

Identifikasi Hambatan Utama Pengembangan Eksplorasi Panas Bumi di Indonesia Menggunakan Metode Grey Delphi

Gilang Ardi Pratama^{1*}, Mairizal², Syahreen Nur Mutia³, Wahyu⁴, Esa Pratiwi⁵

¹⁻⁵) Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

Jl. Surya Kencana No. 1, Pamulang, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

Email: dosen01860@unpam.ac.id, dosen01742@unpam.ac.id, dosen02342@unpam.ac.id, dosen02342@unpam.ac.id, dosen02976@unpam.ac.id

ABSTRAK

Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar, namun realisasi pemanfaatannya masih jauh dari target nasional, terutama karena tingginya risiko dan hambatan pada tahap eksplorasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan hambatan teknis utama dalam eksplorasi panas bumi di Indonesia menggunakan metode Grey Delphi. Melalui tinjauan literatur yang komprehensif, dua belas variabel hambatan teknis diidentifikasi, kemudian divalidasi oleh panel ahli menggunakan kuesioner berbasis grey number untuk menangani ketidakpastian informasi. Data yang terkumpul diolah melalui proses whitening untuk menentukan nilai crisp bagi setiap variabel, dengan ambang batas (threshold) sebesar 0,65 sebagai kriteria penentu signifikansi hambatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat dua hambatan teknis yang paling kritis, yaitu "Kelanjutan proses" dengan nilai crisp 0,720 dan "Metode Eksplorasi" dengan nilai crisp 0,700. Temuan ini mengindikasikan bahwa ketidakpastian dalam keberlanjutan investasi setelah perolehan data awal serta ketepatan metodologi eksplorasi menjadi tantangan krusial yang memerlukan perhatian segera. Sepuluh variabel lainnya, seperti kelayakan sumber panas, teknologi pelacakan, dan survei mikro-seismik, dinilai kurang signifikan oleh panel ahli pada tahap ini. Hasil penelitian ini memberikan rekomendasi strategis bagi pengembang dan pemerintah untuk lebih fokus pada perbaikan regulasi alur proses dan validitas teknik eksplorasi guna memitigasi risiko kegagalan sumur serta mempercepat pengembangan kapasitas panas bumi di Indonesia.

Kata kunci: Panas Bumi; Eksplorasi; Hambatan Teknis; Grey Delphi; Grey Number; Indonesia.

ABSTRACT

Indonesia has very large geothermal potential, yet its utilization remains far below national targets, mainly because of high risks and barriers during the exploration stage. This study aims to identify and prioritize the main technical barriers to geothermal exploration in Indonesia using the Grey Delphi method. Through a comprehensive literature review, twelve technical barrier variables were identified and then validated by an expert panel using a grey-number-based questionnaire to accommodate information uncertainty. The collected data were processed through whitening to obtain a crisp value for each variable, using a threshold of 0.65 to determine significance. The results show two critical technical barriers: Continuation of the Process, with a crisp value of 0.720, and Exploration Method, with a crisp value of 0.700. These findings indicate that uncertainty regarding the continuation of investment after initial data acquisition and the appropriateness of exploration methodology are crucial challenges requiring immediate attention. The other ten variables, including heat-source feasibility, tracking technology, and microseismic surveys, were considered less significant by the expert panel at this stage. The study recommends that developers and government stakeholders focus on improving process continuity and the validity of exploration techniques to mitigate dry-well risks and accelerate geothermal capacity development in Indonesia.

Keywords: Geothermal; Exploration; Technical Barriers; Grey Delphi; Grey Number; Indonesia.

Pendahuluan

Indonesia memiliki potensi panas bumi (geothermal) yang sangat besar karena secara geografis berada pada jalur Ring of Fire. Potensi panas bumi Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 23,9–28,6 GW dan tersebar di berbagai wilayah, sehingga menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan sumber daya panas bumi terbesar di dunia [1], [2]. Besarnya potensi tersebut menjadikan panas bumi sebagai salah satu sumber energi terbarukan strategis untuk mendukung pemenuhan kebutuhan energi sekaligus proses transisi menuju sistem energi rendah karbon. Meskipun demikian, tingkat pemanfaatannya masih relatif rendah dibandingkan dengan potensi sumber daya yang tersedia. Yudha et al. melaporkan bahwa kapasitas terpasang panas bumi Indonesia pada tahun 2022 baru sekitar 2,175 GW atau 7,6% dari estimasi potensinya [1]. Kondisi tersebut menunjukkan masih terdapat kesenjangan yang cukup besar antara potensi sumber daya panas bumi dengan kapasitas yang telah berhasil dikembangkan menjadi energi listrik.

Salah satu tahapan yang menentukan keberhasilan pengembangan panas bumi adalah tahap eksplorasi. Tahap eksplorasi memiliki tingkat ketidakpastian dan risiko yang tinggi karena informasi mengenai karakteristik reservoir bawah permukaan belum sepenuhnya tersedia sebelum kegiatan eksplorasi dan pengeboran dilakukan [3], [4]. Tahap ini melibatkan kegiatan survei geologi, geofisika, dan geokimia, penyusunan model konseptual reservoir, penentuan target pengeboran, pengeboran sumur eksplorasi, serta evaluasi potensi sumber daya. Purba et al. menyatakan bahwa fase eksplorasi merupakan fase dengan tingkat ketidakpastian tertinggi dalam pengembangan panas bumi, terutama karena adanya risiko sumber daya yang berkaitan dengan temperatur dan permeabilitas reservoir serta risiko lain yang berkaitan dengan infrastruktur pengeboran, regulasi, lingkungan, dan masyarakat lokal [3], [5]. Oleh karena itu, keberhasilan eksplorasi sangat menentukan keputusan apakah suatu proyek dapat dilanjutkan ke tahap pengembangan dan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).

Ketidakpastian pada tahap eksplorasi tidak hanya menimbulkan persoalan teknis, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap kelayakan dan keberlanjutan investasi proyek panas bumi. Pengembangan panas bumi membutuhkan investasi awal yang besar, sedangkan kepastian mengenai kualitas dan kapasitas sumber daya baru dapat diperoleh setelah kegiatan eksplorasi dilakukan [4], [6]. Ketersediaan data geologi dan data bawah permukaan yang kredibel menjadi faktor penting untuk mengurangi risiko tersebut. Penelitian Yudha et al. menunjukkan bahwa pengumpulan data pada tahap hulu merupakan salah satu faktor penting dalam menurunkan risiko pengembangan panas bumi di Indonesia [1]. Studi lain juga menunjukkan bahwa penyediaan data eksplorasi yang lebih kredibel dapat membantu mengurangi risiko serta biaya yang harus ditanggung pengembang pada tahap awal proyek [7]. Dengan demikian, kualitas proses eksplorasi memiliki hubungan yang erat dengan keputusan untuk melanjutkan atau menghentikan investasi panas bumi.

Berbagai hambatan dapat memengaruhi keberhasilan eksplorasi panas bumi. Hambatan tersebut dapat berasal dari ketidakpastian sumber daya, metode eksplorasi, penentuan lokasi pengeboran, kualitas data, kemampuan teknologi, biaya pengeboran, maupun faktor regulasi dan kelembagaan [1], [3], [8]. Kekurangan data geologi yang memadai dapat menyulitkan identifikasi sumber daya potensial, sementara tingginya biaya eksplorasi awal dapat mengurangi ketertarikan sektor swasta untuk berinvestasi [8]. Selain itu, proyek panas bumi merupakan proyek yang bersifat padat modal, kompleks, dan sensitif terhadap berbagai bentuk ketidakpastian, sehingga keputusan untuk melanjutkan pengembangan sering kali harus dibuat dalam kondisi informasi yang belum lengkap [6]. Oleh sebab itu, tidak seluruh hambatan eksplorasi dapat diperlakukan dengan tingkat prioritas yang sama. Diperlukan identifikasi terhadap hambatan yang paling kritis agar sumber daya, waktu, dan strategi mitigasi dapat difokuskan pada faktor yang memiliki tingkat kepentingan tertinggi.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji hambatan dalam pengembangan panas bumi di Indonesia dari berbagai perspektif. Yudha et al. mengidentifikasi bahwa pengembangan panas bumi Indonesia dipengaruhi oleh investasi modal, pengumpulan data hulu, pembangunan infrastruktur, kebijakan harga, insentif, prosedur perizinan, isu lingkungan, dan penerimaan masyarakat [1]. Penelitian Tharom dan Hadi menunjukkan bahwa tingginya risiko eksplorasi, biaya eksplorasi, serta faktor kelembagaan masih menjadi kendala dalam pengembangan PLTP di Indonesia [7]. Sementara itu, Mairizal et al. mengidentifikasi berbagai hambatan investasi panas bumi menggunakan kombinasi Fuzzy Delphi dan DEMATEL serta menemukan bahwa metode eksplorasi, dukungan teknologi, penambahan titik pengeboran, perizinan, dan faktor lainnya memiliki peran dalam kinerja investasi PLTP di Indonesia [9]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengembangan panas bumi melibatkan berbagai faktor yang saling berkaitan dan tidak terbatas pada persoalan teknis semata.

Meskipun penelitian mengenai hambatan pengembangan dan investasi panas bumi telah dilakukan, kajian yang secara khusus melakukan penyaringan dan penentuan prioritas hambatan teknis pada tahap eksplorasi berdasarkan konsensus ahli masih relatif terbatas. Penelitian sebelumnya lebih banyak membahas hambatan pengembangan panas bumi secara keseluruhan atau hubungan antarfaktor dalam investasi PLTP [1], [7], [9]. Padahal, karakteristik tahap eksplorasi memiliki tingkat ketidakpastian yang tinggi dan sangat menentukan keberlanjutan proyek [3]. Selain itu, penilaian terhadap tingkat kepentingan suatu hambatan banyak bergantung pada pengalaman dan pengetahuan praktis para ahli. Penilaian tersebut tidak selalu dapat dinyatakan secara pasti dalam satu nilai numerik karena terdapat unsur subjektivitas, ketidaklengkapan informasi, dan perbedaan persepsi antar ahli. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya suatu pendekatan yang dapat memperoleh konsensus ahli sekaligus merepresentasikan ketidakpastian dalam proses penilaian.

Untuk menjawab kebutuhan tersebut, penelitian ini menggunakan metode Grey Delphi, yaitu pendekatan yang mengintegrasikan prinsip metode Delphi dengan Grey System Theory. Metode Delphi digunakan untuk memperoleh konsensus melalui penilaian panel ahli, sedangkan teori sistem grey memungkinkan informasi yang tidak lengkap atau tidak pasti direpresentasikan menggunakan grey number dalam bentuk interval nilai batas bawah (lower) dan batas atas (upper). Pendekatan interval tersebut memungkinkan ketidakpastian dalam penilaian ahli tetap dipertahankan selama proses analisis. Selanjutnya, nilai grey number diagregasi dan dikonversi melalui proses whitening menjadi nilai crisp yang dapat dibandingkan dengan nilai ambang batas (threshold). Dengan cara tersebut, hambatan yang memenuhi nilai threshold dapat ditetapkan sebagai hambatan prioritas, sedangkan hambatan yang berada di bawah nilai tersebut dapat dieliminasi dari kelompok faktor utama.

Penggunaan Grey Delphi dalam penelitian ini juga memberikan pembeda dibandingkan penelitian sebelumnya yang menggunakan Fuzzy Delphi untuk mengidentifikasi hambatan investasi panas bumi [9]. Jika Fuzzy Delphi merepresentasikan ketidakpastian melalui fungsi keanggotaan fuzzy, pendekatan grey menggunakan interval nilai untuk menggambarkan informasi yang tidak lengkap. Dengan demikian, penggunaan Grey Delphi diharapkan dapat memberikan mekanisme yang lebih langsung dalam mengakomodasi rentang penilaian ahli sekaligus menghasilkan nilai prioritas yang dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan.

Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan memprioritaskan hambatan utama dalam pengembangan eksplorasi panas bumi di Indonesia menggunakan metode Grey Delphi. Secara khusus, penelitian dilakukan melalui identifikasi hambatan potensial berdasarkan tinjauan pustaka, pengumpulan penilaian para ahli menggunakan kuesioner berbasis grey number, agregasi dan whitening terhadap penilaian ahli, serta penentuan hambatan prioritas berdasarkan nilai threshold yang telah ditetapkan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menghasilkan daftar hambatan yang lebih terfokus dan merepresentasikan konsensus para ahli mengenai faktor teknis yang paling kritis dalam eksplorasi panas bumi.

Penelitian ini diharapkan dapat memperluas penerapan metode Grey Delphi dalam kajian energi terbarukan, khususnya pada pengambilan keputusan yang melibatkan informasi tidak lengkap dan penilaian ahli yang bersifat tidak pasti. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah, pengembang panas bumi, investor, dan pemangku kepentingan lainnya dalam menentukan prioritas mitigasi hambatan eksplorasi. Penentuan prioritas tersebut penting karena pengurangan risiko eksplorasi, peningkatan kualitas data hulu, dan pengelolaan risiko investasi merupakan bagian penting dalam mempercepat pengembangan panas bumi di Indonesia [1], [6], [7], [10]. Dengan memfokuskan sumber daya pada hambatan yang memiliki tingkat kepentingan tertinggi, proses eksplorasi diharapkan dapat dilaksanakan secara lebih efektif, risiko kegagalan dapat dikurangi, dan keberlanjutan pengembangan panas bumi di Indonesia dapat ditingkatkan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis expert judgment dengan metode Grey Delphi. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi dan menyaring hambatan utama pada tahap eksplorasi panas bumi di Indonesia berdasarkan penilaian para ahli. Metode Delphi pada dasarnya merupakan pendekatan terstruktur untuk memperoleh konsensus dari sekelompok ahli terhadap suatu permasalahan yang mengandung ketidakpastian. Pendekatan Delphi telah banyak digunakan untuk menentukan prioritas suatu faktor berdasarkan penilaian ahli melalui proses penilaian dan agregasi pendapat [11]. Dalam penelitian ini, pendekatan Delphi dikombinasikan dengan Grey System Theory agar ketidakpastian dalam penilaian ahli dapat direpresentasikan dalam bentuk interval atau grey number.

Identifikasi Hambatan Eksplorasi Panas Bumi

Tahap awal penelitian dilakukan melalui studi literatur untuk mengidentifikasi berbagai hambatan yang berpotensi memengaruhi keberhasilan eksplorasi panas bumi. Literatur yang digunakan meliputi artikel jurnal, prosiding ilmiah, dan penelitian terdahulu yang membahas eksplorasi, pengeboran, teknologi, risiko, dan pengembangan panas bumi di Indonesia maupun negara lain. Proses identifikasi literatur menghasilkan dua belas variabel hambatan yang selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan instrumen penelitian.

Dua belas variabel tersebut terdiri atas kelanjutan proses (X1), kelayakan sumber panas (X2), ketidakpastian sumber panas (X3), metode eksplorasi (X4), pemilihan lokasi pengeboran (X5), penentuan posisi pengeboran (X6), perekaman data sumur (X7), rekahan buatan (X8), survei mikro-seismik (X9), teknologi pelacakan (X10), teknologi eksplorasi (X11), dan optimasi teknologi tepat guna (X12). Setiap variabel dilengkapi dengan definisi operasional berdasarkan literatur sehingga para ahli memiliki pemahaman yang relatif sama ketika memberikan penilaian.

Table 1. Variabel hambatan eksplorasi panas bumi

Var	Jenis Hambatan	Deskripsi	Literatur
X1	Kelanjutan proses	Kepastian dalam melanjutkan proses investasi setelah memperoleh data awal.	Mohd Alsaleh & Abdul-Rahim (2023)
X2	Kelayakan sumber panas	Ketidakpastian kelayakan sumber panas yang memengaruhi volume cadangan panas bumi.	Suryadi & Garniwa (2023)
X3	Ketidakpastian sumber panas	Pilihan metode eksplorasi memengaruhi hasil; teknik yang tidak tepat menyebabkan ketidakpastian.	Suryadi & Garniwa (2023)
X4	Metode Eksplorasi	Pilihan metode eksplorasi memengaruhi hasil; teknik yang tidak tepat.	Hartono et al. (2023)
X5	Pemilihan lokasi pengeboran	Pengeboran di lokasi yang salah menghasilkan biaya tinggi tanpa pengembalian.	Pambudi & Ulfa (2024)
X6	Penentuan Posisi Pengeboran	Mengidentifikasi lokasi potensial membutuhkan data yang terperinci dan sangat mahal.	Elfajrie et al. (2024)
X7	Perekaman data Sumur	Data well logging yang kurang optimal menyebabkan hasil pengukuran sumur yang tidak akurat.	Azmi et al. (2021)
X8	Rekahan Buatan	Biaya dan risiko yang tinggi dari penerapan EGS (Enhanced Geothermal System).	Amer et al. (2025)
X9	Survei mikro-seismik	Pemantauan reservoir tidak dapat dilakukan secara optimal.	Barock et al. (2018)
X10	Teknologi pelacakan	Teknologi reservoir tingkat lanjut untuk melacak pergerakan fluida biayanya sangat mahal.	Isroi (2015)

X11	Teknologi eksplorasi	Peralatan modern masih terbatas di Indonesia dan harus diimpor.	Suryani et al. (2025)
X12	Optimasi teknologi tepat guna	Pemilihan teknologi eksplorasi yang kurang optimal menghasilkan data yang kurang akurat.	Wahid et al. (2025)

Pemilihan Panel Ahli

Responden penelitian ditentukan menggunakan teknik purposive sampling, yaitu pemilihan responden berdasarkan kompetensi dan pengalaman yang relevan dengan objek penelitian. Responden yang dilibatkan merupakan praktisi, akademisi, atau profesional yang memiliki pengetahuan dan pengalaman dalam bidang panas bumi, khususnya kegiatan eksplorasi, pengeboran, reservoir, pengembangan proyek, atau bidang lain yang berkaitan langsung dengan pengembangan panas bumi.

Kriteria ahli yang digunakan dalam penelitian ini adalah memiliki pengalaman profesional di bidang panas bumi selama minimal 5 tahun dan memiliki pendidikan minimal sarjana (S1) atau kualifikasi profesional yang relevan. Pemilihan ahli berdasarkan kompetensi diperlukan karena kualitas hasil Delphi sangat dipengaruhi oleh pengetahuan dan pengalaman panel dalam memahami permasalahan yang dinilai. Metode Delphi sendiri memungkinkan opini ahli dikumpulkan secara sistematis dan digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang memperoleh tingkat kesepakatan tertentu [11].

Penyusunan Instrumen dan Pengumpulan Data

Instrumen penelitian berupa kuesioner yang disusun berdasarkan dua belas variabel hambatan hasil studi literatur. Para ahli diminta memberikan penilaian terhadap tingkat kepentingan setiap hambatan dalam memengaruhi proses eksplorasi panas bumi di Indonesia.

Penilaian menggunakan lima kategori linguistik, yaitu *Very Low Important*, *Low Important*, *Medium Important*, *High Important*, dan *Very High Important*. Setiap kategori linguistik kemudian dikonversi menjadi *grey number* dalam bentuk interval nilai batas bawah (*lower bound*) dan batas atas (*upper bound*).

Table 2. Skala linguistik dan *grey number*

Skala Linguistik	Grey Number
Very Low Important	[0; 0,2]
Low Important	[0,2; 0,4]
Medium Important	[0,4; 0,6]
High Important	[0,6; 0,8]
Very High Important	[0,8; 1]

Penggunaan interval memungkinkan respon ahli tidak direpresentasikan hanya dengan satu angka pasti. Hal tersebut sesuai dengan karakteristik Grey System Theory, yaitu informasi yang tidak sepenuhnya diketahui dapat dinyatakan menggunakan rentang nilai. Dengan demikian, ketidakpastian dalam penilaian ahli tetap dapat dipertahankan pada tahap awal pengolahan data sebelum dikonversi menjadi nilai tunggal.

Agregasi Grey Number

Setelah seluruh kuesioner dikumpulkan, penilaian linguistik masing-masing ahli dikonversi menjadi *grey number*. Misalkan penilaian ahli ke-*h* terhadap hambatan ke-*i* dinyatakan sebagai:

$$\otimes G_{ih} = [L_{ih}, U_{ih}] \quad (1)$$

dengan L_{ih} merupakan nilai batas bawah dan U_{ih} merupakan nilai batas atas dari penilaian ahli ke-*h* terhadap hambatan ke-*i*.

Apabila jumlah ahli adalah *k*, nilai *grey number* agregat untuk setiap hambatan dihitung dengan merata-ratakan nilai batas bawah dan batas atas dari seluruh ahli:

$$\otimes G_{ih} = \left[\frac{1}{K} \sum_{h=1}^k L_{ih}, \frac{1}{K} \sum_{h=1}^k U_{ih}, \right] \quad (2)$$

Hasil agregasi menghasilkan dua nilai untuk setiap hambatan, yaitu nilai *lower* (L_i) dan *upper* (U_i). Kedua nilai tersebut menggambarkan rentang penilaian kolektif panel ahli terhadap tingkat kepentingan masing-masing hambatan.

Proses Whitening

Nilai *grey number* agregat selanjutnya dikonversi menjadi nilai tunggal (*crisp value*) melalui proses whitening. Proses ini diperlukan agar setiap hambatan dapat dibandingkan dan ditentukan tingkat kepentingannya. Nilai *crisp* dihitung menggunakan persamaan:

$$C_i = (1 - \alpha) L_i + \alpha U_i \quad (3)$$

dengan (C_i) merupakan nilai *crisp* hambatan ke-(*i*), (L_i) merupakan nilai batas bawah, (U_i) merupakan nilai batas atas, dan (α) merupakan koefisien whitening. Penelitian ini menggunakan ($\alpha=0,5$), sehingga batas bawah dan batas atas diberikan bobot yang sama. Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$C_i = \frac{L_i + U_i}{2} \quad (4)$$

Sebagai contoh, variabel kelanjutan proses (X1) memperoleh nilai agregat ($L=0,620$) dan ($U=0,820$). Nilai *crisp* variabel tersebut dihitung sebagai:

$$C_{xi} = \frac{0,620 + 0,820}{2} = 0,720 \quad (5)$$

Dengan prosedur yang sama, nilai *crisp* dihitung untuk seluruh variabel hambatan.

Penentuan Threshold dan Seleksi Hambatan

Tahap selanjutnya adalah menentukan hambatan yang termasuk dalam kategori prioritas. Penelitian ini menggunakan nilai threshold (λ) sebesar 0,65 sebagai batas seleksi. Nilai *crisp* setiap hambatan dibandingkan dengan nilai threshold menggunakan kriteria:

$$C_i \geq \lambda \rightarrow \text{Hambatan Penting} \quad (6)$$

$$C_i < \lambda \rightarrow \text{Hambatan Tidak Penting} \quad (7)$$

dengan ($\lambda=0,65$). Hambatan dengan nilai *crisp* sama dengan atau lebih besar dari 0,65 dikategorikan sebagai hambatan penting dan dipertahankan sebagai hambatan utama. Sebaliknya, hambatan dengan nilai *crisp* di bawah 0,65 dikategorikan sebagai hambatan tidak penting berdasarkan konsensus panel ahli pada penelitian ini.

Tahapan Analisis Data

Secara keseluruhan, proses analisis dilakukan melalui enam tahapan. Pertama, mengidentifikasi hambatan potensial eksplorasi panas bumi berdasarkan studi literatur. Kedua, menyusun variabel dan instrumen kuesioner. Ketiga, memilih panel ahli berdasarkan kriteria kompetensi dan pengalaman. Keempat, mengonversi penilaian linguistik ahli menjadi *grey number*. Kelima, melakukan agregasi dan proses *whitening* untuk memperoleh nilai *crisp* setiap hambatan. Keenam, membandingkan nilai *crisp* dengan *threshold* 0,65 untuk menentukan hambatan utama eksplorasi panas bumi di Indonesia.

Hasil akhir proses tersebut berupa daftar hambatan yang telah melalui proses penyaringan berdasarkan penilaian panel ahli. Hambatan yang memenuhi nilai *threshold* selanjutnya dianalisis pada bagian hasil dan pembahasan untuk menentukan implikasinya terhadap keberlanjutan proses eksplorasi dan pengembangan panas bumi di Indonesia.

Hasil Dan Pembahasan

Analisis Grey Delphi dilakukan terhadap dua belas variabel hambatan eksplorasi panas bumi yang telah diidentifikasi melalui studi literatur dan selanjutnya dinilai oleh panel ahli, analisa delphi dilakukan 2 ronde, validasi variabel dan Penilaian linguistik dari setiap ahli dikonversi menjadi *grey number* dalam bentuk nilai batas bawah (lower) dan batas atas (upper), sebanyak 10 pakar yang menilai tersebut kemudian diagregasi dan melalui proses *whitening* untuk menghasilkan nilai *crisp*. Dalam penelitian ini, nilai *threshold* sebesar 0,65 digunakan sebagai batas untuk menentukan hambatan utama. Variabel dengan nilai *crisp* $\geq 0,65$ dikategorikan sebagai hambatan penting, sedangkan variabel dengan nilai *crisp* $< 0,65$ dikategorikan sebagai hambatan tidak penting berdasarkan hasil penyaringan Grey Delphi.

Table 3. Hasil Penilaian Grey Delphi terhadap Hambatan Eksplorasi Panas Bumi

Kode	Jenis Hambatan	Lower	Upper	Crisp	Klasifikasi
X1	Kelanjutan proses	0,620	0,820	0,720	Penting
X2	Kelayakan sumber panas	0,500	0,700	0,600	Tidak Penting
X3	Ketidakpastian sumber panas	0,520	0,720	0,620	Tidak Penting
X4	Metode eksplorasi	0,600	0,800	0,700	Penting
X5	Pemilihan lokasi pengeboran	0,520	0,720	0,620	Tidak Penting
X6	Penentuan posisi pengeboran	0,500	0,700	0,600	Tidak Penting
X7	Perekaman data sumur	0,540	0,740	0,640	Tidak Penting
X8	Rekahan buatan	0,480	0,680	0,580	Tidak Penting
X9	Survei mikro-seismik	0,520	0,720	0,620	Tidak Penting
X10	Teknologi pelacakan	0,440	0,640	0,540	Tidak Penting
X11	Teknologi eksplorasi	0,460	0,660	0,560	Tidak Penting
X12	Optimasi teknologi tepat guna	0,400	0,600	0,500	Tidak Penting

Prosedur Delphi dilakukan dalam dua putaran. Putaran pertama (Round 1) bertujuan untuk validasi daftar variabel hambatan: ahli diminta meninjau definisi operasional, memberikan komentar, dan mengusulkan penambahan/penghapusan

variabel bila diperlukan. Berdasarkan umpan balik Round 1, definisi beberapa variabel disempurnakan (termasuk klarifikasi perbedaan X3 dan X4) dan tidak ada variabel baru yang ditambahkan secara substansial. Putaran kedua (Round 2) merupakan penilaian kepentingan: ahli memberikan skor linguistik untuk setiap variabel. Stopping criterion yang digunakan adalah selesainya penilaian lengkap dari seluruh 10 ahli pada Round 2. Pendekatan dua putaran ini sesuai praktik Grey/Fuzzy Delphi yang menekankan validasi konstruk diikuti penilaian prioritas [9], [11], [17]. Meskipun jumlah putaran lebih sedikit dibanding Delphi klasik multi-round, kombinasi dengan grey number memungkinkan ketidakpastian tetap terakomodasi tanpa memerlukan iterasi berulang untuk konvergensi numerik.

Berdasarkan Tabel 3, nilai *crisp* dari dua belas variabel berada pada rentang 0,500–0,720. Hasil penyaringan menunjukkan bahwa hanya dua variabel yang memiliki nilai *crisp* di atas *threshold* 0,65, yaitu kelanjutan proses (X1) dengan nilai 0,720 dan metode eksplorasi (X4) dengan nilai 0,700. Dengan demikian, kedua variabel tersebut teridentifikasi sebagai hambatan utama dalam eksplorasi panas bumi berdasarkan konsensus panel ahli. Sementara itu, sepuluh variabel lainnya memiliki nilai *crisp* di bawah 0,65 sehingga tidak lolos sebagai hambatan prioritas dalam penelitian ini.

Variabel kelanjutan proses (X1) memperoleh nilai *crisp* tertinggi sebesar 0,720. Hasil tersebut menunjukkan bahwa panel ahli menilai kepastian untuk melanjutkan proses setelah diperolehnya informasi awal eksplorasi sebagai persoalan paling penting. Variabel metode eksplorasi (X4) menempati urutan kedua dengan nilai *crisp* sebesar 0,700. Kedua hasil tersebut menunjukkan bahwa hambatan utama tidak hanya berkaitan dengan keberadaan sumber daya panas bumi, tetapi juga berkaitan dengan bagaimana informasi hasil eksplorasi digunakan untuk menentukan kelanjutan proyek dan bagaimana metode eksplorasi dipilih untuk mengurangi ketidakpastian kondisi bawah permukaan.

Kelanjutan Proses sebagai Hambatan Utama

Kelanjutan proses (X1) memperoleh nilai *crisp* tertinggi sebesar 0,720 dengan nilai *lower* 0,620 dan *upper* 0,820. Nilai tersebut menunjukkan bahwa keberlanjutan proses setelah diperolehnya data awal merupakan hambatan yang paling diprioritaskan oleh panel ahli. Dalam konteks pengembangan panas bumi, tahap eksplorasi membutuhkan pengeluaran modal pada saat kepastian mengenai kualitas dan kapasitas sumber daya bawah permukaan masih terbatas. Kondisi tersebut menyebabkan keputusan untuk melanjutkan investasi menjadi sangat bergantung pada tingkat keyakinan terhadap data hasil eksplorasi dan risiko proyek yang masih harus ditanggung.

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Yudha et al. yang menunjukkan bahwa pengembangan panas bumi di Indonesia dipengaruhi oleh investasi modal dan pengumpulan data hulu untuk mengurangi risiko pengembangan [1]. Ketidakpastian sumber daya dan kebutuhan modal awal yang tinggi juga dapat meningkatkan risiko investasi karena pengembang harus mengeluarkan biaya sebelum potensi sumber daya dapat dikonfirmasi secara memadai. Studi mengenai risiko pengembangan panas bumi menunjukkan bahwa kebutuhan modal yang besar pada tahap awal dan ketidakpastian hasil eksplorasi dapat mengurangi daya tarik investasi apabila tidak didukung mekanisme pembagian dan mitigasi risiko yang memadai [12], [13].

Hasil penelitian ini juga memperlihatkan bahwa persoalan eksplorasi tidak berhenti ketika data awal berhasil diperoleh. Data tersebut harus mampu memberikan dasar yang cukup kuat untuk menentukan apakah investasi berikutnya layak dilanjutkan. Dengan demikian, kualitas informasi hasil eksplorasi dan mekanisme pengambilan keputusan setelah eksplorasi menjadi bagian yang saling berkaitan. Apabila data yang diperoleh belum cukup untuk mengurangi ketidakpastian, pengembang dapat menghadapi dilema antara melakukan eksplorasi tambahan yang meningkatkan biaya atau menghentikan proses pengembangan.

Secara praktis, hasil tersebut menunjukkan perlunya mekanisme *de-risking* pada tahap eksplorasi, peningkatan kualitas data hulu, serta tahapan evaluasi yang jelas sebelum keputusan investasi berikutnya dilakukan. Liu dan Lin menjelaskan bahwa risiko teknis dan finansial dalam proyek panas bumi saling berkaitan karena ketidakpastian penemuan sumber daya dan kebutuhan modal awal dapat meningkatkan biaya modal dan mengurangi minat investasi [12], [14]. Oleh karena itu, strategi mitigasi tidak cukup hanya berorientasi pada teknologi, tetapi juga perlu memastikan bahwa hasil eksplorasi dapat menjadi dasar yang kredibel bagi keputusan kelanjutan proyek.

Metode Eksplorasi sebagai Hambatan Utama

Variabel metode eksplorasi (X4) memperoleh nilai *crisp* sebesar 0,700 dengan nilai *lower* 0,600 dan *upper* 0,800. Nilai tersebut berada di atas *threshold* 0,65 sehingga dikategorikan sebagai hambatan penting. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan metode eksplorasi yang tepat merupakan salah satu faktor yang dianggap kritis oleh panel ahli dalam mengurangi ketidakpastian eksplorasi panas bumi.

Pemilihan metode eksplorasi memiliki peranan penting karena reservoir panas bumi berada di bawah permukaan dan tidak dapat diamati secara langsung. Informasi mengenai sistem panas bumi diperoleh melalui integrasi berbagai data geologi, geokimia, dan geofisika sebelum target pengeboran ditetapkan. Kesalahan atau keterbatasan dalam pemilihan metode dapat menghasilkan interpretasi bawah permukaan yang kurang tepat dan meningkatkan ketidakpastian dalam menentukan target pengeboran.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Mairizal et al. yang mengidentifikasi *exploration methods* sebagai salah satu hambatan utama dalam investasi PLTP di Indonesia menggunakan pendekatan Fuzzy Delphi dan DEMATEL [9]. Kesamaan hasil tersebut memperkuat indikasi bahwa metode eksplorasi bukan hanya persoalan

teknis di lapangan, tetapi juga dapat memengaruhi keputusan investasi karena kualitas metode yang digunakan menentukan kualitas informasi yang tersedia bagi pengembang.

Perkembangan metode geofisika juga menunjukkan pentingnya pemilihan dan integrasi metode eksplorasi. Maryadi et al. menjelaskan bahwa metode magnetotelluric (MT) memiliki peran penting dalam eksplorasi panas bumi Indonesia untuk mengidentifikasi clay cap, reservoir, struktur geologi, dan target pengeboran. Namun, interpretasinya menghadapi tantangan berupa kondisi topografi, efek laut, cultural noise, serta variasi karakteristik resistivitas antarlapangan. Integrasi data MT dengan informasi geologi dan geokimia dapat meningkatkan model konseptual dan membantu mengurangi risiko pengeboran [15]

Dengan demikian, hasil Grey Delphi pada variabel X4 memberikan implikasi bahwa peningkatan eksplorasi tidak cukup hanya melalui penambahan teknologi atau instrumen. Pemilihan metode harus disesuaikan dengan karakteristik geologi setiap wilayah dan diikuti dengan integrasi berbagai sumber data. Strategi tersebut diperlukan untuk menghasilkan model konseptual reservoir yang lebih andal sebelum keputusan pengeboran dilakukan.

Evaluasi Hambatan yang Tidak Lolos Threshold

Sepuluh variabel lainnya memiliki nilai crisp di bawah threshold 0,65. Perekaman data sumur (X7) memperoleh nilai tertinggi di antara kelompok ini, yaitu 0,640, atau hanya terpaut 0,010 dari nilai threshold. Selanjutnya, ketidakpastian sumber panas (X3), pemilihan lokasi pengeboran (X5), dan survei mikro-seismik (X9) masing-masing memperoleh nilai 0,620. Kelayakan sumber panas (X2) dan penentuan posisi pengeboran (X6) masing-masing memperoleh nilai 0,600, diikuti rekahan buatan (X8) sebesar 0,580, teknologi eksplorasi (X11) sebesar 0,560, teknologi pelacakan (X10) sebesar 0,540, dan optimasi teknologi tepat guna (X12) sebesar 0,500.

Hasil tersebut tidak berarti bahwa sepuluh variabel tersebut tidak relevan terhadap kegiatan eksplorasi. Klasifikasi “tidak penting” dalam penelitian ini hanya menunjukkan bahwa nilai agregat penilaian ahli belum mencapai threshold yang digunakan untuk menentukan hambatan prioritas. Hal ini penting untuk dibedakan karena beberapa faktor yang berada di bawah threshold tetap memiliki hubungan langsung dengan risiko eksplorasi.

Sebagai contoh, X7 memiliki nilai crisp 0,640 yang sangat dekat dengan threshold 0,65. Oleh karena itu, perekaman data sumur tetap perlu diperhatikan meskipun secara formal tidak termasuk kelompok hambatan utama. Demikian pula dengan X3 dan X5 yang berkaitan dengan ketidakpastian sumber daya dan pemilihan lokasi pengeboran. Literatur menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam penemuan sumber daya dan risiko pengeboran merupakan komponen penting dalam risiko teknis pengembangan panas bumi [12]. Dengan demikian, variabel yang tidak lolos threshold sebaiknya dipahami sebagai faktor dengan tingkat prioritas relatif lebih rendah berdasarkan konsensus panel, bukan sebagai faktor yang dapat diabaikan sepenuhnya.

Perbedaan nilai antarvariabel juga menunjukkan adanya kecenderungan bahwa panel ahli lebih memprioritaskan persoalan yang berkaitan dengan keputusan kelanjutan proyek dan kualitas proses eksplorasi dibandingkan penggunaan teknologi tertentu. Teknologi pelacakan (X10), teknologi eksplorasi (X11), dan optimasi teknologi tepat guna (X12), misalnya, memperoleh nilai yang relatif lebih rendah. Hasil ini dapat mengindikasikan bahwa teknologi dipandang sebagai instrumen pendukung, sedangkan keputusan mengenai kelanjutan proses dan ketepatan metode merupakan persoalan yang lebih mendasar dalam menentukan keberhasilan eksplorasi.

Implikasi Hasil Penelitian

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa prioritas mitigasi hambatan eksplorasi panas bumi di Indonesia perlu difokuskan pada dua aspek utama, yaitu kepastian kelanjutan proses dan ketepatan metode eksplorasi. Kedua faktor tersebut memiliki hubungan yang erat. Metode eksplorasi yang tepat dapat menghasilkan data permukaan yang lebih kredibel, sedangkan kualitas data yang lebih baik dapat mengurangi ketidakpastian dalam pengambilan keputusan untuk melanjutkan investasi.

Hubungan tersebut sesuai dengan penelitian terdahulu yang menekankan pentingnya pengumpulan data hulu dalam mengurangi risiko pengembangan panas bumi Indonesia [1]. Selain itu, penggunaan metode eksplorasi yang tepat dan integrasi data geosains dapat meningkatkan pemahaman terhadap reservoir serta mengurangi risiko dalam menentukan target pengeboran [15]. Dengan demikian, peningkatan kualitas eksplorasi dapat dipandang sebagai salah satu prasyarat untuk meningkatkan keyakinan pengembang dalam melanjutkan proyek.

Bagi pengembang, hasil penelitian ini menunjukkan perlunya peningkatan kualitas perencanaan eksplorasi, integrasi data geologi, geokimia, dan geofisika, serta evaluasi hasil eksplorasi secara sistematis sebelum keputusan pengeboran dan investasi lanjutan dilakukan. Bagi pemerintah, dukungan terhadap penyediaan data eksplorasi yang kredibel dan mekanisme de-risking dapat membantu mengurangi beban risiko pada tahap awal pengembangan. Strategi pengurangan risiko tersebut menjadi penting karena tingginya risiko eksplorasi dan kebutuhan modal merupakan hambatan yang masih ditemukan dalam pengembangan panas bumi [12], [4].

Temuan penelitian juga memberikan kontribusi metodologis dengan menunjukkan bahwa Grey Delphi dapat digunakan untuk menyaring sejumlah hambatan potensial berdasarkan ketidakpastian penilaian ahli. Dari dua belas hambatan awal, metode ini menghasilkan dua hambatan prioritas, yaitu kelanjutan proses dan metode eksplorasi. Hasil tersebut memberikan

fokus yang lebih spesifik bagi pengambil keputusan sehingga upaya mitigasi dapat diarahkan terlebih dahulu pada faktor yang memperoleh tingkat kepentingan tertinggi berdasarkan konsensus panel ahli.

Analisis Sensitivitas

Untuk menguji robustitas hasil, dilakukan dua jenis analisis sensitivitas.

Sensitivitas threshold. Pada $\lambda = 0,60$, delapan variabel lolos (X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X9). Pada $\lambda = 0,65$ dan $\lambda = 0,70$, hanya X1 dan X4 yang tetap lolos. Dengan demikian, pemilihan threshold 0,65 menghasilkan daftar prioritas yang lebih fokus dan stabil terhadap kenaikan threshold hingga 0,70. X7 (0,640) hanya masuk jika threshold diturunkan ke 0,60, sehingga statusnya sebagai “hampir prioritas” perlu diperhatikan dalam praktik, meskipun secara formal tidak lolos pada baseline.

Sensitivitas koefisien whitening (α). Pada $\alpha = 0,4$; 0,5; dan 0,6, ranking dua teratas tetap X1 kemudian X4. Nilai crisp berubah secara proporsional, tetapi urutan prioritas tidak berubah. Hal ini mengonfirmasi bahwa kesimpulan utama penelitian robust terhadap variasi bobot lower/upper dalam rentang yang wajar.

Tabel 5. Sensitivitas crisp value terhadap α

Hambatan	$\alpha = 0,4$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,6$
X1 Kelanjutan proses	0,700	0,720	0,740
X4 Metode eksplorasi	0,680	0,700	0,720
X7 Perekaman data sumur	0,620	0,640	0,660

Simpulan

Penelitian ini dapat mengidentifikasi dan memprioritaskan hambatan utama dalam eksplorasi panas bumi di Indonesia menggunakan metode Grey Delphi. Berdasarkan penilaian panel ahli terhadap dua belas variabel hambatan dan nilai threshold sebesar 0,65, diperoleh dua hambatan yang memenuhi kriteria sebagai hambatan utama, yaitu kelanjutan proses (X1) dengan nilai crisp sebesar 0,720 dan metode eksplorasi (X4) dengan nilai crisp sebesar 0,700. Kelanjutan proses menjadi hambatan dengan nilai tertinggi, yang menunjukkan bahwa kepastian untuk melanjutkan proses setelah diperolehnya data awal eksplorasi merupakan faktor yang paling diprioritaskan oleh panel ahli. Sementara itu, terpilihnya metode eksplorasi menunjukkan bahwa ketepatan pemilihan dan penerapan metode dalam memperoleh serta menginterpretasikan informasi bawah permukaan merupakan faktor penting dalam mengurangi ketidakpastian eksplorasi dan risiko pengeboran.

Sepuluh variabel lainnya memperoleh nilai crisp di bawah threshold, yaitu kelayakan sumber panas (0,600), ketidakpastian sumber panas (0,620), pemilihan lokasi pengeboran (0,620), penentuan posisi pengeboran (0,600), perekaman data sumur (0,640), rekahan buatan (0,580), survei mikro-seismik (0,620), teknologi pelacakan (0,540), teknologi eksplorasi (0,560), dan optimasi teknologi tepat guna (0,500). Hasil tersebut tidak menunjukkan bahwa variabel tersebut tidak relevan dalam kegiatan eksplorasi, tetapi menunjukkan bahwa berdasarkan konsensus panel ahli, tingkat prioritasnya lebih rendah dibandingkan dengan kelanjutan proses dan metode eksplorasi. Perekaman data sumur dengan nilai crisp 0,640 merupakan variabel yang paling dekat dengan threshold sehingga tetap perlu mendapatkan perhatian dalam kegiatan eksplorasi.

Temuan penelitian menunjukkan bahwa upaya mitigasi hambatan eksplorasi panas bumi perlu diprioritaskan pada peningkatan kepastian kelanjutan proses dan ketepatan metode eksplorasi. Pengembang perlu memperkuat kualitas dan integrasi data geologi, geokimia, dan geofisika sehingga hasil eksplorasi dapat menjadi dasar yang lebih kredibel dalam menentukan target pengeboran dan keputusan investasi lanjutan. Dari sisi kebijakan, dukungan terhadap penyediaan data eksplorasi yang berkualitas dan mekanisme de-risking pada tahap awal pengembangan diperlukan untuk mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keberlanjutan proyek panas bumi.

Daftar Pustaka

- [1] S. W. Yudha, B. Tjahjono, and P. Longhurst, “Unearthing the Dynamics of Indonesia’s Geothermal Energy Development,” *Energies*, 2022, doi: 10.3390/en15145009.
- [2] Y. Dhaniswara, F. F., and M. Dachyar, “Project Financing Strategy and Financial Feasibility for Geothermal Development Project in Lumut Balai, South Sumatera,” in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2022. doi: 10.46254/af03.20220155.
- [3] D. Purba, D. Adityatama, M. Umam, and F. Muhammad, “Key Considerations in Developing Strategy for Geothermal Exploration Drilling Project in Indonesia,” 2019, [Online]. Available: <https://consensus.app/papers/key-considerations-in-developing-strategy-for-geothermal-purba-adityatama/3d8ba830c40c52fb927688078d850396/>
- [4] M. Dewi, A. Setiawan, and Y. Latief, *Developing a Sustainable Financing Model for Geothermal*

- Projects: A Conceptual Framework*. 2020. doi: 10.1145/3400934.3400999.
- [5] F. Schölderle *et al.*, “Monitoring cold water injections for reservoir characterization using a permanent fiber optic installation in a geothermal production well in the Southern German Molasse Basin,” *Geotherm. Energy*, vol. 9, pp. 1–36, 2021, doi: 10.1186/s40517-021-00204-0.
 - [6] K. Fan and S.-W. Nam, “Accelerating Geothermal Development in Indonesia: A Case Study in the Underutilization of Geothermal Energy,” *Cons. J. Sustain. Dev.*, vol. 19, pp. 103–129, 2020, doi: 10.7916/consilience.v0i19.3895.
 - [7] T. Tharom and H. S. Hadi, “Identifying Geothermal Power Plant Institutional Barrier and External Factors in Indonesia,” pp. 51–60, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-4481-1_6.
 - [8] K. Fan, “Accelerating Geothermal Development in Indonesia,” 2018, [Online]. Available: <https://consensus.app/papers/accelerating-geothermal-development-in-indonesia-fan/7e4d4074ecfe5cd5beb4ea5883871be4/>
 - [9] Mairizal, G. A. Pratama, Y. Maulana, and S. Nurmutia, “Modeling the Causal Relationships Among Barriers to Geothermal Power Plant Investment in Indonesia: A Fuzzy Delphi and DEMATEL Approach,” *Unconv. Resour.*, 2026, doi: 10.1016/j.unres.2026.100327.
 - [10] H. H. Rahmawanti and A. Meliala, “Legal Policy Impact on Indonesia’s Geothermal Industry Development: FDI Cooperation and NDC,” *J. Law, Polit. Humanit.*, 2024, doi: 10.38035/jlph.v4i4.387.
 - [11] J. Schifano and M. Niederberger, “How Delphi studies in the health sciences find consensus: a scoping review,” *Syst. Rev.*, vol. 14, 2025, doi: 10.1186/s13643-024-02738-3.
 - [12] P.-H. Liu and J.-C. Lin, “Integrated risk assessment and mitigation strategies for geothermal energy development: technical, socio-political, and financial dimensions,” *Sustain. Energy Res.*, vol. 12, 2025, doi: 10.1186/s40807-025-00218-3.
 - [13] A. H. Wibawa, M. Zainuddin, R. Zakaria, M. Yasin, and P. Malaysia, “Risk Factors In Life Cycle Phases Of Indonesia Geothermal Power Plants Project,” *Plan. MALAYSIA*, 2025, doi: 10.21837/pm.v23i38.1795.
 - [14] S. Nur, B. Burton, and A. Bergmann, “Evidence on Optimal Risk Allocation Models for Indonesian Geothermal Projects Under PPP Contracts,” *SSRN Electron. J.*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.3991872.
 - [15] M. Maryadi, M. Fajar, and J. Rohman, “The role of magnetotelluric method in geothermal exploration in Indonesia,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2026. doi: 10.1088/1742-6596/3238/1/012039.