

Penilaian Risiko dan Alokasi Modal pada Investasi Proyek Tambang di Bawah Ketidakpastian: Peran Simulasi Monte Carlo

Risk Assessment and Capital Allocation in Mining Project Investments under Uncertainty: The Role of Monte Carlo Simulation

Fredy Mukti*, Riam Marlina

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

Jalan Prof. Dr. Hamka, Air Tawar, Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia

Email: ^{1,*}edy07mukti@gmail.com, ²riammarlina@ft.unp.ac.id

Email Penulis Korespondensi: edy07mukti@gmail.com

Received: 07/07/2026, Revised: 10/10/2026, Accepted: 11/10/2026, Published: 13/10/2026

Abstrak—Valuasi proyek tambang bertumpu pada banyak variabel tidak pasti yang saling memengaruhi, mulai dari harga komoditas, nilai tukar, biaya kapital dan operasi, kadar serta perolehan bijih, hingga ketentuan fiskal dan tingkat diskonto. Analisis arus kas terdiskonto deterministik berguna sebagai dasar, tetapi memberi sedikit informasi tentang peluang dan keparahan kerugian sehingga lemah sebagai landasan keputusan alokasi modal. Tinjauan ini menempatkan simulasi Monte Carlo sebagai metode penilaian investasi probabilistik. Metode penelitian yang digunakan adalah tinjauan pustaka sistematis berpanduan PRISMA 2020 dengan penyaringan dua tahap dan sintesis tematik atas studi yang lolos kriteria kelayakan. Tiga sumber pencarian dipakai, yaitu Publish or Perish, ScienceDirect, dan ResearchRabbit, dengan seluruh rekaman dikelola di Rayyan. Dari 6.834 rekaman awal, proses penyaringan dua tahap berbasis judul, abstrak, kata kunci, dan metadata, yang dilanjutkan dengan verifikasi teks penuh terhadap studi potensial, menghasilkan 67 studi dalam korpus akhir, terdiri atas 52 studi valuasi tambang langsung dan 15 studi pendukung metodologis. Sintesis memperlihatkan simulasi Monte Carlo memindahkan dasar keputusan dari satu nilai titik menjadi distribusi nilai proyek beserta metrik risiko penurunan seperti probabilitas rugi, *value-at-risk*, dan *conditional value-at-risk*. Tinjauan menghasilkan taksonomi delapan keluarga metode valuasi, pemetaan faktor risiko terhadap metrik keputusan, dan kritik atas penyederhanaan dependensi yang dapat membuat risiko penurunan tampak terlalu optimistik.

Kata Kunci: Valuasi Proyek Tambang; Simulasi Monte Carlo; Penilaian Investasi; Risiko Penurunan; Real Options

Abstract—Mining project valuation rests on many interacting uncertain variables, from commodity prices, exchange rates, capital and operating costs, ore grade and recovery, to fiscal terms and the discount rate. Deterministic discounted cash flow analysis is useful as a baseline but offers little information about the probability and severity of loss, which weakens it as a basis for capital allocation decisions. This review positions Monte Carlo simulation as a probabilistic investment appraisal method. The research method is a systematic literature review guided by PRISMA 2020, combining two-stage screening with thematic synthesis of eligible studies. Three search sources were used, namely Publish or Perish, ScienceDirect, and ResearchRabbit, with all records managed in Rayyan. From 6,834 initial records, a two-stage title, abstract, keyword, and metadata screening process followed by full-text verification of potentially eligible studies retained 67 studies, comprising 52 direct mining valuation studies and 15 methodological support studies. The synthesis shows that Monte Carlo simulation moves the basis of decision from a single point value to a distribution of project value together with downside risk metrics such as probability of loss, value-at-risk, and conditional value-at-risk. The review delivers a taxonomy of eight valuation method families mapped to investment decision contexts, a mapping of risk drivers to decision metrics, and a critique of simplified dependency assumptions that may make downside risk estimates too optimistic.

Keywords: Mining Project Valuation; Monte Carlo Simulation; Investment Appraisal; Downside Risk; Real Options

How to Cite: Mukti, F., & Marlina, R. (2026). Penilaian Risiko dan Alokasi Modal pada Investasi Proyek Tambang di Bawah Ketidakpastian: Peran Simulasi Monte Carlo. *Journal of Business and Economics Research (JBE)*, 7(3), 816-827. <https://doi.org/10.47065/jbe.v7i3.10644>

1. PENDAHULUAN

Sebuah tambang dinilai jauh sebelum sebagian besar variabel penentunya diketahui pasti. Pada tahap keputusan investasi, analis bekerja dengan informasi pengeboran yang belum lengkap, estimasi biaya yang bisa bergeser, jadwal produksi yang rentan terganggu, dan variabel pasar di luar kendali operator. Padahal keputusan yang diambil berskala besar dan nyaris tak terbalikkan. Modal yang ditanam pada pembukaan tambang sulit ditarik kembali bila proyek ternyata merugi, sehingga kualitas penilaian di tahap awal ikut menentukan apakah modal teralokasi pada proyek yang tepat. Sejumlah kajian tentang estimasi biaya kapital dan penilaian proyek mineral memperlihatkan mengapa penilaian deterministik saja menjadi dasar yang lemah untuk keputusan investasi yang sadar risiko (Cardozo, Petter, & Albuquerque, 2022 ;Faúndez & Guzmán, 2025)

Analisis arus kas terdiskonto tetap menjadi titik awal yang lazim karena transparan dan mudah dikomunikasikan kepada pemberi modal. Kelemahannya muncul ketika variabel tidak pasti diringkas menjadi nilai tunggal. Analisis kasus dasar tidak memperlihatkan seberapa sering nilai proyek bisa jatuh di bawah nol, seberapa dalam ekor kerugiannya, dan bagaimana harga, biaya, kadar, nilai tukar, perolehan, serta asumsi tingkat diskonto bergerak bersama. Simulasi Monte Carlo menjawab celah ini dengan mengambil sampel berulang dari input tidak pasti, melewatkannya melalui model valuasi, lalu menghasilkan distribusi nilai bersih sekarang, tingkat pengembalian internal, probabilitas rugi, *value-at-risk*, dan *conditional value-at-risk* (Cardozo et al., 2022 ;Kamel, Elwageeh, Bondua, & Elkarmoty, 2023 ;Khodaeibabjan &

Ozturk, 2026) Dasar keputusan pun bergeser dari satu angka tunggal menjadi sebaran kemungkinan beserta ukuran risiko penurunannya. Dalam perspektif bisnis dan ekonomi, persoalan utama bukan hanya ketepatan estimasi nilai teknis proyek, melainkan kualitas keputusan *capital budgeting* di bawah ketidakpastian. Proyek tambang bersifat padat modal, berumur panjang, dan memiliki fleksibilitas keluar yang terbatas, sehingga kesalahan estimasi risiko dapat mengunci modal pada aset yang tidak efisien. Karena itu, *investment appraisal* perlu menjawab tiga pertanyaan yang lebih luas daripada sekadar apakah NPV bernilai positif, yaitu berapa probabilitas kerugian, seberapa besar potensi kerugian ekstrem, dan apakah profil risiko proyek masih sesuai dengan batas toleransi risiko investor atau perusahaan. Bingkai ini menempatkan simulasi Monte Carlo sebagai alat *financial risk assessment* dan *capital allocation*, bukan sekadar teknik numerik dalam studi kelayakan tambang.

Literatur tidak memperlakukan metode ini secara seragam. Pada sebagian studi, simulasi hanya rutin sederhana di sekeliling model DCF deterministik. Pada studi lain, ia terikat pada DCF stokastik, *real options*, pemodelan dependensi berbasis *copula*, simulasi geostatistik, perencanaan tambang stokastik, pohon keputusan, atau pohon binomial (Kamel et al., 2023; Chandra & Hartley, 2024; Hozman, Tichý, & Dvořáková, 2024). Pada kelompok lain lagi, metode *fuzzy*, interval, sistem grey, dan optimasi robust hadir sebagai alternatif atau pembanding ketika data probabilitas lemah (Stanujkic, Fedajev, & Santos, 2023). Sebaran ini melintasi teknik pertambangan, geostatistik, ekonomi sumber daya, dan keuangan terapan. Akibatnya seorang analis investasi dapat menemukan banyak studi kasus tetapi tidak selalu memperoleh alasan jelas untuk memilih satu pendekatan penilaian di atas yang lain. Pertanyaannya menjadi praktis: metode mana untuk konteks keputusan yang mana.

Bagi sektor mineral Indonesia, persoalan ini bukan latihan akademik belaka. Investasi batubara dan mineral menyumbang porsi besar dalam pembentukan modal, sementara harga komoditas, nilai tukar rupiah, dan kebijakan fiskal termasuk harga karbon bergerak dengan volatilitas tinggi. Kajian terbaru atas proyek batubara di Indonesia memperlihatkan bagaimana fleksibilitas dan ketidakpastian pasar mengubah kelayakan ekonomi proyek ketika dinilai dengan pendekatan *real options* (Trijayanto & Hakam, 2025). Penilaian yang mengabaikan sebaran risiko berpotensi menuntun keputusan alokasi modal ke arah yang keliru, baik dengan menolak proyek yang sebenarnya layak maupun menerima proyek yang risikonya tersembunyi.

Penelitian terdahulu telah menyentuh persoalan ini dari beberapa arah. (Kamel et al., 2023) membandingkan simulasi Monte Carlo dengan pohon binomial pada satu kasus tambang fosfat, (Chandra & Hartley, 2024) mengembangkan *real options* bervolatilitas majemuk untuk proyek batubara bertahap, sedangkan (Fathollahzadeh, Asad, Mardaneh, & Cigla, 2021) meninjau metode penjadwalan produksi tambang terbuka dari sisi optimasi. Studi-studi tersebut kuat pada wilayahnya masing-masing, tetapi berhenti pada kasus tunggal atau klasifikasi metode tanpa menaunkannya ke pertanyaan keputusan investasi yang konkret. Belum banyak yang menyusun keluarga metode valuasi probabilistik ke dalam satu peta pemilihan yang dapat dipakai analis untuk mencocokkan struktur ketidakpastian proyek dengan metode dan tindakan, terlebih dengan menyoroti relevansinya bagi sektor mineral Indonesia. Kesenjangan inilah yang ditutup tinjauan ini. Kebaruannya terletak pada pemindahan bingkai dari deskripsi metode menjadi logika keputusan investasi, serta pada penegasan bahwa kelemahan pemodelan dependensi bukan persoalan teknis semata, melainkan sumber bias yang langsung memengaruhi keputusan alokasi modal.

Tinjauan ini menempatkan simulasi Monte Carlo sebagai metode penilaian investasi probabilistik, bukan sekadar teknik tambahan pada lembar kerja. Penilaian dipandang sebagai bagian dari proses alokasi modal yang dimulai dari penyiapan data dan asumsi, bergerak melalui pemodelan stokastik dan eksekusi simulasi, lalu berakhir pada interpretasi hasil untuk keputusan terima, tunda, atau tolak. Sintesis disusun lewat tinjauan sistematis berpanduan PRISMA 2020 (Page et al., 2021) yang mencakup 67 studi, terdiri atas 52 studi valuasi tambang langsung dan 15 studi pendukung metodologis. Kontribusinya ada tiga. Pertama, taksonomi ringkas metode valuasi yang dipetakan ke konteks keputusan investasi. Kedua, pemetaan faktor risiko yang menggerakkan nilai proyek beserta metrik yang menuntun keputusan. Ketiga, catatan kelemahan praktik, terutama pemodelan dependensi yang disederhanakan, yang membuat estimasi risiko penurunan kerap terlalu optimistis dan keputusan modal menjadi rentan.

Tujuan penelitian ini adalah memetakan keluarga metode valuasi probabilistik berbasis simulasi Monte Carlo ke konteks keputusan investasi tambang, mengidentifikasi faktor risiko beserta metrik keputusan yang menyertainya, dan menelaah kelemahan praktik penilaian yang membuat keputusan alokasi modal rentan keliru. Empat pertanyaan penelitian menuntun tinjauan ini. RQ1 menanyakan bagaimana penilaian berbasis simulasi mengubah keputusan investasi tambang dibanding DCF deterministik. RQ2 memetakan keluarga metode valuasi dan pembandingnya ke konteks keputusan investasi yang sesuai. RQ3 mengidentifikasi faktor risiko yang paling sering dimodelkan dan metrik keluaran yang menuntun keputusan. RQ4 menelaah kelemahan praktik penilaian yang membuat keputusan alokasi modal rentan keliru.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Protokol Tinjauan dan Strategi Pencarian

Penelitian ini termasuk penelitian kualitatif dengan desain tinjauan pustaka sistematis (*systematic literature review*) berpanduan PRISMA 2020. Data penelitian berupa artikel ilmiah dan dokumen metodologis yang dihimpun dari tiga sumber pencarian, disaring dalam dua tahap, lalu dianalisis secara tematik menurut keluarga metode valuasi, faktor risiko, dan metrik keputusan. PRISMA dipakai untuk menata identifikasi, pembuangan duplikat, penyaringan, penilaian kelayakan, dan pelaporan inklusi (Page et al., 2021). Protokol dibangun di sekitar empat pertanyaan penelitian pada Tabel

1 yang menautkan pola penerapan simulasi dengan pemilihan metode, faktor risiko, metrik keputusan, dan kelemahan praktik penilaian.

Tabel 1. Pertanyaan Penelitian

Kode	Pertanyaan Penelitian
RQ1	Bagaimana penilaian berbasis simulasi mengubah keputusan investasi tambang dibanding DCF deterministik?
RQ2	Keluarga metode valuasi dan pembandingan apa yang muncul dalam korpus, dan ke konteks keputusan investasi mana masing-masing cocok?
RQ3	Faktor risiko dan metrik keluaran apa yang paling sering dimodelkan untuk menuntun keputusan?
RQ4	Kelemahan praktik penilaian apa yang membuat keputusan alokasi modal rentan keliru?

2.2 Kriteria Kelayakan dan Protokol Ekstraksi Data

Pengambilan rekaman bersandar pada tiga sumber yang dipilih karena sifat cakupannya berbeda. Publish or Perish menjadi pintu masuk karena memanen rekaman terindeks Google Scholar dalam jumlah besar, termasuk literatur kelabu yang tidak selalu terindeks basis data formal. ScienceDirect melengkapinya dengan akses langsung ke basis data penerbit untuk konten jurnal yang melewati telaah sejawat. ResearchRabbit dipakai terakhir untuk memperluas himpunan melalui penelusuran jaringan sitasi dari makalah yang sudah dipastikan relevan. Seluruh rekaman diekspor dan diimpor ke Rayyan untuk deteksi duplikat, pengelolaan penyaringan, dan dokumentasi keputusan inklusi serta eksklusi.

Rekaman dari ResearchRabbit tidak otomatis dimasukkan. Semuanya disaring dengan kriteria kelayakan yang sama, dan hanya dipertahankan bila langsung membahas valuasi proyek tambang atau menyediakan dukungan metodologis bagi pemodelan ketidakpastian dalam penilaian investasi. Himpunan kueri memadukan ungkapan domain tambang dan istilah metode. Ungkapan domain menysar jenis proyek dan konteks investasi, seperti valuasi proyek tambang, investasi tambang, risiko proyek tambang, tambang terbuka, tambang bawah tanah, proyek batubara, proyek mineral, perencanaan tambang, studi kelayakan, dan *real options* pada pertambangan. Istilah metode menysar jenis pendekatan, seperti simulasi Monte Carlo, simulasi stokastik, valuasi probabilistik, DCF stokastik, *copula*, pohon keputusan, pohon binomial, optimasi stokastik, optimasi *robust*, dan model *fuzzy*. Penyusunan kumpulan data dirampungkan pada Juni 2026, dan Scopus, Web of Science, MDPI, Google Scholar, serta laman penerbit kemudian dipakai untuk verifikasi metadata dan pengambilan teks penuh.

Untuk menjaga keterlacakan strategi pencarian, setiap sumber dijalankan dengan kombinasi istilah yang merepresentasikan domain, metode, dan keluaran keputusan. Kelompok domain mencakup *mining project valuation*, *mine investment*, *mineral project evaluation*, *coal project valuation*, *open-pit mining*, *underground mining*, dan padanan Indonesia seperti valuasi proyek tambang, investasi tambang, serta penilaian proyek mineral. Kelompok metode mencakup *Monte Carlo simulation*, *stochastic discounted cash flow*, *probabilistic valuation*, *real options*, *copula*, *stochastic mine planning*, *decision tree*, *binomial tree*, *fuzzy*, *grey*, dan *robust optimization*. Kelompok keluaran mencakup NPV, IRR, *probability of loss*, *value-at-risk*, *conditional value-at-risk*, *cash-flow-at-risk*, *option value*, dan *capital budgeting*. Kombinasi kueri tidak dibatasi hanya pada frasa persis karena istilah valuasi tambang sering berbeda antarjurnal; namun keputusan inklusi selalu dikembalikan pada kriteria domain, metode, dan keluaran pada Tabel 2. Strategi ini dipilih untuk menekan risiko kehilangan studi relevan yang memakai istilah berbeda, sambil tetap membatasi korpus agar tidak melebar ke simulasi teknik tambang yang tidak menghasilkan metrik keputusan investasi.

Rincian sumber pencarian, pengodean studi, matriks sintesis, dan penilaian kualitas disediakan dalam materi tambahan, sedangkan kombinasi kueri utama diringkas dalam bagian metode sehingga pembaca tetap dapat menelusuri hubungan antara strategi pencarian, keputusan inklusi, dan sintesis metode tanpa menganggap lampiran sebagai log kueri lengkap per basis data.

Ambang kelayakan ditentukan oleh relevansi terhadap penilaian investasi, bukan domain semata. Sebuah makalah memenuhi kriteria pertama bila menerapkan simulasi Monte Carlo atau metode ketidakpastian sebanding pada valuasi tambang, mineral, batubara, atau perencanaan tambang, dan melaporkan keluaran yang relevan bagi penilaian. Makalah yang tidak meneliti kasus tambang langsung tetap dapat lolos lewat kriteria kedua bila menawarkan dukungan metodologis yang dapat dialihkan ke valuasi proyek tambang, khususnya *real options*, pemodelan *copula* atau korelasi, optimasi stokastik, pendekatan pohon keputusan atau pohon binomial, dan logika keputusan investasi. Kriteria lengkap dirangkum pada Tabel 2.

Dalam sintesis ini, D1 didefinisikan sebagai studi yang secara langsung menilai proyek tambang atau aset mineral dengan keluaran valuasi investasi, sedangkan D2 didefinisikan sebagai studi pendukung yang tidak selalu melakukan valuasi proyek langsung tetapi menyediakan perangkat metodologis yang relevan untuk pemodelan ketidakpastian, fleksibilitas, atau risiko dalam keputusan investasi tambang.

Tabel 2. Kriteria Seleksi Studi

Dimensi	Kriteria
Metode	Memakai simulasi Monte Carlo, simulasi stokastik, DCF stokastik, valuasi probabilistik, atau pemodelan ketidakpastian terkait sebagai metode utama

Dimensi	Kriteria
Domain	Tambang, sumber daya mineral, batubara, tambang terbuka atau bawah tanah, perencanaan tambang, atau investasi proyek mineral
Keluaran	Menghasilkan NPV, IRR, nilai opsi, P(rugi), VaR, CVaR, waktu investasi, atau peringkat proyek
Pendukung metode	Studi non-tambang dengan metodologi yang dapat dialihkan: <i>real options</i> , pemodelan <i>copula</i> , optimasi stokastik, model <i>fuzzy</i> , <i>grey</i> , atau <i>robust</i> , dan logika keputusan investasi
Eksklusi	Simulasi hanya sebagai latar; domain migas, energi, atau lingkungan tanpa keluaran yang dapat dialihkan; atau teks penuh tidak terverifikasi setelah semua jalur akses ditempuh

Kualitas studi dinilai secara kualitatif untuk memastikan bahwa korpus tidak hanya relevan secara topik, tetapi juga memadai untuk sintesis keputusan investasi. Penilaian dilakukan dengan memeriksa lima aspek, yaitu kesesuaian domain terhadap valuasi proyek tambang atau metode yang dapat dialihkan, kejelasan model valuasi yang digunakan, transparansi asumsi distribusi input stokastik, perlakuan terhadap korelasi atau dependensi antarvariabel, dan kejelasan metrik keluaran yang dipakai untuk mendukung keputusan. Studi tidak diberi skor numerik karena tujuan tinjauan ini bukan meta-analisis kuantitatif, melainkan sintesis metodologis. Namun, studi dengan informasi metode yang terlalu kabur, keluaran valuasi yang tidak dapat ditelusuri, atau hubungan yang lemah dengan keputusan investasi tidak dipertahankan dalam korpus akhir.

Protokol ekstraksi data diarahkan untuk mengode setiap studi menurut keluarga metode valuasi, domain tambang atau komoditas, jenis ketidakpastian, input stokastik, perlakuan dependensi, metrik keluaran, dan relevansi terhadap pertanyaan penelitian. Pengodean dilakukan pada tingkat studi, bukan pada tingkat responden atau observasi proyek, karena unit analisis tinjauan ini adalah artikel ilmiah dan dokumen metodologis. Apabila sebuah studi memuat lebih dari satu pendekatan, metode utama ditentukan dari fungsi valuasi yang dipakai untuk menghasilkan keputusan, sedangkan metode pendukung dicatat sebagai pembanding. Perbedaan ini penting agar studi yang sekadar memakai simulasi untuk sensitivitas teknis tidak disamakan dengan studi yang benar-benar memakai simulasi untuk penilaian investasi. Dengan cara tersebut, sintesis dapat menautkan bukti metodologis ke keputusan bisnis yang spesifik, seperti penerimaan proyek, penundaan investasi, pemilihan waktu masuk, lindung nilai, perluasan kapasitas, atau penghentian proyek.

Karena tujuan penelitian adalah sintesis metodologis, hasil ekstraksi tidak digabungkan melalui meta-analisis statistik. Perbedaan komoditas, skala proyek, struktur pajak, horizon tambang, jenis model harga, dan tingkat keterbukaan data membuat agregasi efek kuantitatif tidak sebanding. Sebagai gantinya, sintesis dilakukan secara tematik dengan menelusuri pola hubungan antara struktur ketidakpastian, keluarga metode, metrik keluaran, dan tindakan manajerial yang didukung. Pendekatan ini lebih sesuai untuk pertanyaan penelitian yang bersifat pemetaan metode dan logika keputusan, karena fokusnya bukan membuktikan satu ukuran efek tunggal, melainkan menjelaskan kapan suatu pendekatan valuasi menjadi lebih tepat dibanding pendekatan lain.

2.3 Hasil Penyaringan PRISMA

Setelah pengambilan dari ketiga sumber selesai, seluruh rekaman digabung ke dalam satu ruang kerja Rayyan. Rekapitulasi jumlah rekaman pada tiap tahap disajikan pada Tabel 3, sedangkan alur lengkap penyaringan digambarkan pada Gambar 1. Deteksi duplikat Rayyan menandai 3.034 kandidat duplikat, dan telaah manual memastikan 1.808 di antaranya sebagai duplikat sejati. Setelah duplikat dihapus, tersisa 5.026 rekaman untuk penyaringan tahap pertama berbasis judul dan abstrak, dengan 1.155 rekaman dikecualikan karena tidak sesuai dengan domain, metode, atau keluaran penilaian investasi. Sebanyak 3.871 rekaman yang tersisa kemudian masuk ke penyaringan relevansi tahap kedua berbasis judul, abstrak, kata kunci, dan metadata bibliografis. Pada tahap ini, rekaman yang hanya menyebut simulasi sebagai latar, tidak berkaitan dengan valuasi tambang, tidak menghasilkan metrik keputusan investasi, atau tidak menyediakan kontribusi metodologis yang dapat dialihkan dikeluarkan dari korpus. Verifikasi teks penuh kemudian dilakukan terhadap studi yang secara substantif berpotensi memenuhi kriteria inklusi. Setelah penyaringan relevansi tahap kedua dan verifikasi teks penuh terhadap kandidat potensial, 3.804 rekaman dikeluarkan dan 67 studi dipertahankan sebagai korpus sintesis akhir.

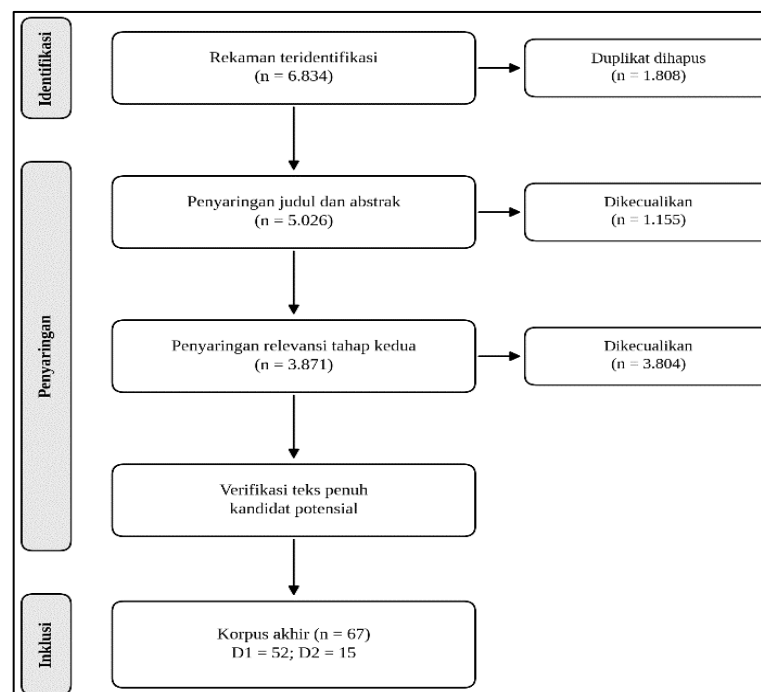
Dengan demikian, angka 3.871 tidak ditafsirkan sebagai jumlah artikel yang dibaca teks penuhnya, melainkan sebagai jumlah rekaman yang melewati penyaringan awal dan kemudian dipersempit melalui penyaringan relevansi tahap kedua sebelum verifikasi teks penuh terbatas pada kandidat potensial.

Jumlah kandidat yang diverifikasi melalui teks penuh tidak diperlakukan sebagai tahap PRISMA terpisah karena verifikasi dilakukan sebagai bagian dari konfirmasi akhir terhadap studi yang lolos penyaringan relevansi tahap kedua.

Tabel 3. Hasil Penyaringan PRISMA 2020

Tahap PRISMA	Jumlah
Rekaman teridentifikasi (Publish or Perish, ScienceDirect, ResearchRabbit)	6.834
Kemungkinan duplikat terdeteksi (Rayyan)	3.034
Duplikat dihapus setelah resolusi	1.808
Rekaman disaring (judul dan abstrak)	5.026

Tahap PRISMA	Jumlah
Dikecualikan pada judul dan abstrak	1.155
Rekaman masuk penyaringan relevansi tahap kedua	3.871
Dikecualikan setelah penyaringan relevansi tahap kedua dan verifikasi teks penuh kandidat	3.804
Studi masuk korpus akhir	67



Gambar 1. Diagram alir PRISMA 2020

2.4 Formulasi Valuasi Probabilistik

Inti penilaian dapat dinyatakan secara ringkas. Pada setiap iterasi, vektor input tidak pasti ditarik dari distribusi marginal dan struktur dependensinya, lalu dievaluasi melalui fungsi valuasi sehingga menghasilkan satu nilai proyek seperti pada Persamaan (1).

$$NPV_i = f(X_i), i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Komponen input mewakili variabel tidak pasti seperti harga komoditas, nilai tukar, kadar bijih, perolehan, belanja modal, biaya operasi, laju produksi, ukuran cadangan, tingkat diskonto, pajak, royalti, dan biaya penutupan. Setelah sejumlah iterasi, prosedur menghasilkan distribusi nilai bersih sekarang yang menggantikan estimasi titik tunggal. Dari distribusi itu, lapisan keputusan menurunkan besaran yang menentukan pertimbangan investasi, yakni nilai harapan, probabilitas rugi, *value-at-risk*, *conditional value-at-risk*, sebaran tingkat pengembalian internal, nilai opsi, dan peringkat keputusan. Ketika variabel yang merugikan berkorelasi tetapi disampel secara independen, model cenderung meremehkan risiko penurunan (Ardian & Kumral, 2021; Singh, Ardian, & Kumral, 2021). Persoalan dependensi inilah yang ditelusuri lebih jauh pada bagian hasil dan pembahasan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Sintesis Korpus

Korpus akhir memuat 67 studi. D1 berisi 52 studi yang langsung menilai investasi tambang dengan simulasi Monte Carlo atau metode valuasi stokastik terkait. D2 berisi 15 studi yang menopang pembacaan korpus melalui *real options*, optimasi stokastik, pohon keputusan, pohon binomial, pemodelan *fuzzy* atau *grey*, perencanaan tambang di bawah ketidakpastian, dan logika keputusan investasi. Tabel 4 menyajikan komposisi korpus dan pemetaannya ke empat pertanyaan penelitian.

Tabel 4. Komposisi Korpus dan Pemetaan RQ

Kelompok	Deskripsi	Jumlah	Cakupan RQ
D1	Studi valuasi tambang langsung dengan simulasi Monte Carlo atau metode stokastik terkait	52	RQ1-RQ4
D2	Studi pendukung (<i>real options</i> , <i>copula</i> , perencanaan tambang stokastik, pohon keputusan, <i>fuzzy/grey</i> , logika keputusan investasi)	15	RQ2, RQ3
Total	Korpus sintesis akhir	67	Semua

3.2 Pembahasan, Sintesis Lintas RQ, dan Implikasi Praktis

3.2.1 RQ1: Pergeseran Dasar Keputusan Investasi

Korpus menunjukkan simulasi Monte Carlo tidak dipakai sebagai satu metode baku tunggal, melainkan sebagai keluarga alur kerja penilaian. Bentuk paling langsung adalah MCS-DCF. Input tidak pasti disampel lalu dimasukkan ke model DCF, dan pendekatan ini cocok ketika keputusannya menilai rencana tambang tetap di bawah harga dan biaya yang tidak pasti (Cardozo et al., 2022; Markovic, Stevanovic, Kolonja, Slavkovic, & Krzanovic, 2025; Khodaeibabajan & Ozturk, 2026). Yang berubah bukan rumus arus kasnya, melainkan keluarannya. Dua makalah dapat sama-sama mengaku memakai simulasi Monte Carlo tetapi sebenarnya menjawab pertanyaan keputusan yang berbeda.

Implikasi langsung bagi *capital budgeting* adalah perubahan pertanyaan keputusan. Dalam DCF deterministik, proyek cenderung dinilai melalui satu angka NPV, IRR, atau *payback period*. Dalam simulasi Monte Carlo, pertanyaannya bergeser menjadi apakah nilai harapan proyek cukup besar untuk mengompensasi probabilitas kerugian dan kedalaman ekor risiko. Perubahan ini penting karena dua proyek dengan NPV harapan yang sama dapat memiliki profil risiko yang sangat berbeda. Satu proyek mungkin memiliki distribusi sempit dengan peluang rugi kecil, sedangkan proyek lain memiliki distribusi lebar dengan peluang kerugian ekstrem. Bagi investor dan manajemen, proyek kedua tidak dapat diperlakukan sama hanya karena nilai harapannya positif. Dengan demikian, simulasi Monte Carlo memperbaiki proses alokasi modal karena keputusan tidak lagi bergantung pada satu skenario pusat, tetapi pada profil probabilitas yang lebih lengkap.

Pergeseran terpenting bagi pengambil keputusan investasi adalah perpindahan dari nilai titik ke distribusi. DCF deterministik menjawab berapa nilai proyek, sedangkan penilaian probabilistik menjawab seberapa besar peluang proyek merugi dan seberapa dalam kerugiannya. Keluaran seperti probabilitas rugi, *value-at-risk*, dan *conditional value-at-risk* memberi pengambil keputusan dasar untuk menimbang proyek bukan hanya dari nilai harapannya, tetapi juga dari ekor risiko bawahnya. Di sinilah penilaian berbasis simulasi mengubah keputusan. Proyek dengan nilai harapan positif tetapi ekor kerugian dalam dapat terlihat berbeda begitu sebarannya diperhitungkan, dan dua proyek dengan nilai harapan setara bisa berakhir pada keputusan berlawanan ketika satu di antaranya menyimpan probabilitas rugi yang jauh lebih besar (Kamel et al., 2023; Hozman et al., 2024).

Dari sudut *financial risk management*, metrik seperti $P(NPV < 0)$, *value-at-risk*, *conditional value-at-risk*, dan *cash-flow-at-risk* memberi bahasa yang lebih operasional untuk mendefinisikan *risk appetite*. $P(NPV < 0)$ menunjukkan peluang proyek menghasilkan nilai negatif, sedangkan *value-at-risk* menunjukkan ambang kerugian pada tingkat keyakinan tertentu. *Conditional value-at-risk* lebih konservatif karena memperkirakan rata-rata kerugian ketika hasil telah masuk ke wilayah ekstrem. *Cash-flow-at-risk* berguna ketika perhatian utama bukan hanya nilai kini proyek, tetapi tekanan likuiditas pada periode operasi tertentu. Kombinasi metrik ini membantu manajemen membedakan proyek yang layak secara nilai harapan dari proyek yang layak secara risiko. Dalam konteks tambang, pemisahan ini krusial karena kerugian tidak selalu muncul sebagai penurunan NPV total saja, tetapi juga sebagai gangguan arus kas, pelanggaran *covenant* pembiayaan, atau kebutuhan modal tambahan di tengah siklus harga yang buruk.

3.2.2 RQ2: Taksonomi Metode Valuasi dan Konteks Keputusan Investasi

Korpus memperlihatkan delapan alur kerja penilaian yang dapat dibedakan, dirangkum pada Tabel 5. Tiap keluarga berbeda menurut jenis ketidakpastian yang ditangani, fungsi valuasi yang dipakai, dan tujuan keputusan yang didukung. Kolom konteks keputusan memetakan tiap keluarga ke pertanyaan investasi tertentu, dan di situlah nilai praktis taksonomi ini bagi analis.

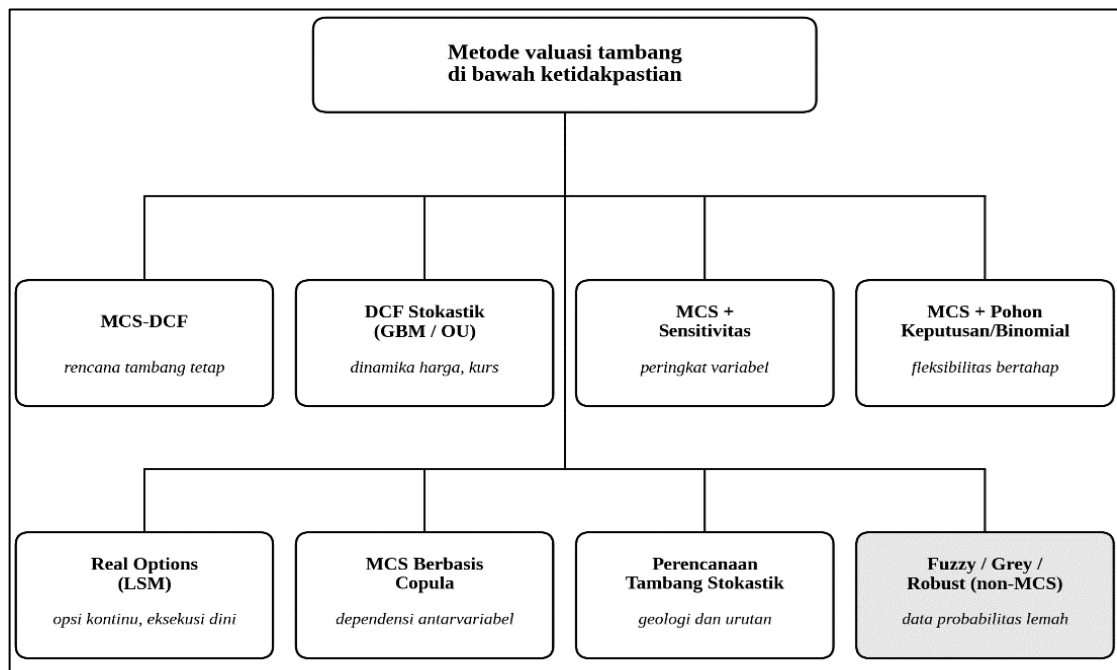
Tabel 5. Taksonomi Metode Valuasi dan Konteks Keputusan Investasi

Keluarga Metode	Logika Penilaian	Keputusan yang Sesuai	Rujukan
MCS-DCF	Input tidak pasti disampel acak, lalu model DCF diiterasi	Menerima atau menolak rencana tambang tetap tanpa fleksibilitas manajerial	(Cardozo et al., 2022; Khodaeibabajan & Ozturk, 2026)
DCF Stokastik	Harga, kurs, atau diskonto dimodelkan sebagai proses GBM atau Ornstein-Uhlenbeck	Dinamika deret waktu pasar menjadi penggerak utama nilai	(Hozman et al., 2024; (Trijayanto & Hakam, 2025)
MCS dan Analisis Sensitivitas	Kontribusi varians tiap input diperingkat	Identifikasi variabel dominan sebelum mitigasi risiko	(Cardozo et al., 2022; Faúndez & Guzmán, 2025
MCS dan Pohon Keputusan/Binomial	Keputusan bertahap dievaluasi atas keadaan diskret	Fleksibilitas manajerial berjenjang: tunggu, perluas, atau lepas	; Kamel et al., 2023; Chandra & Hartley, 2024)
<i>Real Options</i> (LSM)	Nilai kelanjutan diestimasi regresi <i>least-squares Monte Carlo</i>	Keadaan kontinu dengan opsi pelaksanaan dini	(Ahmadi & Bratvold, 2023)

Keluarga Metode	Logika Penilaian	Keputusan yang Sesuai	Rujukan
MCS Berbasis <i>Copula</i>	Dependensi dan ko-gerak ekor antarvariabel dimodelkan eksplisit	Faktor merugikan yang bergerak bersama, proyek multikomoditas	(Ardian & Kumral, 2021; Singh et al., 2021)
Perencanaan Tambang Stokastik	Simulasi geostatistik dipadukan dengan penjadwalan produksi	Tubuh bijih dan urutan penambangan menggerakkan nilai	(Fathollahzadeh et al., 2021; Armstrong et al., 2021)
Pembandingan Non-MCS	Model <i>fuzzy</i> , <i>grey</i> , interval, atau optimasi <i>robust</i>	Data probabilitas lemah atau distribusi input sulit dipertanggungjawabkan	(Yang et al., 2022; Stanujkic et al., 2023)

Taksonomi metode menunjukkan bahwa tidak ada satu pendekatan valuasi yang unggul untuk semua konteks. MCS-DCF paling efisien ketika rencana tambang relatif tetap dan keputusan utama adalah menerima atau menolak proyek berdasarkan distribusi NPV. DCF stokastik lebih tepat ketika harga, kurs, atau tingkat diskonto dipandang sebagai proses deret waktu. *Real options*, pohon keputusan, dan pohon binomial menjadi lebih relevan ketika manajemen masih memiliki fleksibilitas untuk menunda investasi, memperluas kapasitas, menghentikan proyek, melakukan *hedging*, atau mengumpulkan data tambahan sebelum komitmen modal penuh. *Copula* dan simulasi sadar-korelasi diperlukan ketika risiko pasar dan teknis bergerak bersama. Perencanaan tambang stokastik lebih tepat ketika ketidakpastian geologi dan urutan penambangan menggerakkan nilai. *Fuzzy*, *grey*, dan *robust modelling* menjadi pembandingan yang masuk akal ketika data probabilitas lemah atau distribusi input sulit dipertanggungjawabkan.

Keluarga kedua memodelkan harga, kurs, atau tingkat diskonto sebagai proses yang berkembang menurut waktu, umumnya gerak Brown geometrik atau proses Ornstein-Uhlenbeck (Hozman et al., 2024; Trijayanto & Hakam, 2025). Keluarga ketiga memasang simulasi dengan pohon keputusan atau pohon binomial, tepat ketika keputusan manajerial untuk menunggu, memperluas, atau melepas proyek masih terbuka (Kamel et al., 2023; Chandra & Hartley, 2024). Keluarga *copula* menangani dependensi dan ko-gerak ekor yang penting bagi proyek multikomoditas dan multivaluta (Ardian & Kumral, 2021; Singh et al., 2021), sedangkan keluarga perencanaan tambang stokastik menautkan simulasi ke ketidakpastian geologi dan urutan produksi (Fathollahzadeh et al., 2021; Lagos, Armstrong, Homem-de-Mello, Lagos, & Sauré, 2022; Armstrong et al., 2021). Gambar 2 meringkas taksonomi ini.



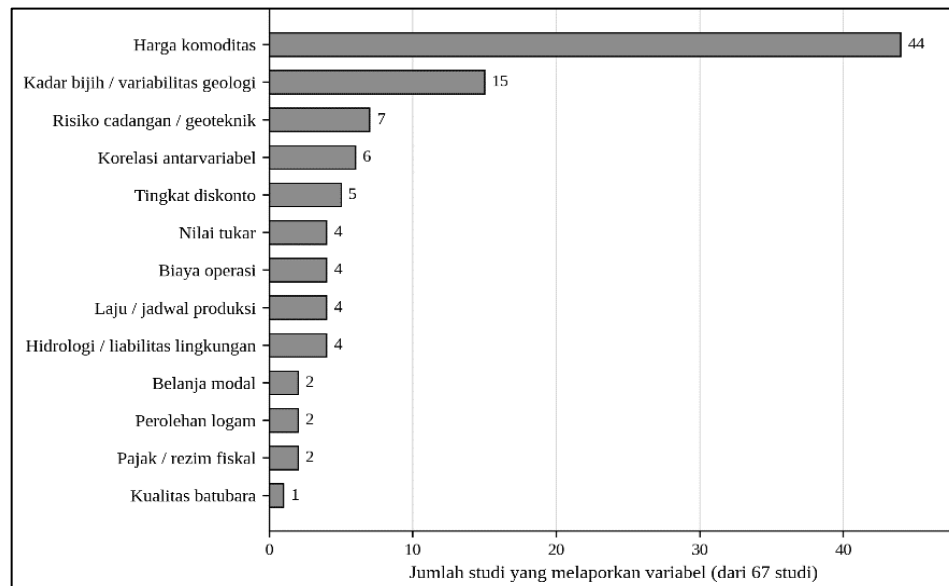
Gambar 2. Taksonomi ringkas metode valuasi dan pembandingan

3.2.3 RQ3: Faktor Risiko Penggerak Nilai dan Metrik Keputusan

Variabel yang paling konsisten muncul di korpus adalah harga komoditas, nilai tukar, biaya operasi, belanja modal, kadar bijih, perolehan, laju produksi, ukuran cadangan, tingkat diskonto, pajak, royalti, dan biaya penutupan. Harga mendominasi karena langsung menggerakkan pendapatan dan umumnya di luar kendali operator. Nilai tukar penting ketika pendapatan dan biaya berbeda mata uang. Belanja modal dan biaya operasi tetap sentral karena proyek tambang padat modal dan rentan eskalasi biaya (Faúndez & Guzmán, 2025; Kamel et al., 2023).

Variabel teknis membawa kondisi fisik tambang ke dalam model. Kadar, perolehan, ukuran cadangan, laju produksi, dilusi, kinerja metalurgi, dan kendala geoteknik memengaruhi kuantitas serta kualitas keluaran. Studi yang memadukan ketidakpastian geologi dengan perencanaan tambang menunjukkan sebaran nilai dapat berasal dari tubuh

bijih dan urutan penambangan, tidak hanya dari harga pasar (Fathollahzadeh et al., 2021; Lagos et al., 2022; Armstrong et al., 2021). Gambar 3 memeringkat variabel input menurut frekuensi pelaporan, dengan harga komoditas dan kadar bijih paling dominan, diikuti risiko cadangan dan geoteknik, korelasi antarvariabel, serta tingkat diskonto. Tabel 6 merangkum struktur input dan keluaran.



Gambar 3. Frekuensi pelaporan variabel input stokastik dalam korpus

Tabel 6. Struktur Faktor Risiko dan Metrik Keputusan

Kategori	Variabel / Metrik	Pola Pelaporan
Input pasar	Harga, kurs, tingkat diskonto	Banyak dilaporkan
Input biaya	Biaya operasi, belanja modal, penutupan, royalti, pajak	Banyak dilaporkan; pajak/royalti tidak merata
Input teknis	Kadar, perolehan, laju produksi, cadangan	Sedang; bergantung jenis studi
Teknis lanjutan	Dilusi, metalurgi, geoteknik	Jarang dilaporkan
Keluaran nilai	NPV, IRR, probabilitas rugi	Banyak dilaporkan
Keluaran risiko/keputusan	VaR, CVaR, nilai opsi, peringkat, waktu	Studi <i>real options</i> , <i>copula</i> , keputusan

Di sisi keluaran, nilai bersih sekarang, tingkat pengembalian internal, dan probabilitas rugi paling sering dilaporkan, sedangkan metrik risiko yang lebih maju seperti *value-at-risk*, *conditional value-at-risk*, nilai teradjustasi-opsi, peringkat, dan waktu masuk muncul terutama pada studi *real options*, *copula*, dan keputusan investasi. Pilihan metrik seharusnya menyesuaikan pertanyaan keputusan. Keputusan terima atau tolak yang sederhana cukup dengan nilai harapan dan probabilitas rugi, sedangkan keputusan tentang waktu masuk, lindung nilai, atau perluasan menuntut metrik yang menangkap fleksibilitas dan ekor risiko.

3.2.4 RQ4: Kelemahan Praktik dan Risiko Keputusan Modal

Kelemahan yang paling berulang adalah pemodelan dependensi yang disederhanakan. Banyak studi MCS-DCF memakai sampling independen karena lebih sederhana dan mudah dijelaskan. Persoalannya, kerugian pada tambang sering datang sebagai kombinasi. Harga turun, tekanan nilai tukar, inflasi biaya, kadar lebih rendah, perolehan berkurang, dan produksi tertunda dapat terjadi bersamaan. Ketika faktor yang merugikan ini berkorelasi tetapi disampel terpisah, simulasi cenderung menghasilkan estimasi risiko penurunan yang terlalu optimistis. Akibatnya bagi keputusan modal serius: probabilitas rugi tampak lebih kecil dari semestinya, sehingga proyek bisa diterima dengan risiko yang sebenarnya tersembunyi. Matriks korelasi, korelasi peringkat, dekomposisi Cholesky, dan pemodelan *copula* menawarkan alternatif yang lebih kuat ketika data mendukung (Ardian & Kumral, 2021; (Singh et al., 2021).

Kritik terhadap sampling independen perlu ditegaskan karena risiko tambang jarang muncul secara terpisah. Pada kondisi pasar buruk, harga komoditas dapat turun bersamaan dengan pelemahan kurs, kenaikan biaya input, tekanan biaya pembiayaan, dan keterlambatan produksi. Pada sisi teknis, kadar bijih yang lebih rendah dapat terjadi bersama penurunan *recovery*, peningkatan *strip ratio*, atau kenaikan biaya pengolahan. Jika variabel-variabel ini diperlakukan independen, simulasi dapat menghasilkan kombinasi skenario yang terlalu lemah dan meremehkan *downside risk*. Konsekuensinya bukan sekadar kesalahan teknis, melainkan bias keputusan modal: probabilitas rugi menjadi tampak kecil, kebutuhan kontinjensi modal diremehkan, dan proyek yang sebenarnya rapuh dapat lolos seleksi investasi. Karena itu, struktur korelasi, asumsi *copula*, atau setidaknya justifikasi *sampling* independen harus dinyatakan eksplisit.

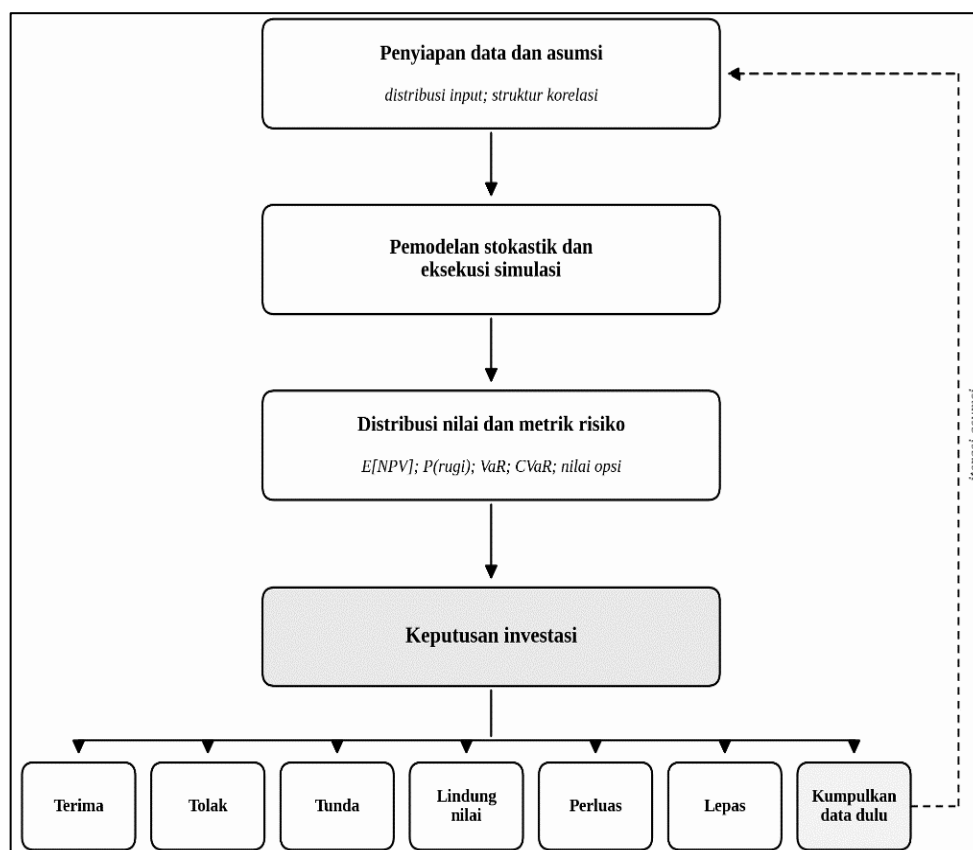
Kelemahan kedua adalah transparansi asumsi. Banyak makalah melaporkan hasil valuasi yang berguna, tetapi lebih sedikit yang menyatakan asumsi distribusi, struktur dependensi, dan tingkat diskonto secara cukup jelas untuk ditelaah ulang. Bagi pengambil keputusan, kelemahan ini bukan urusan editorial. Ketika sebuah keputusan alokasi modal dipersiapkan, asumsi probabilistik di baliknya perlu dapat ditelusuri dan diuji kembali. Asumsi yang tidak terdokumentasi membuat keputusan investasi sulit dipertanggungjawabkan dan sulit dibandingkan antarproyek.

Implikasi terakhir adalah *risk governance*. Dalam keputusan investasi bernilai besar, distribusi input, alasan pemilihan distribusi, asumsi korelasi, jumlah iterasi, dan metrik keputusan harus terdokumentasi agar model dapat diaudit, diuji ulang, dan dibandingkan antarproyek. Tanpa dokumentasi ini, hasil simulasi mudah berubah menjadi angka dekoratif yang tampak ilmiah tetapi sulit dipertanggungjawabkan. Bagi perusahaan tambang, tata kelola model diperlukan untuk membedakan asumsi yang berasal dari data historis, judgement teknis, skenario makro, dan kebijakan manajemen. Dengan cara ini, Monte Carlo bukan hanya alat menghitung risiko, melainkan perangkat disiplin keputusan yang memaksa pengambil keputusan menjelaskan sumber ketidakpastian, batas toleransi risiko, dan tindakan manajerial yang akan diambil ketika skenario buruk terjadi.

3.2.5 Logika Pemilihan Metode dan Alur Keputusan Investasi

Studi yang ditinjau mendukung satu logika pemilihan yang mengalir langsung dari struktur ketidakpastian masalah. Valuasi rencana tambang tetap dengan harga dan biaya tidak pasti ditangani paling efisien oleh MCS-DCF. Dinamika deret waktu harga atau kurs menuntut DCF stokastik atau proses *mean-reverting* seperti gerak Brown geometrik dan *Ornstein-Uhlenbeck*. Ketika fleksibilitas manajerial hadir, yaitu keputusan menunggu, memperluas, atau melepas, *real options*, pohon keputusan, atau pohon binomial menjadi instrumen yang tepat. Ketidakpastian geologi dan urutan produksi paling baik ditangani lewat perencanaan tambang stokastik atau simulasi geostatistik. Faktor risiko merugikan yang berkorelasi menuntut *copula* atau simulasi sadar-korelasi alih-alih sampling independen. Proyek dengan data probabilitas lemah lebih cocok dilayani model *fuzzy*, *grey*, atau *robust* ketimbang asumsi distribusi yang tidak didukung data.

Logika ini bermuara pada satu alur keputusan investasi yang stabil, ditampilkan pada Gambar 4. Alurnya dimulai dari penyiapan data dan asumsi, bergerak ke pemodelan stokastik dan eksekusi simulasi, menghasilkan distribusi nilai dan metrik risiko, lalu berakhir pada keputusan. Keputusan itu bukan sekadar terima atau tolak, melainkan satu set tindakan manajerial yang lebih kaya: terima, tolak, tunda, lindung nilai, perluas, lepas, atau kumpulkan data lebih dahulu. Kerangka *real options* dan aturan optimasi investasi dalam proyek tambang memberi alasan formal mengapa menunggu atau bertahap kerap bernilai ketika ketidakpastian tinggi dan keputusan dapat ditunda tanpa kehilangan kesempatan (Chandra & Hartley, 2024; Hozman et al., 2024). Inilah kontribusi praktis tinjauan ini bagi analisis investasi mineral. Bukan satu metode tunggal, melainkan pemetaan dari struktur ketidakpastian ke metode, lalu ke tindakan.



Gambar 4. Alur keputusan investasi berbasis valuasi probabilistik

Bagi analisis investasi dan komite investasi, alur tersebut memberi disiplin kerja yang dapat dipakai sebagai standar minimum sebelum keputusan modal disetujui. Setiap proyek perlu menyajikan bukan hanya NPV dasar, tetapi juga distribusi NPV, probabilitas rugi, sensitivitas faktor dominan, asumsi korelasi, dan tindakan manajerial ketika hasil jatuh ke skenario buruk. Dengan format seperti ini, proses evaluasi menjadi lebih mudah dibandingkan antarproyek, terutama ketika perusahaan harus memilih proyek dengan profil komoditas, umur tambang, dan kebutuhan modal yang berbeda. Dokumentasi asumsi juga mengurangi ruang keputusan berbasis optimisme manajerial karena setiap perubahan input, distribusi, atau struktur dependensi dapat ditelusuri kembali ke dampaknya terhadap risiko modal. Pada level portofolio, keluaran ini juga membantu membedakan proyek yang layak secara nilai harapan dari proyek yang hanya tampak layak karena skenario dasar terlalu optimistis. Dengan demikian, tinjauan ini menawarkan prosedur praktis untuk menjembatani model valuasi, tata kelola risiko, dan keputusan alokasi modal dalam sektor mineral (Cardozo et al., 2022; Valer Dávila, Gómez Galarza, & Court Monteverde, 2024).

Dalam konteks *resource economics*, kontribusi praktis kerangka ini terletak pada kemampuannya menghubungkan risiko proyek tunggal dengan keputusan portofolio. Perusahaan atau investor tidak harus memilih proyek hanya berdasarkan NPV harapan tertinggi, tetapi dapat membandingkan kombinasi nilai harapan, risiko penurunan, kebutuhan kontinjensi modal, dan fleksibilitas manajerial. Proyek dengan NPV lebih rendah dapat lebih rasional dipilih apabila sebaran kerugiannya lebih sempit, kebutuhan modal tambahannya lebih terkendali, atau opsi penundaannya lebih bernilai. Sebaliknya, proyek dengan nilai harapan tinggi tetapi sangat bergantung pada satu skenario harga komoditas perlu diperlakukan sebagai kandidat berisiko tinggi, bukan sebagai proyek unggulan otomatis. Pembacaan seperti ini membuat simulasi Monte Carlo lebih dekat dengan fungsi komite investasi, karena hasilnya dapat diterjemahkan menjadi batas persetujuan, kebutuhan mitigasi, prioritas pengumpulan data, dan rencana aksi ketika skenario pasar atau teknis bergerak melawan asumsi dasar (Singh et al., 2021; Chandra & Hartley, 2024; Valer Dávila et al., 2024).

3.2.6 Sintesis Lintas RQ dan Implikasi Praktis bagi Tata Kelola Investasi

Dalam praktik, penggunaan kerangka ini juga membantu membedakan keputusan proyek dan keputusan pembiayaan. Proyek dengan sebaran NPV yang lebar tidak selalu harus ditolak, tetapi perlu disertai struktur pembiayaan, cadangan kas, atau strategi lindung nilai yang sesuai dengan profil risikonya. Sebaliknya, proyek dengan estimasi nilai harapan yang menarik tetap dapat menjadi tidak layak bila probabilitas rugi, kebutuhan modal tambahan, dan eksposur terhadap faktor eksternal melebihi kapasitas risiko perusahaan. Oleh karena itu, hasil simulasi sebaiknya tidak berhenti pada histogram atau nilai persentil, tetapi diterjemahkan ke dalam ambang keputusan yang jelas, misalnya batas minimum nilai harapan, batas maksimum probabilitas rugi, toleransi terhadap *cash-flow-at-risk*, dan kondisi yang mengharuskan proyek ditunda atau dikaji ulang (Kamel et al., 2023; Chandra & Hartley, 2024).

Bagi investor lintas aset, kerangka ini memberi dasar untuk membandingkan proyek tambang dengan peluang investasi lain yang juga bersaing memperebutkan modal. Perbandingan tersebut menjadi lebih adil bila risiko dinyatakan dalam ukuran yang sebanding, bukan hanya dalam narasi kualitatif. Dengan menampilkan $P(NPV < 0)$, VaR, CVaR, *cash-flow-at-risk*, dan nilai opsi, analisis dapat menghubungkan proyek tambang dengan kebijakan portofolio, batas konsentrasi komoditas, eksposur valuta, dan target pengembalian minimum. Dalam posisi ini, Monte Carlo berfungsi sebagai jembatan antara model teknis tambang dan bahasa keputusan keuangan. Nilai tambahannya bukan pada kompleksitas simulasi, melainkan pada disiplin untuk mengubah ketidakpastian menjadi informasi keputusan yang dapat dibandingkan, diaudit, dan digunakan dalam proses persetujuan modal (Ardian & Kumral, 2021; Singh et al., 2021).

4. KESIMPULAN

Tinjauan ini menyintesis 67 studi terpilih melalui protokol PRISMA 2020 dan menempatkan simulasi Monte Carlo sebagai metode penilaian investasi probabilistik untuk proyek tambang. Hasil utama menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo memindahkan dasar keputusan dari satu nilai titik menjadi distribusi nilai proyek beserta metrik risiko penurunan, sehingga pengambil keputusan dapat menilai peluang kerugian, kedalaman ekor risiko, dan kelayakan proyek terhadap batas toleransi risiko, bukan hanya terhadap nilai harapan. Kebaruan tinjauan terletak pada pemetaan delapan keluarga metode valuasi ke konteks keputusan investasi, pemetaan faktor risiko penggerak nilai ke metrik keputusan, serta penegasan bahwa penyederhanaan dependensi antarvariabel dapat membuat estimasi risiko penurunan terlalu optimistis dan keputusan alokasi modal menjadi rentan. Kontribusi praktisnya berupa kerangka pemilihan metode yang menghubungkan struktur ketidakpastian proyek dengan tindakan manajerial, mulai dari menerima, menolak, menunda, melakukan lindung nilai, memperluas, melepas, hingga mengumpulkan data tambahan sebelum keputusan modal penuh diambil, sekaligus dorongan agar distribusi risiko, asumsi korelasi, dan skenario tindakan menjadi bagian dari tata kelola *capital budgeting*. Keterbatasan tinjauan terletak pada ketergantungan korpus terhadap kata kunci pencarian, basis data, ketersediaan metadata, dan verifikasi teks penuh, serta pada sifat sintesis yang metodologis tanpa menjalankan ulang model simulasi tiap studi. Penelitian lanjutan perlu menguji model Monte Carlo yang memuat korelasi dan *copula* pada data proyek tambang aktual, disertai standar pelaporan asumsi simulasi pada studi kelayakan, agar hasil probabilistik menjadi dasar komunikasi risiko antara analisis, manajemen, investor, dan pemberi pembiayaan.

5. PERNYATAAN PENULIS

5.1 Kontribusi Penulis

Konseptualisasi: F. M. dan R. M.;

Metodologi: F. M. dan R. M.;

Perangkat Lunak: F. M.;

Validasi: F. M. dan R. M.;

Analisis Formal: F. M.;

Investigasi: F. M.;

Sumber Daya: F. M.;

Kurasi Data: F. M.;

Penulisan Draf Awal: F. M.;

Penulisan, Peninjauan, dan Penyuntingan: F. M. dan R. M.;

Visualisasi: F. M.;

Supervisi: R. M.;

Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir manuskrip yang diajukan untuk publikasi.

5.2 Ketersediaan Data

Data yang mendasari tinjauan ini berupa publikasi ilmiah, dokumentasi penyaringan literatur, dan matriks ekstraksi studi. Data pendukung yang tersedia dapat diperoleh dari penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar.

5.3 Pendanaan

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan eksternal.

5.4 Pernyataan Dewan Peninjau Institusional

Tidak berlaku (*Not applicable*). Penelitian ini merupakan tinjauan literatur yang tidak melibatkan partisipan manusia secara langsung.

5.5 Pernyataan Persetujuan Berdasarkan Informasi

Tidak berlaku (*Not applicable*). Tidak dilakukan pengumpulan data primer dari partisipan manusia.

5.6 Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang diketahui dapat memengaruhi pelaksanaan dan pelaporan penelitian ini.

5.7 Penggunaan AI Generatif dan Teknologi Berbantuan AI dalam Proses Penulisan

Teknologi AI generatif digunakan sebagai alat bantu dalam penyusunan dan penyuntingan naskah. Seluruh konten yang dibantu oleh AI ditinjau dan diverifikasi oleh penulis, yang bertanggung jawab penuh atas substansi ilmiah dan versi akhir manuskrip.

REFERENCES

- Ahmadi, R., & Bratvold, R. B. (2023). An exposition of least square Monte Carlo approach for real options valuation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 222, 111230. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111230>
- Ardian, A., & Kumral, M. (2021). Enhancing mine risk assessment through more accurate reproduction of correlations and interactions between uncertain variables. *Mineral Economics*, 34(3), 411–425. <https://doi.org/10.1007/s13563-020-00238-z>
- Armstrong, M., Lagos, T., Emery, X., Homem-de-Mello, T., Lagos, G., & Sauré, D. (2021). Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources Policy*, 72, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102086>
- Cardozo, F. A. C., Petter, C. O., & Albuquerque, N. R. de. (2022). Monte Carlo simulation risk analysis for underground mining projects. *Tecnologia Em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 19, e2681. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20222681>
- Chandra, A., & Hartley, P. R. (2024). Sequential investment decisions for mining projects using compound multiple volatility real options approach. *Resources Policy*, 97, 105241. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105241>
- Fathollahzadeh, K., Asad, M. W. A., Mardaneh, E., & Cigla, M. (2021). Review of solution methodologies for open pit mine production scheduling problem. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(8), 564–599. <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1888395>
- Faúndez, P., & Guzmán, J. I. (2025). Deconstructing cost overrun and delay in mining projects: A system-based model of prices, quantities, and time. *Resources Policy*, 110, 105754. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105754>
- Hozman, J., Tichý, T., & Dvořáčková, H. (2024). Valuation of mining projects under dynamic model framework. *Annals of Operations Research*, 337(3), 1167–1204. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05569-y>
- Kamel, A., Elwageeh, M., Bondua, S., & Elkarmoty, M. (2023). Evaluation of mining projects subjected to economic uncertainties using the Monte Carlo simulation and the binomial tree method: Case study in a phosphate mine in Egypt. *Resources Policy*, 80, 103266. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103266>
- Khodaeibabajan, A., & Ozturk, C. A. (2026). A risk-based decision framework for economic sustainability in open-pit gold mining using Monte Carlo simulation. *Sustainability*, 18(9), 4448. <https://doi.org/10.3390/su18094448>

- Lagos, T., Armstrong, M., Homem-de-Mello, T., Lagos, G., & Sauré, D. (2022). A framework for adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Optimization and Engineering*, 23(1), 111–146. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09557-0>
- Markovic, P., Stevanovic, D., Kolonja, B., Slavkovic, D., & Krzanovic, D. (2025). A hybrid model for risk-based strategic planning in open-pit mining: Integrating deterministic, stochastic, and ISO 31000 approaches. *Applied Sciences*, 15(5), 2500. <https://doi.org/10.3390/app15052500>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Singh, J., Ardian, A., & Kumral, M. (2021). Gold-copper mining investment evaluation through multivariate copula-innovated simulations. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(3), 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00424-9>
- Stanujkic, D., Fedajev, A., & Santos, M. (2023). Investment projects evaluation in a fuzzy environment using the simplified WISP method. *Serbian Journal of Management*, 18(2), 225–235. <https://doi.org/10.5937/sjm18-44522>
- Trijayanto, T., & Hakam, D. F. (2025). Economic viability and flexibility of the South Pasopati Coal Project, Indonesia: A real options approach under market volatility and carbon pricing. *Journal of Risk and Financial Management*, 18(5), 225. <https://doi.org/10.3390/jrfm18050225>
- Valer Dávila, J. C., Gómez Galarza, V., & Court Monteverde, E. (2024). High-dimensional private and social optimal policy valuation model for non-renewable natural resource extraction projects for multivariate public policy decisions. *Resources Policy*, 96, 105230. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105230>
- Yang, W., Fang, N., Wang, Y., Long, T., Deng, S., Xue, M., & Deng, B. (2022). Value evaluation of mining right based on fuzzy real options. *Resources Policy*, 78, 102818. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102818>