratory strength data using the original and modified Hoek-Brown failure criteria*. Toronto: MSc thesis, Dept. Civil Engineering, University of Toronto.

Evert Hoek, C. C.-T. (2002). *Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition*. Toronto: Proc. NARMS-TAC Conference.

Evert Hoek, P. K. (1995). *Rock Mass Rating*. In *Support of Underground Excavations in Hard Rock* (pp. 34-37). Rotterdam: A. A. Balkema Publishers.

Evert Hoek, P. M. (1998). *Applicability of The Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses*. The Case of The Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 151-160.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Canada: John Wiley & Sons.

Hoek, E. (1983). Strength of Jointed Rock Masses. *Rankine Lecture. Geotecnique* 33(3), 187-223.

Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Canada: Evert Hoek Consulting Engineer Inc.

Hoek, E., Brown, E. T., & ASCE, M. (1980). *Empirical Strength Criterion for Rock Masses*. Journal of The Geotechnical Engineering Division, 1013-1035.

Hoek, E., Wood, D., Shah, S., & Hudson, J. A. (1992). *A Modified Hoek-Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses*. Rock Characterization: ISRM Symposium, Eurock '92. Chester, UK: Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.

ISRM. (1978). *Commission on standardization of laboratory and field tests: suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int J RockMech Min Sci Geomech, 319-368.

ISRM. (1981). *Rock Characterization, Testing, and Monitoring*. In: Brown ET (ed) *ISRM Suggested Method*. Oxford: Pergamon Press.

Mayne, P. W., Christopher, B. R., & DeJong, J. (2001). *Manual on Subsurface Investigations*. Washington, DC: Ryan R. Berg & Associates, Inc.

Olmeda, J. L., Robles, J. M., Pérez, E. S., & Marañón, C. O. (2020). *Influence of Natural Cavities on the Design of Shallow Foundations*. MDPI Applied Sciences, 1-20.

Perkasa, P. P. (2023). *Fakfak ERT Daily Progress*. Papua: PT. Portal Engineering Perkasa.

Piyush Kumar, V. B. (2022). *Ultimate Bearing Capacity of A Foundation on The Rock Media due to the Presence of A Circular Void; Design Tables, Failure Mechanism, and Recommendations*. Arabian Journal of Geosciences, 1-22.

Sowers, G. F. (1979). *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering 4th Edition*. New York: Macmillan Publishing.

Vásárhelyi, B. (2013). *A Possible Method for Estimating The Poisson's Rate Values of The Rock Masses*. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, 313-322.

Waltham, A., & Swift, G. (2004). *Bearing Capacity of Rock Over Mined Cavities in Nottingham*. Elsevier Engineering Geology, 15-31.

Yao Xiao, M. Z. (2018). *Finite Element Limit Analysis of the Bearing Capacity of Strip Footing on a Rock Mass with Voids*. International Journal of Geomechanics, 1-15.

Yao Xiao, M. Z. (2023). *Ultimate Bearing Capacity of Strip Footings Above Rectangular Voids in Hoek-Brown Rock Masses*. Computers and Geotechnics, 1-22.