

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam Dalam industri konstruksi, khususnya pada pembangunan bendungan, desain merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan proyek. Kualitas desain tidak hanya memengaruhi aspek teknis, tetapi juga berdampak langsung pada biaya, waktu pelaksanaan, dan mutu pekerjaan. Ketidaksesuaian antara asumsi desain dan kondisi lapangan sering menimbulkan kesulitan pelaksanaan konstruksi (*constructability issues*), yang pada akhirnya menyebabkan keterlambatan, pembengkakan biaya, dan penurunan efisiensi proyek. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perubahan pada fase konstruksi sering dipengaruhi oleh struktur kontrak, waktu implementasi, peran pemangku kepentingan, serta ketersediaan sumber daya yang menentukan besarnya dampak perubahan terhadap proyek (Smith et al., 2023). Selain itu, proyek infrastruktur berskala besar umumnya menghadapi ketidakpastian teknis dan lingkungan sehingga menuntut fleksibilitas serta kemampuan adaptasi dalam proses perencanaan dan pelaksanaan desain (Sánchez-Silva & Calderón-Guevara, 2022).

Bendungan merupakan infrastruktur strategis dalam pengelolaan sumber daya air yang berfungsi untuk pengendalian banjir, penyediaan air irigasi dan air baku, serta pembangkit listrik tenaga air. Kompleksitas perencanaan dan pelaksanaannya menuntut keterpaduan antara proses desain dan konstruksi agar solusi desain dapat diterapkan secara efektif di lapangan. Perkembangan teknologi manajemen konstruksi, seperti Building Information Modelling (BIM), juga memungkinkan prediksi dampak perubahan desain terhadap waktu dan biaya secara lebih dini melalui pendekatan digital yang terintegrasi (Abdulfattah et al., 2023).

Dalam praktiknya, kesenjangan antara desain dan kondisi lapangan masih sering terjadi pada proyek konstruksi besar. Hal ini juga ditemukan pada Proyek Bendungan Jenelata, di mana proses pendetailan desain berlangsung paralel dengan fase konstruksi meskipun menggunakan skema kontrak harga satuan. Kondisi tersebut memunculkan perubahan desain (*design changes*) sebagai respons terhadap kondisi teknis, geoteknik, dan kebutuhan operasional di lapangan (Wang et al., 2022; Abdurrahman et al., 2025). Kompleksitas proyek semakin meningkat karena keterlibatan pemangku kepentingan multinasional dengan standar teknis dan pola komunikasi yang berbeda, sehingga koordinasi dan klarifikasi desain selama pelaksanaan konstruksi menjadi lebih menantang.

Berbagai penelitian menegaskan pentingnya integrasi antara desain dan konstruksi dalam meningkatkan kinerja proyek. Keterlibatan kontraktor sejak tahap desain dapat mengurangi konflik dan revisi desain (Trigunarsyah, 2004), sementara pendekatan desain yang iteratif dan kolaboratif dapat

meningkatkan *constructability* dan *maintainability* (Apriliani & Adi, 2017). Konsep *design partnering* juga menunjukkan bahwa kolaborasi antara pemilik proyek, konsultan perencana, dan kontraktor sejak tahap awal desain dapat meningkatkan efisiensi dan adaptabilitas pelaksanaan proyek (Liu et al., 2021; Wang et al., 2016). Selain itu, penerapan BIM terbukti mampu mendeteksi konflik desain sejak awal dan meningkatkan koordinasi antar pihak dalam proyek konstruksi (Suminto, 2020; Wangchuk et al., 2024).

Namun demikian, sebagian besar penelitian masih menyoroti dampak negatif perubahan desain, seperti keterlambatan dan pembengkakan biaya (Aslam et al., 2019; Ramadhan & Waty, 2025). Kajian empiris mengenai bagaimana adaptasi desain pada fase konstruksi dapat meningkatkan *constructability*, khususnya pada proyek bendungan dengan kontrak harga satuan dan keterlibatan pemangku kepentingan multinasional, masih relatif terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara proses desain dan *constructability* melalui studi kasus pada Proyek Bendungan Jenelata, dengan fokus pada perubahan desain pekerjaan proteksi lereng dan grouting pondasi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan kajian integrasi desain konstruksi serta memberikan masukan praktis bagi pemangku kepentingan dalam mengelola perubahan desain secara lebih adaptif guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas pelaksanaan proyek.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, masalah utama yang akan diteliti dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana hubungan antara faktor-faktor proses desain dengan tingkat *constructability* pada perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi yang terjadi di Proyek Bendungan Jenelata?
2. Seberapa besar pengaruh faktor-faktor proses desain terhadap peningkatan *constructability* pada perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi di Proyek Bendungan Jenelata?
3. Bagaimana dampak perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi terhadap *constructability* pada Proyek Bendungan Jenelata?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis hubungan antara faktor-faktor proses desain dengan tingkat *constructability* pada perubahan desain yang terjadi di Proyek Bendungan Jenelata.
2. Mengukur besarnya pengaruh faktor-faktor proses desain terhadap peningkatan *constructability* pada perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi.

3. Menilai dampak perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi terhadap *constructability*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan teori hubungan antara proses desain dan *constructability* pada proyek infrastruktur, khususnya bendungan.
2. Menjadi referensi bagi pemilik proyek, konsultan, dan kontraktor dalam meningkatkan koordinasi desain–konstruksi agar desain lebih efisien dan mudah diterapkan.
3. Menyediakan bukti empiris penerapan prinsip *constructability* melalui studi kasus perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan pada **Proyek Bendungan Jenelata**, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan.
2. Analisis hubungan dan pengaruh (RM1 dan RM2) dilakukan berdasarkan hasil kuesioner dari pihak yang terlibat dalam desain dan pelaksanaan konstruksi.
3. Analisis dampak (RM3) difokuskan pada dua pekerjaan, yaitu **proteksi lereng dan grouting pondasi**.
4. Aspek yang dianalisis pada RM3 merupakan turunan dari variabel hasil RM1 dan RM2.
5. Penelitian ini mencakup :
 - a) Analisis kuantitatif terhadap hubungan dan pengaruh faktor-faktor proses desain terhadap *constructability*.
 - b) Analisis kualitatif-komparatif terhadap dampak perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi.
 - c) Integrasi hasil analisis kuantitatif dan empiris lapangan untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang penerapan prinsip *constructability*.

1.6 Proses Desain dan *Constructability*

1.6.1 Proses Desain

Proses desain merupakan tahap awal proyek konstruksi yang menentukan kualitas dokumen teknis, kelancaran pelaksanaan, serta kemampuan desain beradaptasi terhadap kondisi lapangan. Tahap ini mencakup perencanaan konsep, pengembangan desain teknis, hingga penyusunan dokumen konstruksi. Apriyani dan Adi (2017) menyatakan bahwa desain yang bersifat iteratif dan kolaboratif dapat meningkatkan kualitas perencanaan serta meminimalkan perubahan selama fase konstruksi. Faktor penting dalam

proses desain meliputi keterlibatan pemangku kepentingan, pemilihan material dan metode konstruksi, serta pemanfaatan teknologi seperti *Building Information Modelling* (BIM).

Penelitian Wang et al. (2016) menunjukkan bahwa manajemen desain pada proyek *Engineering–Procurement–Construction* (EPC) memerlukan koordinasi lintas disiplin dan lintas budaya agar pelaksanaan proyek berjalan efektif. Liu et al. (2021) menambahkan bahwa konsep *design partnering*, yaitu kolaborasi antara pemilik proyek, konsultan, dan kontraktor sejak tahap awal desain, mampu menghasilkan desain yang lebih adaptif terhadap kondisi lapangan.

Dalam konteks Indonesia, Trigunaryah (2004) mengemukakan bahwa keterlibatan pihak konstruksi dalam tahap perencanaan masih terbatas sehingga sering menimbulkan konflik desain saat pelaksanaan. Suminto (2020) menekankan pentingnya BIM sebagai alat koordinasi digital yang mampu mengintegrasikan berbagai disiplin teknik dan mendeteksi *design clash* secara dini. Selain itu, teknologi digital juga memungkinkan prediksi dampak perubahan desain terhadap waktu dan biaya proyek secara lebih awal (Abdulfattah et al., 2023).

1.6.2 Constructability

Constructability merupakan konsep yang menunjukkan sejauh mana suatu desain dapat dilaksanakan secara efisien dengan mempertimbangkan sumber daya, metode konstruksi, waktu, biaya, serta keselamatan kerja. Apriliani dan Adi (2017) menyatakan bahwa pemilihan material, metode konstruksi yang tepat, serta koordinasi antara perencana dan pelaksana merupakan faktor utama yang menentukan tingkat *constructability* suatu proyek.

Trigunaryah (2004) menegaskan bahwa keterlibatan kontraktor sejak tahap awal desain dapat meningkatkan kualitas desain serta mengurangi perubahan selama konstruksi. Amies et al. (2025) juga menunjukkan bahwa faktor *project readiness*, *project comprehension*, serta koordinasi tim memiliki pengaruh signifikan terhadap keberhasilan fase desain proyek bendungan.

Selain itu, keberhasilan penerapan *constructability* dipengaruhi oleh keterlibatan awal pihak konstruksi, kejelasan dokumentasi desain, serta koordinasi lintas tim proyek. Penerapan teknologi seperti BIM juga terbukti mampu meningkatkan *constructability* dengan menyediakan model informasi proyek yang terintegrasi (Wangchuk et al., 2024).

1.6.3 Hubungan Proses Desain dengan Constructability

Hubungan antara proses desain dan *constructability* sangat menentukan kelancaran pelaksanaan proyek konstruksi. Desain yang tidak dilakukan secara kolaboratif dan adaptif sering menimbulkan konflik desain, keterlambatan, dan pembengkakan biaya proyek.

Apriliani dan Adi (2017) menunjukkan bahwa desain yang iteratif dan melibatkan berbagai pihak sejak awal mampu meningkatkan tingkat

constructability. Liu et al. (2021) juga menegaskan bahwa pendekatan *design partnering* dapat meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek.

Sebaliknya, perubahan desain yang tidak direncanakan dengan baik dapat mengganggu kinerja proyek. Aslam et al. (2019) dan Ramadhan dan Waty (2025) menunjukkan bahwa perubahan desain memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan biaya dan keterlambatan proyek. Oleh karena itu, desain yang kolaboratif, berbasis teknologi, dan adaptif terhadap kondisi lapangan menjadi prasyarat penting untuk menghasilkan desain yang *constructible*.

1.7 Perubahan Desain

Bendungan Perubahan desain merupakan fenomena umum pada proyek konstruksi, terutama ketika kondisi aktual di lapangan tidak sepenuhnya sesuai dengan rencana awal.

Faktor penyebab perubahan desain antara lain:

- Penyesuaian terhadap kondisi geoteknik atau lingkungan,
- Revisi akibat keterbatasan material atau teknologi,
- Koreksi terhadap kesalahan desain,
- Perubahan kebijakan teknis atau standar pelaksanaan.

Trigunarsyah (2004) menekankan bahwa perubahan desain seringkali menjadi indikator lemahnya *constructability* pada tahap awal proyek. Oleh karena itu, perlu analisis mendalam untuk menilai sejauh mana perubahan tersebut berdampak terhadap kemudahan pelaksanaan dan efisiensi proyek.

Pada **Proyek Bendungan Jenelata**, perubahan desain diantaranya terjadi pada:

- Pekerjaan proteksi lereng, dari semula menggunakan *Frame Beam + Hydroseeding* menjadi Geomat Type III.
- Pekerjaan grouting pondasi, dari semula menggunakan pola vertikal grouting menggunakan pola rim grouting.

Perubahan ini mencerminkan penerapan prinsip adaptivitas dalam desain, namun juga menuntut penilaian ulang terhadap *constructability* hasil perubahan tersebut.

1.8 Infrastruktur Bendungan

Bendungan adalah infrastruktur sumber daya air yang berfungsi menahan, menyimpan, dan mengendalikan aliran air dalam jumlah besar. Selain penyediaan air irigasi, bendungan juga berperan dalam penyediaan air baku, pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pengendalian banjir, konservasi lingkungan, hingga pariwisata. Dengan demikian, bendungan memiliki peran strategis bagi ketahanan pangan, energi, dan pengelolaan sumber daya air nasional.

Secara internasional, International Commission on Large Dams (ICOLD, 2018) mendefinisikan large dam sebagai bendungan dengan tinggi ≥ 15 meter dari fondasi hingga puncak, atau 5–15 meter dengan kapasitas tampungan

lebih dari 3 juta m³. Di Indonesia, pengaturan pembangunan bendungan diatur melalui UU No. 17/2019 tentang Sumber Daya Air dan Permen PUPR No. 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan, yang mencakup standar teknis, keamanan, dan keberlanjutan lingkungan.

Jenis-jenis bendungan yang umum digunakan di Indonesia meliputi:

1. Bendungan Urugan (*Earthfill/Rockfill Dam*), termasuk CFRD (Concrete Faced Rockfill Dam) yang banyak digunakan karena fleksibilitas terhadap kondisi geoteknik.
2. Bendungan Beton (*Concrete Dam*), seperti gravity dam dan arch dam.
3. Bendungan Kombinasi, yang memadukan teknologi urugan dan beton sesuai kondisi lapangan.

Kompleksitas desain bendungan sering menimbulkan perubahan pada fase konstruksi akibat keterbatasan data awal, kondisi lapangan, atau kebutuhan teknis tambahan. Oleh karena itu, penerapan prinsip constructability sejak tahap perencanaan sangat penting untuk mengurangi risiko perubahan desain, meningkatkan efisiensi biaya, serta menjamin keberhasilan konstruksi (Koswara & Sulistio, 2023).

Studi Liu et al. (2021) pada proyek EPC PLTA menunjukkan bahwa design partnering antara pemilik, kontraktor, dan konsultan meningkatkan tingkat keterbanguan. Wang et al. (2020) juga menemukan bahwa proyek bendungan dengan model EPC lebih constructible dibanding Design-Bid-Build (DBB) karena adanya umpan balik dari lapangan. Shen et al. (2021) menekankan pentingnya manajemen desain terpadu untuk mengatasi risiko komunikasi lintas negara.

Di Indonesia, Apriliani (2017) mengungkapkan bahwa implementasi constructability masih terkendala pemisahan tim desain dan konstruksi. Koswara & Sulistio (2023) menekankan pentingnya peran kontraktor dalam penjadwalan, pemilihan material, dan dokumentasi. Teknologi seperti BIM juga mulai diterapkan untuk meningkatkan keterpaduan desain dan pelaksanaan (Suminto, 2020).

Dengan demikian, implementasi constructability dalam pembangunan bendungan menuntut kolaborasi multipihak, manajemen desain yang adaptif, serta dukungan teknologi. Integrasi tim desain dan pelaksana sejak awal perencanaan menjadi kunci keberhasilan proyek yang efisien, aman, dan berkualitas.

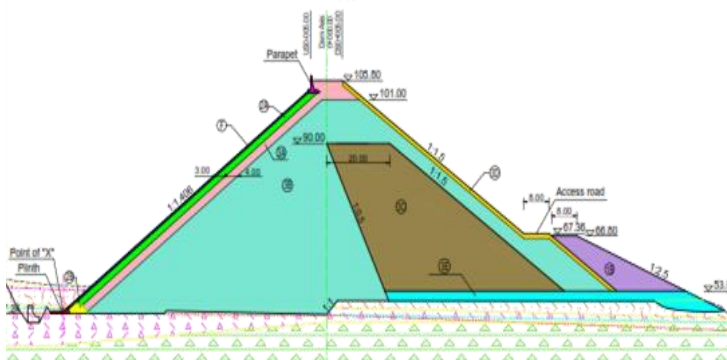
Spesifikasi Teknis Utama :

1. Area Genangan : DAS 222,62 km²; Luas Genangan 12,20 km²; Tampungan Maks Waduk 223.60 Juta m³; Tampungan Efektif Waduk 174,50 Juta m³
2. Tubuh bendungan : Tipe CFRD; tinggi 62.80 m; panjang puncak 1.525 m; lebar puncak 10 m; Elevasi Puncak +105.80 m; Kemiringan Hulu 1:1.4 dan Hilir 1:1.5
3. Pelimpah / Spillway : Tipe pelimpah tengah; elevasi +99.50 m; lebar 121 m
4. Cofferdam : Elevasi Cofferdam +64.00 m; panjang 518 m (kanan) dan 280 m (kiri)
5. Bangunan Pengelak : Kedalaman 10 m, lebar dasar 60 m, panjang 416 m

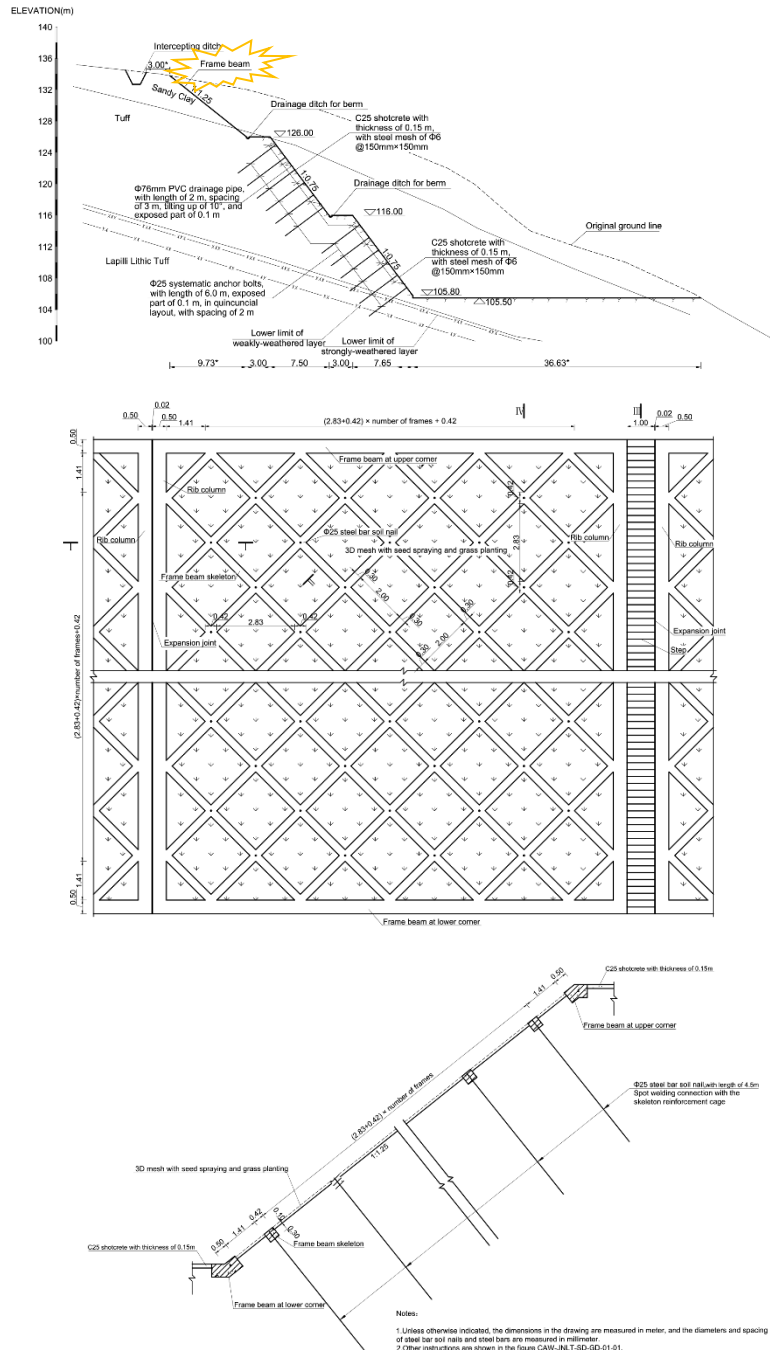
Bendungan ini dirancang dengan komponen utama berupa area genangan, tubuh bendungan, pelimpah (*spillway*), cofferdam, dan saluran pengelak (*diversion channel*). Semua elemen dirancang untuk mendukung fungsi pengendalian banjir, penyimpanan air, serta pembangkit listrik tenaga air.



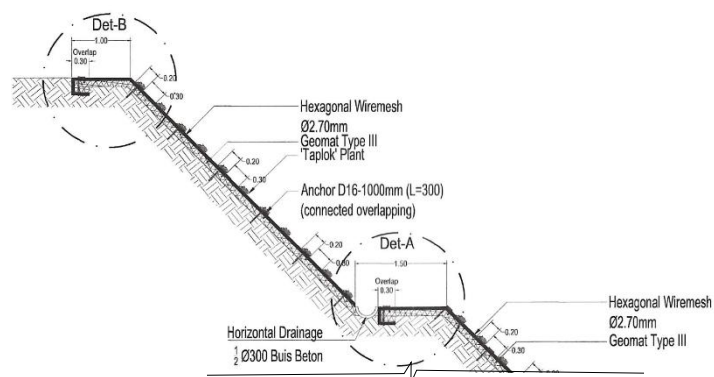
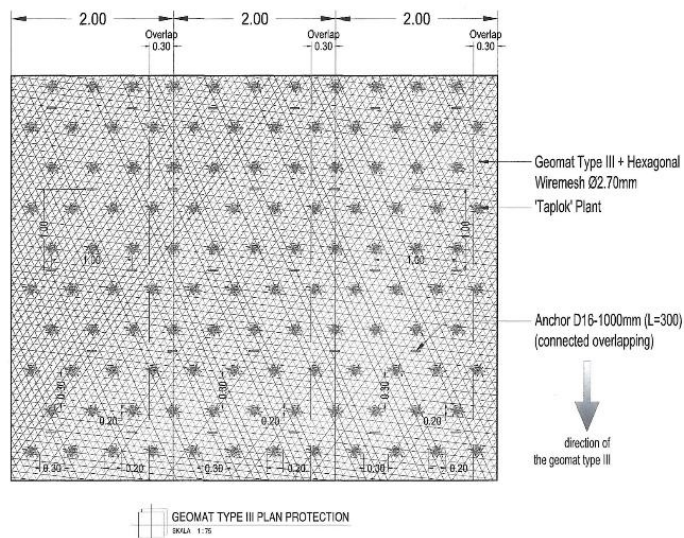
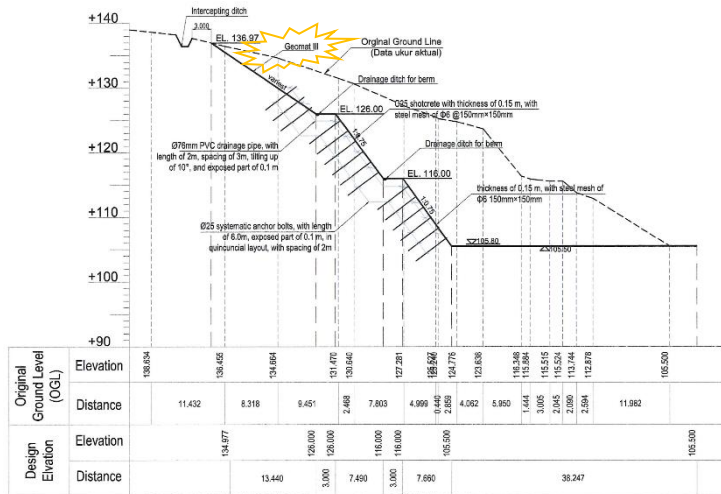
Gambar 2. General Layout Proyek



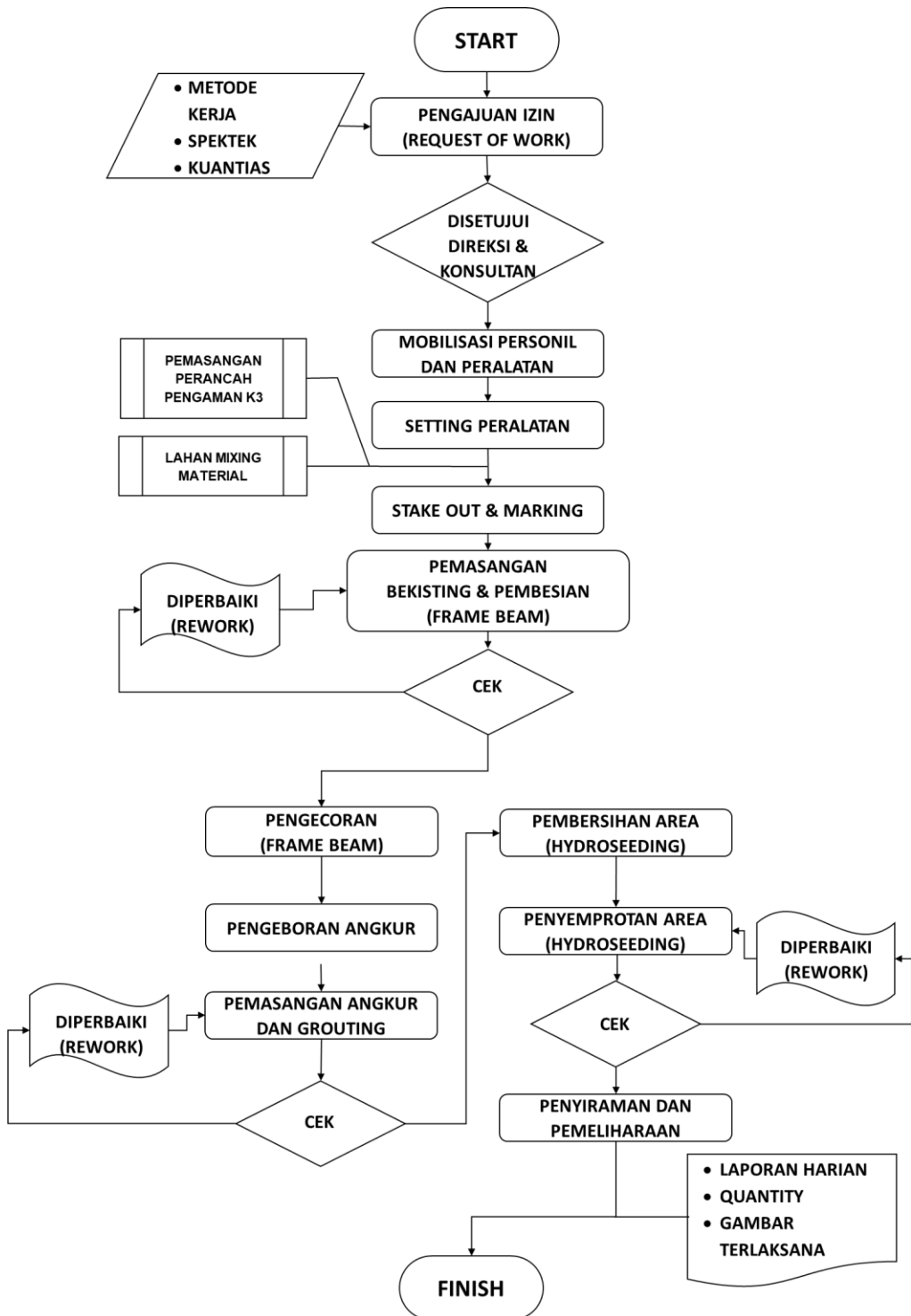
Gambar 3. Cross-section Tubuh Bendungan & Bangunan Pelimpah



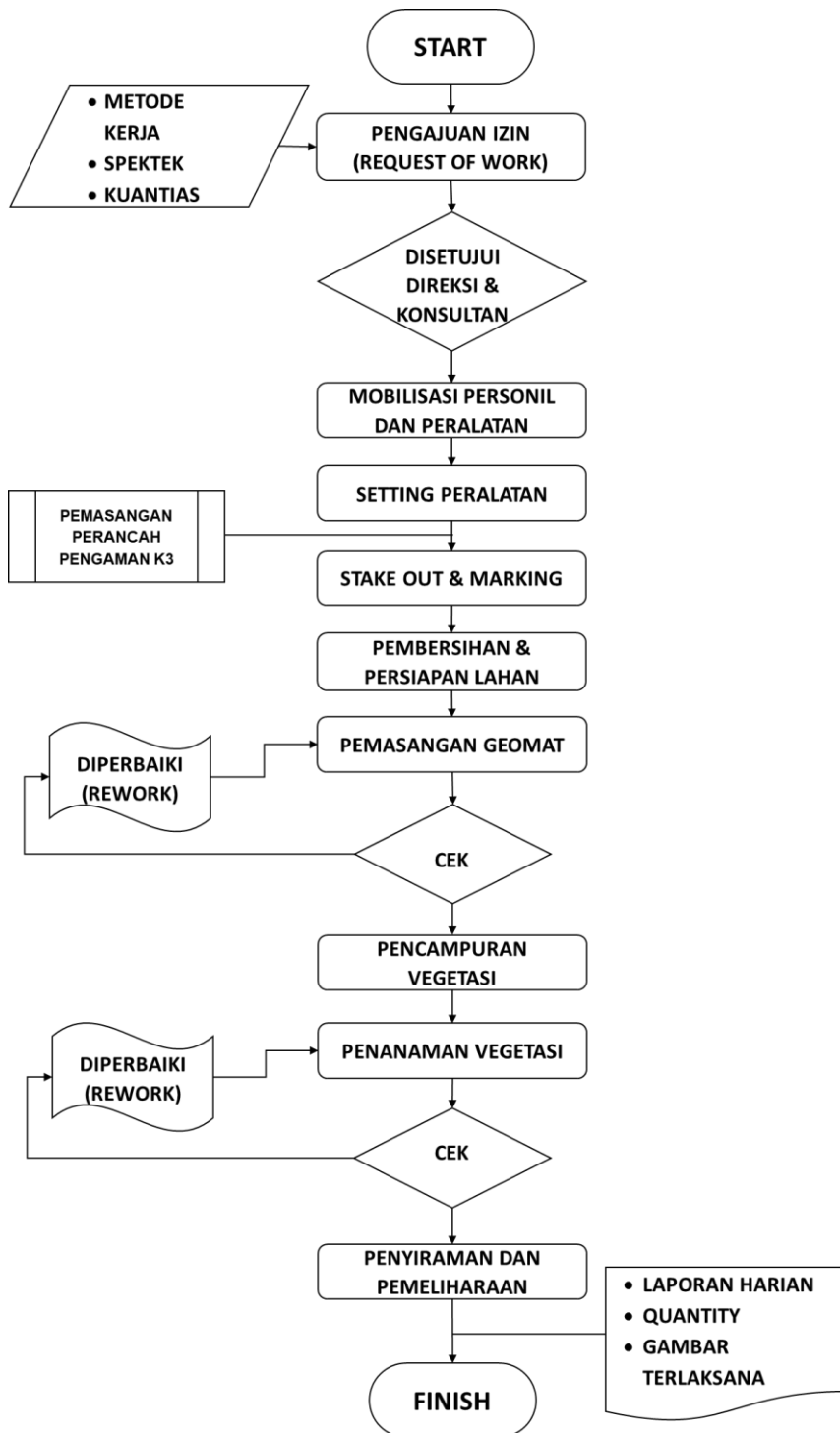
Gambar 5. Proteksi Lereng Menggunakan Metode Frame Beam And Hydroseeding



Gambar 6. Proteksi Lereng Menggunakan Metode Geomat Type III



Gambar 7. *Flowchart Pekerjaan Framebeam + hydroseeding*



Gambar 8. Flowchart Pekerjaan Geomat type III

1.7.3 Pekerjaan Grouting Tirai Pondasi Maindam

Pekerjaan grouting tirai pondasi merupakan bagian krusial dalam konstruksi bendungan yang bertujuan untuk meningkatkan kestabilan dan kedekatan pondasi terhadap rembesan air. Grouting dilakukan dengan menyuntikkan campuran material semen atau bahan kimia ke dalam rekahan batuan dasar untuk membentuk lapisan kedap air (*impermeable barrier*). Pada bendungan tipe **Concrete Faced Rockfill Dam (CFRD)** seperti **Bendungan Jenelata**, sistem grouting sangat berperan dalam menjaga keamanan struktur, karena tubuh bendungan berbasis urugan batuan yang membutuhkan pondasi dengan tingkat kedap air tinggi.

Tujuan Proteksi Lereng di Maindam

1. Mengurangi rembesan air melalui pondasi batuan agar tekanan uplift berkurang.
2. Memperkuat massa batuan dasar dan menutup rekahan terbuka.
3. Meningkatkan kestabilan dan integritas struktur pondasi terhadap tekanan air.
4. Menjamin keamanan jangka panjang tubuh bendungan terhadap kehilangan air dan erosi internal

Pada tahap perencanaan awal, sistem grouting pada pondasi maindam dirancang menggunakan pola vertikal grouting, yaitu pengeboran lubang injeksi tegak lurus terhadap permukaan tubuh bendungan. Pola ini umum digunakan pada proyek dengan topografi relatif datar dan kondisi batuan homogen.

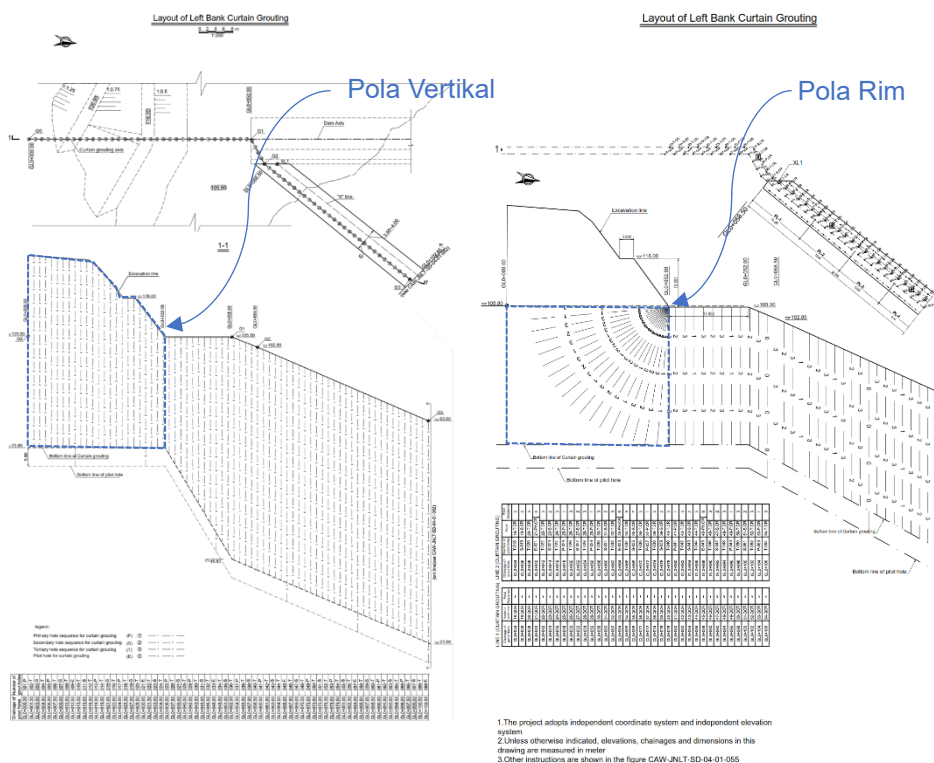
Namun, hasil investigasi geoteknik lapangan menunjukkan bahwa kondisi pondasi pada area ujung maindam (abutment) memiliki kemiringan yang curam dan rekahan batuan dengan orientasi miring. Kondisi ini menyebabkan penerapan pola vertikal menjadi sulit secara teknis, karena:

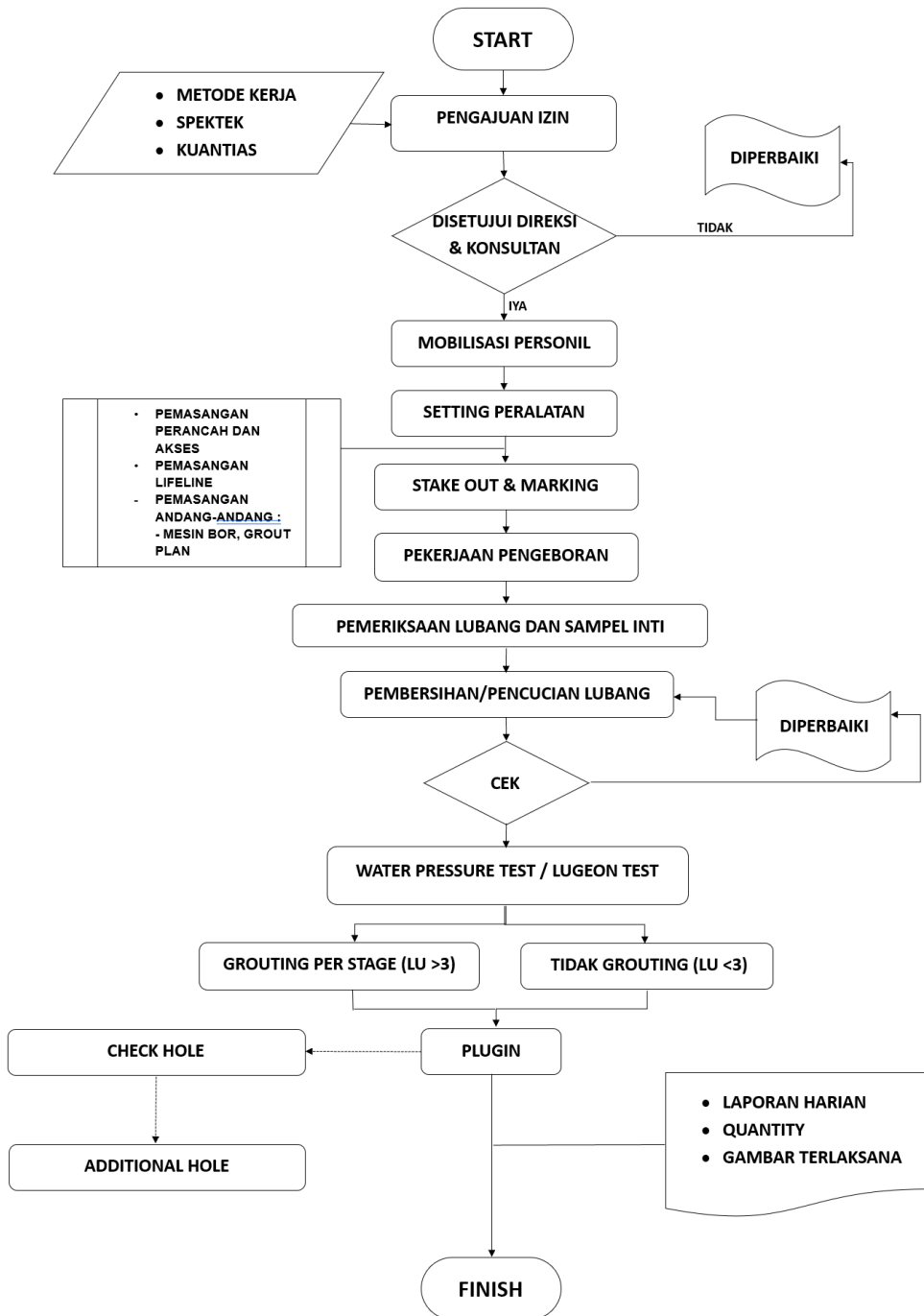
1. Kesulitan menempatkan alat bor secara tegak lurus di medan menanjak, diperlukan andang-andang atau platform tambahan untuk posisi alat bor di medan miring.
2. Mobilisasi peralatan menjadi sulit dan berisiko tinggi,
3. Efisiensi kerja menurun karena mobilisasi alat berat menjadi lebih rumit di area tebing.

Berdasarkan evaluasi tersebut, desain grouting kemudian diubah menjadi pola rim grouting, yaitu pola pengeboran dan penyuntikan yang mengikuti kontur dan kemiringan lereng pondasi. Pada metode ini, lubang bor dibuat dengan arah miring mengikuti kontur alami tebing, sehingga satu titik bor pada sudut dapat menjangkau area pondasi yang luas di bawah tubuh bendungan.

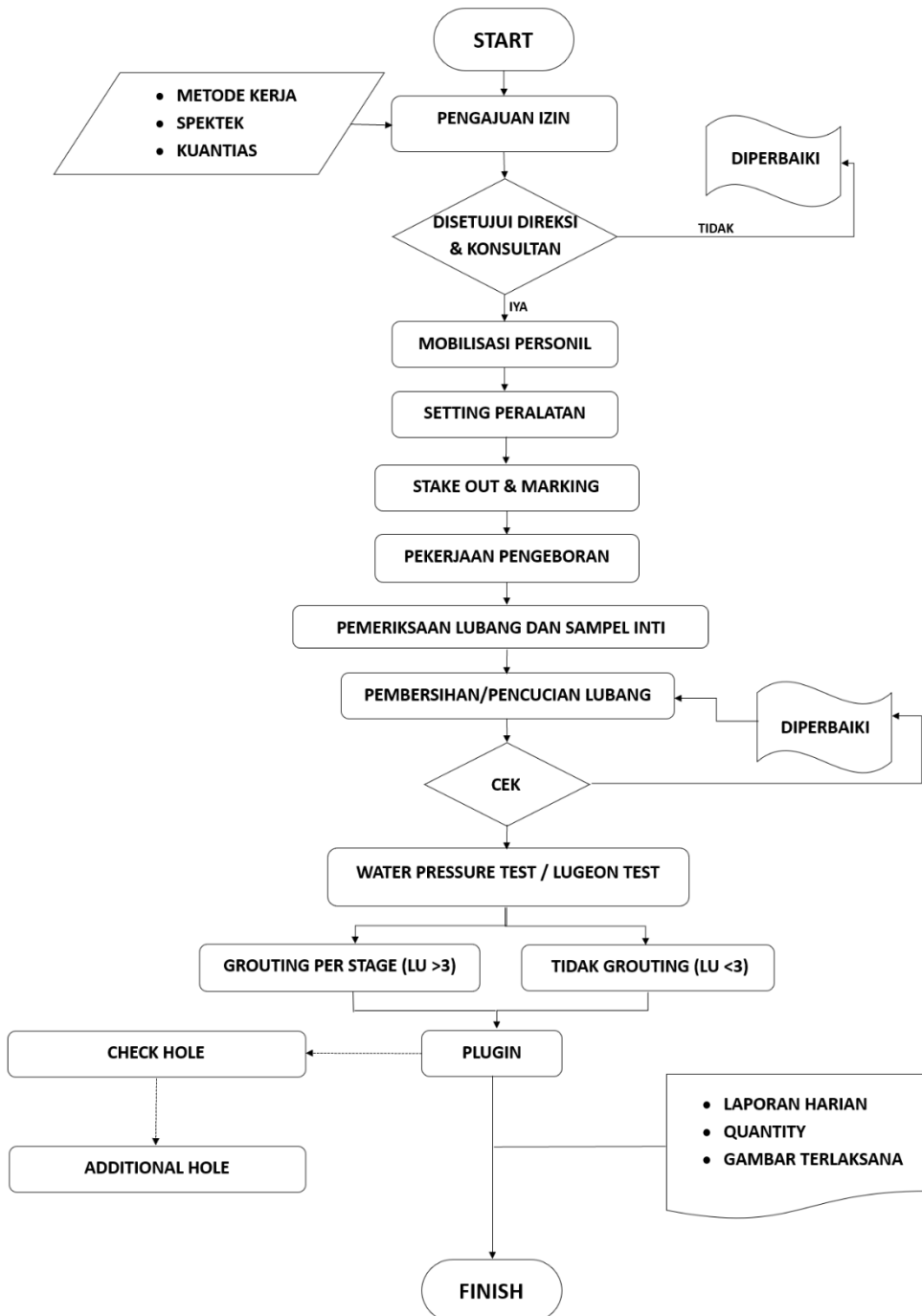
Pola rim grouting memiliki beberapa keunggulan dibandingkan pola vertikal. Dari sisi kemudahan pelaksanaan, metode ini tidak memerlukan andang-andang tambahan di area curam sehingga pekerjaan menjadi lebih aman dan cepat. Pola rim juga lebih adaptif terhadap kondisi lapangan karena mengikuti kontur batuan dan arah rekahan, sehingga injeksi semen lebih efektif pada zona miring. Selain itu, efisiensi waktu dan biaya meningkat karena jumlah titik bor lebih sedikit dengan jangkauan injeksi yang lebih luas. Hasil grouting yang dihasilkan pun lebih baik dan kontinyu di sepanjang area kontak antara tebing dan pondasi. Di samping itu, keselamatan kerja juga meningkat karena risiko kecelakaan akibat bekerja di medan curam dapat diminimalkan.

Perubahan desain dari **pola vertikal grouting** ke **pola rim grouting** mencerminkan penerapan prinsip *constructability* pada pekerjaan pondasi bendungan. Penyesuaian desain ini dilakukan untuk **meningkatkan kemudahan pelaksanaan, efisiensi biaya, dan keselamatan kerja**, tanpa mengurangi efektivitas injeksi pada area pondasi datar yang tetap menggunakan pola vertikal





Gambar 10. Flowchart Pekerjaan Grouting Pola Vertikal



Gambar 11. Flowchart Pekerjaan Grouting Pola RIM

1.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang hubungan antara proses desain dan constructability telah banyak dilakukan. Trigunarsyah (2004) menegaskan bahwa keterlibatan kontraktor sejak fase desain meningkatkan efisiensi proyek dan mengurangi konflik. Liu et al. (2021) menekankan pentingnya kolaborasi lintas pemangku kepentingan melalui design partnering, sedangkan Shen et al. (2021) menyoroti manajemen desain dalam proyek EPC internasional untuk mengatasi tantangan koordinasi. Dalam konteks nasional, Apriliani (2017) menemukan bahwa desain yang adaptif dan iteratif secara signifikan meningkatkan constructability dan maintainability. Tinjauan ini menjadi dasar dalam perumusan variabel penelitian, kerangka konseptual, serta metodologi. Ringkasan penelitian relevan disajikan pada tabel berikut.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Judul	Penulis dan Tahun	Topik	Tujuan	Variabel	Metode	Hasil Penelitian
1	Constructability Practices among Construction Contractors in Indonesia	Trigunarsyah (2004)	Constructability	Mengkaji praktik constructability pada kontraktor	Constructability, contractor involvement	Survei	Keterlibatan kontraktor sejak tahap desain meningkatkan efisiensi proyek
2	Pemodelan Hubungan Proses Desain terhadap Peningkatan Constructability dan Maintainability	Apriliani & Adi (2017)	Proses desain dan constructability	Menganalisis hubungan desain dengan constructability	Design process, constructability	Sistem Dinamik	Desain iteratif meningkatkan constructability
3	Improving Design by Partnering in EPC Hydropower Projects	Liu et al. (2021)	Design partnering	Menganalisis pengaruh design partnering pada proyek hydropower	Design partnering, project performance	Analisis statistik	Kolaborasi meningkatkan kinerja desain dan proyek
4	Enhancing Design Management by Partnering in EPC Projects	Wang et al. (2016)	Design management	Mengkaji manajemen desain lintas organisasi	Design management, partnering	Survei	Koordinasi desain meningkatkan kinerja proyek
5	Design Changes in Construction Projects – Causes	Aslam et al. (2019)	Perubahan desain	Mengidentifikasi penyebab perubahan desain	Design change, cost	Literature review	Perubahan desain memicu

No	Judul	Penulis dan Tahun	Topik	Tujuan	Variabel	Metode	Hasil Penelitian
	and Impact on the Cost						pembengkakan biaya
6	Impact of Change Orders on Cost Overruns and Delays	Ramadhan & Waty (2025)	Change order	Menganalisis dampak perubahan desain	Design change, cost overrun, delay	Analisis statistik	Perubahan desain meningkatkan biaya dan keterlambatan
7	Achieving Design-Phase Success in Dam Construction	Amies et al. (2025)	Keberhasilan desain bendungan	Mengidentifikasi faktor keberhasilan desain bendungan	Project readiness, managerial factors	SEM	Keberhasilan desain dipengaruhi kesiapan proyek
8	Building Information Modelling in Hydropower Infrastructures	Wangchuk et al. (2024)	BIM pada hydropower	Mengkaji penerapan BIM	BIM, design coordination	Systematic review	BIM meningkatkan koordinasi desain
9	Valuing Flexible Planning, Design and Operations	Willebrand et al. (2024)	Fleksibilitas desain infrastruktur air	Menganalisis fleksibilitas desain	Flexible design, infrastructure	Optimisasi model	Fleksibilitas desain meningkatkan adaptasi proyek
10	Design Change Management for Infrastructure Projects	Wang et al. (2022)	Manajemen perubahan desain	Mengidentifikasi manajemen perubahan desain	Design change management	Studi kasus	Perubahan desain dipicu kondisi lapangan
11	Miscommunication Factors Affecting Construction Delay	Toresa et al. (2025)	Komunikasi proyek	Menganalisis pengaruh miskomunikasi	Communication, delay	Analisis statistik	Koordinasi tim mempengaruhi keterlambatan proyek
12	Lean Design Management in Infrastructure Project	Mota et al. (2019)	Lean design management	Mengkaji manajemen desain lean	Design management, coordination	Studi kasus	Koordinasi desain meningkatkan efisiensi
13	Predicting Implications of Design Changes in BIM Projects	Abdulfattah et al. (2023)	Prediksi perubahan desain	Memprediksi dampak perubahan desain	Design change, BIM	Machine learning	Perubahan desain dapat diprediksi sejak awal
14	Flexibility and Adaptability in	Sánchez-Silva & Calderón-Guevara (2022)	Adaptasi desain	Mengkaji fleksibilitas desain infrastruktur	Design flexibility	Analisis model	Fleksibilitas desain penting untuk proyek kompleks

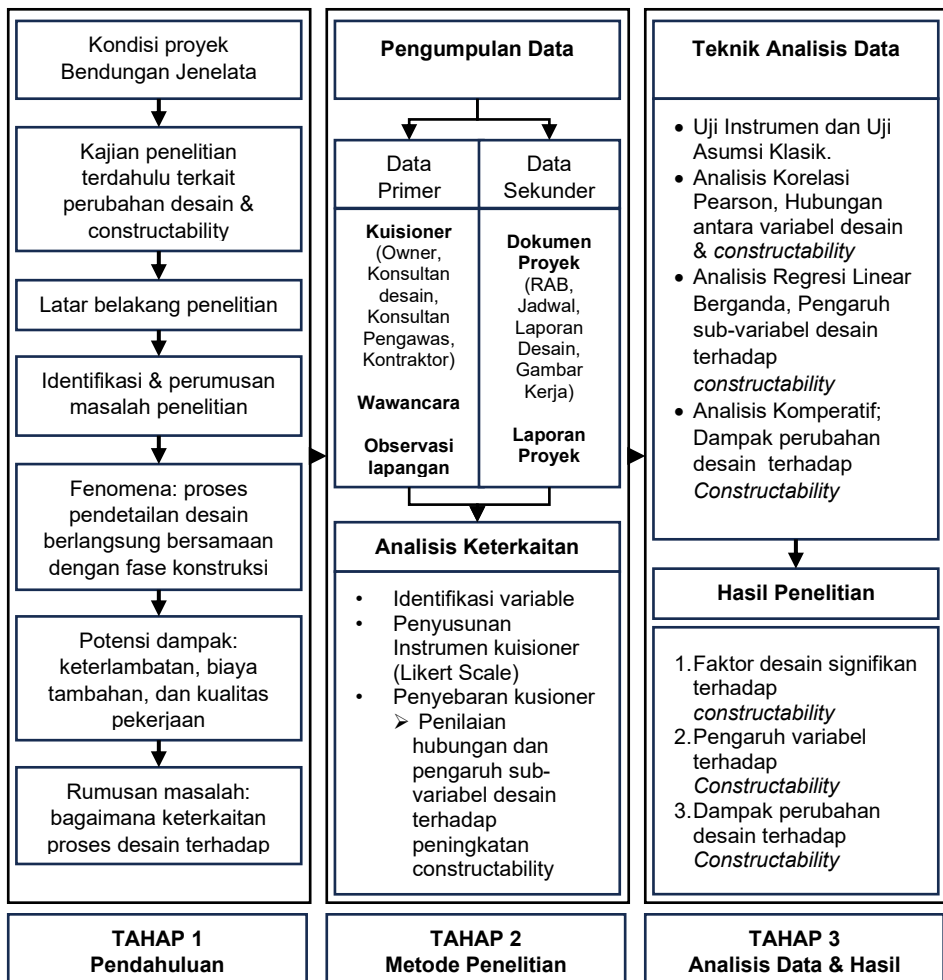
No	Judul	Penulis dan Tahun	Topik	Tujuan	Variabel	Metode	Hasil Penelitian
	Infrastructure Management						
15	The Antecedents of Construction Project Change	Smith et al. (2023)	Perubahan proyek	Menganalisis penyebab perubahan proyek	Project change, procurement	Analisis empiris	Struktur kontrak mempengaruhi perubahan proyek
16	A Comparative Analysis of Construction Methods in Jenelata Dam	Abdurrahman et al. (2025)	Metode konstruksi bendungan	Membandingkan metode konstruksi pada Bendungan Jenelata	Construction method	Studi kasus	Metode konstruksi mempengaruhi efisiensi proyek

BAB II

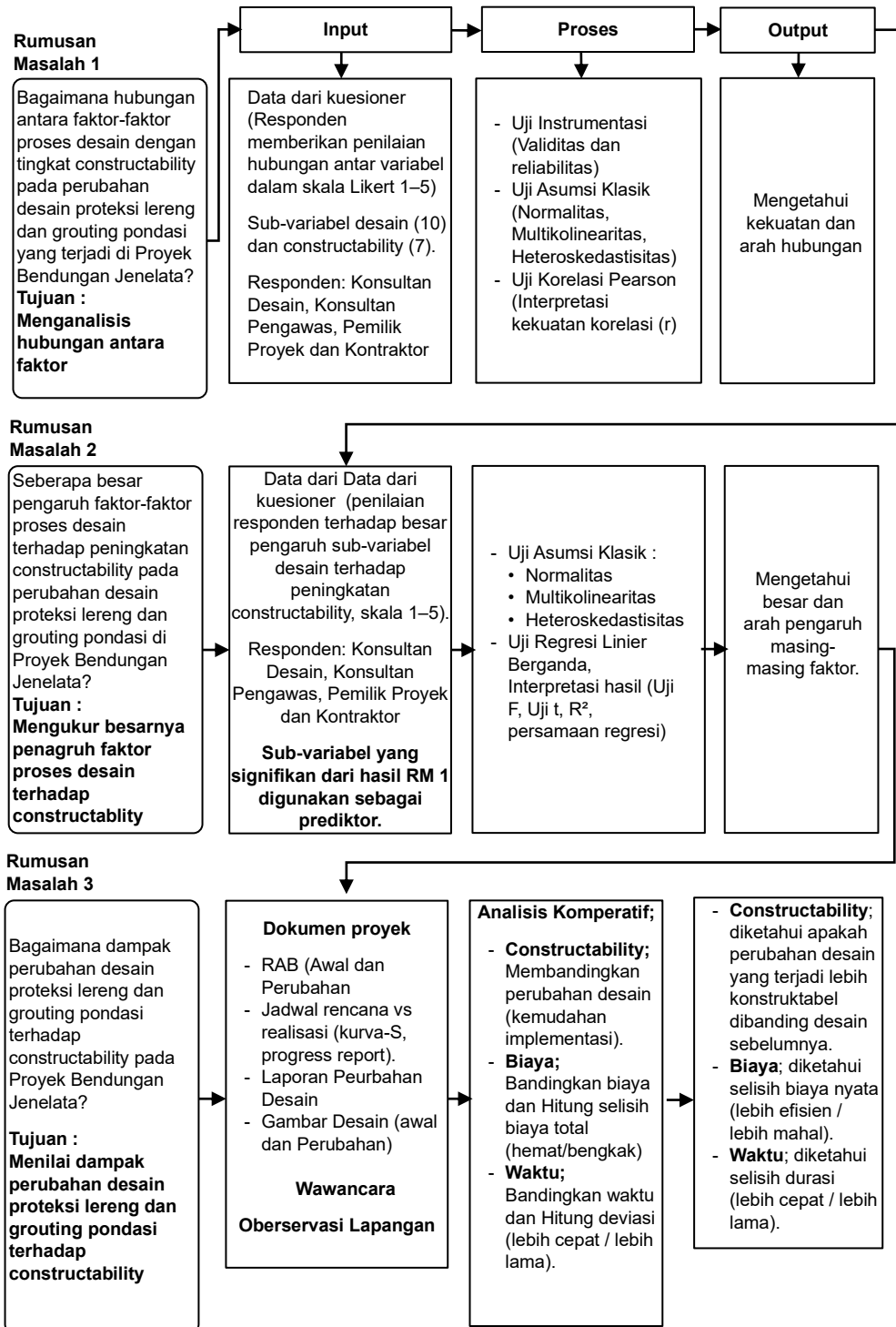
METODE PENELITIAN

2.1 Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan dukungan kualitatif dan komparatif. Analisis kuantitatif dilakukan melalui kuesioner dan uji statistik untuk menilai hubungan serta pengaruh faktor desain terhadap *constructability*. Analisis kualitatif diperoleh dari wawancara dan observasi lapangan, sedangkan analisis komparatif digunakan untuk membandingkan perubahan desain proteksi lereng dan pola grouting pondasi.



Gambar 12. Konsep Kerangka Penelitian



Gambar 13. Kerangka Oprasional Penelitian

2.3 Metode Pengumpulan data

2.3.1 Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

- a) Kuesioner untuk menguji hubungan dan pengaruh faktor-faktor proses desain terhadap constructability (RM 1 dan RM 2). Kuesioner ditujukan kepada pemilik proyek, konsultan perencanaan, konsultan supervisi, dan kontraktor.
- b) Wawancara dan observasi lapangan untuk memperoleh informasi terkait pelaksanaan proteksi lereng, khususnya perbandingan perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi (RM 3).

2. Data Sekunder

- a) Literatur ilmiah berupa jurnal nasional maupun internasional terkait desain dan constructability, sebagai landasan teori.
- b) Dokumen proyek: RAB awal dan perubahan, jadwal rencana vs realisasi (kurva-S, laporan kemajuan), laporan perubahan desain, serta gambar teknis awal dan revisi. Data ini digunakan terutama untuk analisis komparatif pada RM 3.

2.3.2 Instrumen dan Alat Penelitian

Instrumen utama dalam penelitian ini adalah kuesioner dan lembar wawancara/observasi, yang dilengkapi dengan perangkat analisis statistik.

1. Instrumen Penelitian

- a) Kuesioner disusun menggunakan skala Likert 1–5 dengan tujuan :
 - Pada (RM 1) : menilai hubungan antar variabel desain dan constructability.
 - Pada (RM 2) : menilai pengaruh sub-variabel desain terhadap constructability.
- b) Wawancara dan Observasi lapangan digunakan untuk mengumpulkan informasi terkait dampak perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi (RM 3), terutama aspek kemudahan implementasi.

2. Alat Penelitian

- a) SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) digunakan untuk uji instrumen, uji asumsi klasik, analisis korelasi pearson, dan regresi linear berganda, yang menjawab RM 1 dan RM 2.
- b) Microsoft Excel digunakan untuk pengolahan data awal dan statistik deskriptif.
- c) Dokumen proyek (RAB, jadwal, laporan perubahan desain, gambar teknis) digunakan untuk analisis komparatif dalam menjawab RM 3.

2.3.3 Rancangan Kuisisioner

Kuesioner disusun untuk memperoleh data primer dari responden yang terlibat dalam Proyek Bendungan Jenelata, yaitu pemilik proyek, konsultan perencanaan, konsultan supervisi, dan kontraktor. Instrumen ini menggunakan skala Likert 1–5, dengan tujuan utama:

1. Menilai hubungan antara faktor-faktor proses desain dengan tingkat constructability (RM 1). Responden memberikan penilaian terhadap keterkaitan variabel.
2. Mengukur pengaruh masing-masing sub-variabel desain terhadap peningkatan constructability (RM 2). Responden menilai sejauh mana variabel tersebut memengaruhi efisiensi, kemudahan pelaksanaan, serta keberhasilan proyek.

Tabel 3. Skala Pengukuran Variabel

1	2	3	4	5
Sangat Tidak Berpengaruh	Kurang Berpengaruh	Cukup Berpengaruh	Berpengaruh	Sangat Berpengaruh

Sumber : Sugiyono 2013

Untuk Rumusan Masalah 3 (RM 3) mengenai perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi, data tidak diperoleh melalui kuesioner melainkan melalui wawancara, observasi lapangan, dan dokumen proyek (RAB, jadwal, laporan perubahan desain). Hal ini dilakukan agar penilaian lebih kontekstual dan berbasis data teknis lapangan.

2.3.4 Identifikasi Variabel Penelitian

Berdasarkan studi literatur dan penelitian terdahulu, penelitian ini mengidentifikasi dua kelompok variabel utama, yaitu proses desain dan constructability, yang digunakan untuk menjawab RM 1 dan RM 2.

1. Variabel Proses Desain (10 sub-variabel): keterlibatan pemangku kepentingan, desain iteratif, integrasi BIM, dokumentasi desain, standardisasi, perencanaan waktu desain, kolaborasi lintas disiplin, kejelasan tujuan proyek, desain berkelanjutan, dan modularisasi.
2. Variabel Constructability (7 sub-variabel): kemudahan implementasi, koordinasi lintas disiplin, kualitas spesifikasi, partisipasi konstruksi sejak awal, manajemen waktu & risiko desain, toleransi terhadap kondisi lapangan, serta evaluasi ulang selama proyek.

Total terdapat 17 sub-variabel yang digunakan dalam penyusunan kuesioner. Untuk RM 3, difokuskan pada dampak perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi. Variabel yang diamati meliputi:

1. Constructability : kemudahan implementasi, kebutuhan alat, fleksibilitas metode.
2. Biaya : perbandingan RAB awal dan perubahan.
3. Waktu : perbedaan antara rencana dan realisasi pekerjaan.

Dengan identifikasi ini, penelitian mampu menilai baik aspek hubungan dan pengaruh variabel desain terhadap constructability (RM1 & RM2) maupun dampak perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi (RM3).

Tabel 4. Variabel dan Sub-variable Penelitian Berdasarkan Kajian Literatur.

No	Variabel	Sub-Variabel	Penjelasan	Referensi
X1	Proses Desain	Keterlibatan Pemangku Kepentingan	Keterlibatan pemilik proyek, konsultan, dan kontraktor sejak tahap awal desain memungkinkan pertukaran informasi teknis yang lebih baik sehingga desain menjadi lebih realistis dan mudah diimplementasikan.	Trigunarsyah (2004); Liu et al. (2021)
X2	Proses Desain	Desain Iteratif dan Adaptif	Proses desain yang dilakukan secara berulang dan adaptif terhadap masukan lapangan memungkinkan perbaikan desain secara bertahap sehingga meningkatkan kualitas perencanaan konstruksi.	Apriliani & Adi (2017); Sánchez-Silva & Calderón-Guevara (2022)
X3	Proses Desain	Integrasi Teknologi Desain (BIM)	Pemanfaatan <i>Building Information Modelling</i> (BIM) memungkinkan integrasi data desain secara digital, meningkatkan koordinasi lintas disiplin, dan mendeteksi konflik desain secara dini.	Suminto (2020); Wangchuk et al. (2024); Abdulfattah et al. (2023)
X4	Proses Desain	Dokumentasi dan Kejelasan Desain	Dokumentasi desain yang jelas dan lengkap membantu mengurangi ambiguitas dalam implementasi konstruksi serta meningkatkan kualitas komunikasi antar tim proyek.	Wang et al. (2016); Amies et al. (2025)
X5	Proses Desain	Standardisasi dan Modularisasi	Penggunaan standar desain dan komponen modular mempermudah proses konstruksi, meningkatkan efisiensi, serta mengurangi risiko kesalahan implementasi.	Amies et al. (2025); Willebrand et al. (2024)
X6	Proses Desain	Perencanaan Waktu Desain	Perencanaan jadwal desain yang baik memungkinkan sinkronisasi antara proses desain dan konstruksi sehingga meminimalkan potensi perubahan desain saat pelaksanaan proyek.	Smith et al. (2023); Wang et al. (2016)
X7	Proses Desain	Kolaborasi Antar Disiplin	Kolaborasi antara berbagai disiplin teknik seperti sipil, geoteknik, hidrologi, dan konstruksi sangat penting untuk menghasilkan desain yang komprehensif dan dapat dilaksanakan.	Liu et al. (2021); Wangchuk et al. (2024)
X8	Proses Desain	Kejelasan Tujuan Proyek	Kejelasan tujuan proyek sejak awal membantu seluruh pihak memahami target teknis, biaya, dan waktu sehingga desain dapat disusun secara lebih terarah.	Amies et al. (2025)
X9	Proses Desain	Desain Berkelanjutan	Desain berkelanjutan mempertimbangkan aspek lingkungan, efisiensi sumber daya, serta keberlanjutan	Willebrand et al. (2024)

No	Variabel	Sub-Variabel	Penjelasan	Referensi
			operasional proyek dalam jangka panjang.	
X10	Proses Desain	Desain Modular	Desain modular memungkinkan komponen konstruksi dibuat secara terstandar sehingga mempermudah proses pembangunan dan meningkatkan efisiensi konstruksi.	Amies et al. (2025)
Y1	Constructability	Kemudahan Implementasi	Menunjukkan sejauh mana desain dapat dilaksanakan dengan mudah menggunakan metode konstruksi yang tersedia serta sumber daya yang ada.	Apriliani & Adi (2017); Trigunaryah (2004)
Y2	Constructability	Koordinasi Lintas Disiplin	Tingkat koordinasi antara tim desain, konstruksi, dan manajemen proyek dalam melaksanakan pekerjaan konstruksi secara terpadu.	Liu et al. (2021); Wang et al. (2016)
Y3	Constructability	Kualitas dan Ketepatan Spesifikasi	Spesifikasi teknis yang jelas dan akurat membantu mengurangi kesalahan interpretasi dan meningkatkan kualitas pelaksanaan konstruksi.	Amies et al. (2025)
Y4	Constructability	Partisipasi Konstruksi Sejak Awal	Keterlibatan pihak konstruksi dalam tahap perencanaan memungkinkan identifikasi kendala konstruksi sejak awal sehingga desain menjadi lebih implementatif.	Trigunaryah (2004); Liu et al. (2021)
Y5	Constructability	Manajemen Waktu dan Risiko Desain	Kemampuan desain dalam mempertimbangkan jadwal proyek serta potensi risiko teknis yang dapat mempengaruhi pelaksanaan konstruksi.	Smith et al. (2023); Aslam et al. (2019)
Y6	Constructability	Toleransi terhadap Variasi Lapangan	Desain yang baik harus mampu menyesuaikan dengan variasi kondisi lapangan seperti kondisi geoteknik atau lingkungan yang berubah.	Sánchez-Silva & Calderón-Guevara (2022); Wang et al. (2022)
Y7	Constructability	Evaluasi Ulang Selama Proyek	Evaluasi desain secara berkala selama proyek berlangsung memungkinkan penyesuaian desain agar tetap sesuai dengan kondisi aktual proyek.	Ramadhan & Waty (2025); Abdulfattah et al. (2023)

Sumber : Studi literatur peneliti, 2025

2.3.5 Penyebaran Kuisisioner

Kuesioner penelitian disebarikan kepada tenaga ahli yang terlibat langsung dalam **Proyek Bendungan Jenelata**, meliputi pihak **pemilik proyek (owner)**, **konsultan perencana**, **konsultan supervisi**, dan **kontraktor pelaksana**. Metode pengambilan sampel dilakukan secara **purposive sampling**, yaitu dengan memilih responden yang memiliki **pengalaman, keahlian, dan keterlibatan langsung** dalam tahapan desain maupun pelaksanaan konstruksi proyek.

Jumlah responden yang ditargetkan dalam penelitian ini adalah **25–30 orang**, yang dianggap telah mewakili seluruh pemangku kepentingan utama dalam proyek. Pemilihan jumlah tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa penelitian ini menggunakan pendekatan **expert judgement**, di mana kualitas dan kompetensi responden lebih diutamakan daripada jumlahnya. Responden dipilih berdasarkan **posisi dan tanggung jawab teknisnya** dalam proyek, sehingga mampu memberikan pandangan profesional terkait hubungan antara variabel desain dan *constructability*. Penyebaran kuesioner dilakukan melalui dua metode:

1. **Daring (online)** menggunakan *Google Form* untuk responden yang berada di luar lokasi proyek dan sulit dijangkau secara langsung.
2. **Luring (offline)** melalui formulir cetak untuk responden yang berada di lapangan proyek, seperti pihak kontraktor dan konsultan supervisi.

Kuesioner ini digunakan secara khusus untuk menjawab dua rumusan masalah utama:

- **RM1:** Mengidentifikasi hubungan antara variabel desain dan *constructability* (melalui uji korelasi).
- **RM2:** Menganalisis pengaruh sub-variabel desain terhadap *constructability* (melalui uji regresi linear berganda).

Sementara itu, **RM3 (Perubahan proteksi lereng)** tidak diukur menggunakan kuesioner, melainkan melalui **wawancara mendalam, observasi lapangan, dan telaah dokumen proyek**, agar hasilnya lebih kontekstual dan berbasis data lapangan aktual.

Tabel 5. Daftar Sampel Penelitian

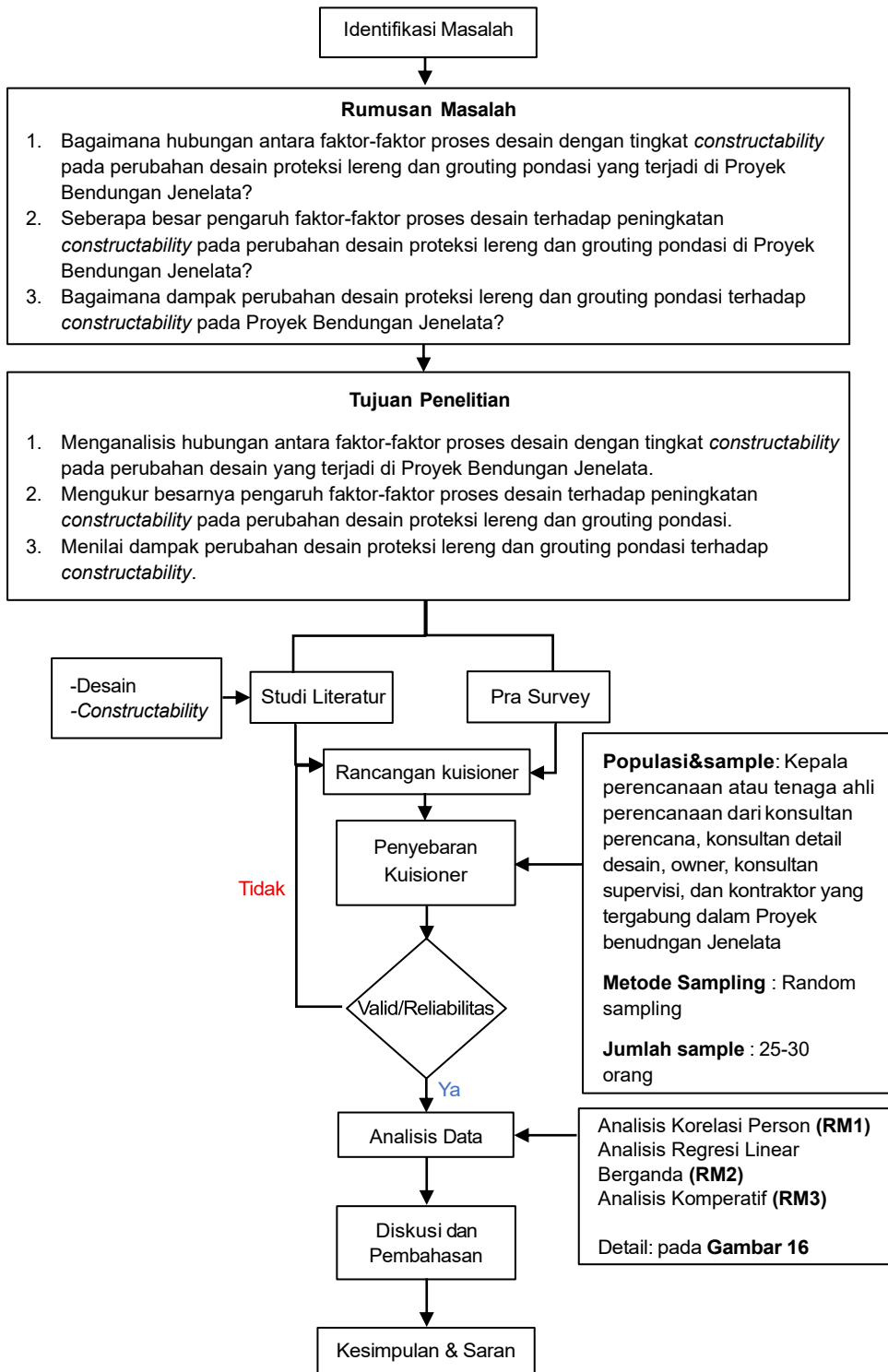
No	Position	Asal	Instansi
1	Satker (Pemilik Pekerjaan/Owner)	Indonesia	Kementrian PU, BBWS Pompengan Jeneberang
2	PPK Perencanaan (Pemilik Pekerjaan/Owner)	Indonesia	
3	PPK Fisik (Pemilik Pekerjaan/Owner)	Indonesia	
4	Pelaksana Teknik (Pemilik Pekerjaan/Owner)	Indonesia	
5	Direksi (Pemilik Pekerjaan/Owner)	Indonesia	Yellow River Engineer Consulting Co., Ltd
6	Team Leader (Konsultan Perencana & Detail Desain)	China	
7	Tenaga Ahli - DAM Enginer (Konsultan Perencana & Detail Desain)	China	

No	Position	Asal	Instansi
8	Tenaga Ahli - Struktural Enginer (Konsultan Perencana & Detail Desain)	China	Hilmi Anugrah – Yodya Karya (Persero) – Disiplan Consult- Raya Konsult – Binatama Wirawredha, KSO
9	Tenaga Ahli - Geologist Engineer (Konsultan Perencana & Detail Desain)	China	
10	Tenaga Ahli - Instrumentation Engineer (Konsultan Perencana & Detail Desain)	China	
11	Team Leader (Konsultan Supervisi)	Ethiopia	
12	Tenaga Ahli - DAM Enginer (Konsultan Supervisi)	Ethiopia	
13	Tenaga Ahli - Struktural Enginer (Konsultan Supervisi)	Indonesia	
14	Tenaga Ahli - Geologist Engineer (Konsultan Supervisi)	Indonesia	China Camc Engineering Co., Ltd
15	Tenaga Ahli - Instrumentation Engineer (Konsultan Supervisi)	Indonesia	
16	Project Manager	China	
17	Deputy Project Manager	China	
18	Site Manager	China	
19	Construction Engineer	China	
20	DAM Engineer	China	Adhi Karya
21	Project Manager	Indonesia	
22	Project Engineering Manager	Indonesia	
23	Project Construction Manager	Indonesia	
24	Geotecnical Engineer	Indonesia	
25	Construction Engineer	Indonesia	
26	Project Manager	Indonesia	Wijaya Karya
27	Project Engineering Manager	Indonesia	
28	Project Construction Manager	Indonesia	
29	Geotecnical Engineer	Indonesia	
30	Construction Engineer	Indonesia	

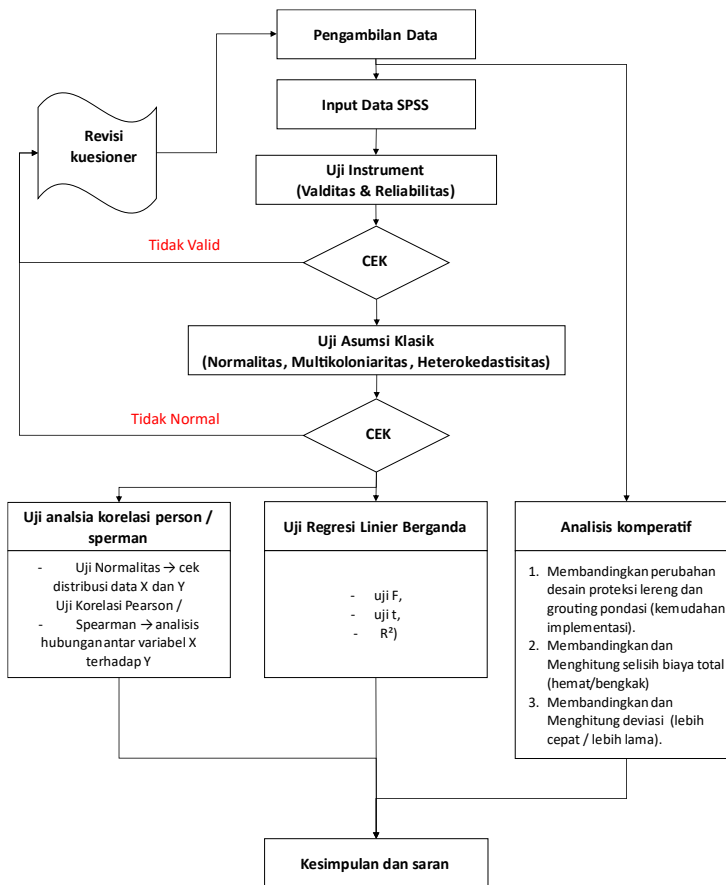
2.4 Metode Pengolahan data

Data penelitian ini diolah dengan analisis deskriptif kuantitatif dan kualitatif untuk menilai keterkaitan proses desain dengan peningkatan *constructability*. Selain itu, digunakan analisis komparatif terhadap perubahan desain proteksi lereng dan grouting pondasi, dengan fokus pada kapasitas produksi, durasi, biaya, dan kemudahan pelaksanaan.

Hasil analisis diharapkan dapat menunjukkan perubahan desain yang lebih efisien serta mendukung *constructability*, sekaligus menjadi bahan pertimbangan teknis dalam pemilihan desain proteksi lereng dan grouting pondasi pada proyek bendungan atau proyek serupa. Proses tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 15. Diagram Alir Tahapan Penelitian, sedangkan alur pengolahan data digambarkan pada Gambar 16. Diagram Alir Analisis Data.



Gambar 15. Diagram Alir Tahapan Penelitian.



Gambar 16. Diagram Alir Analisis Data.

2.4.1 Uji Instumentasi

2.4.1.1 Uji Validasi

Uji validitas dilakukan untuk memastikan bahwa butir pertanyaan dalam kuesioner benar-benar mampu mengukur variabel yang diteliti. Validitas diukur menggunakan korelasi Pearson Product Moment (Ghozali, 2019), dengan rumus :

$$r = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Dimana :

r = Koefisien Korelasi

n = Jumlah sampel

X = Skor per item

Y = Skor total setiap item

Kriteria validasi suatu pertanyaan dapat ditentukan jika :

- $r \text{ hitung} > r \text{ table}$, maka pertanyaan yang diajukan dinyatakan valid.
- $r \text{ hitung} < r \text{ table}$, maka pertanyaan yang diajukan dinyatakan tidak valid.

Dengan uji ini, setiap butir kuesioner dipastikan relevan terhadap konstruk variabel, sehingga analisis yang dilakukan pada tahap selanjutnya memiliki dasar yang sah.

2.4.1.2 Uji Reliabilitas

Uji Uji reliabilitas mengukur konsistensi internal antar butir pertanyaan dalam kuesioner. Instrumen dikatakan reliabel jika menghasilkan jawaban yang konsisten ketika digunakan dalam kondisi yang serupa. Pengujian dilakukan dengan metode Cronbach's Alpha, yang dihitung dengan rumus:

$$r = \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(1 - \frac{\sum \sigma_b^2}{\sigma_t^2} \right)$$

Dimana :

σ_t^2 = Varian total

$\sum \sigma_b^2$ = Jumlah varian butir

k = Jumlah butir pertanyaan

r = Koefisien reliabilitas instrumen

Menurut Ghazali (2014), nilai Cronbach's Alpha $> 0,60$ menandakan reliabilitas yang dapat diterima. Interpretasinya:

Tabel 6. Interpretasi Reliabilitas

Nilai alpha cronbach	Interprestasi Konsintensi
0.00 – 0.20	Kurang Reliabel
0.21 – 0.40	Agak Kurang Reliabel
0.41 – 0.60	Cukup Reliabel
0.61 – 0.80	Reliabel
0.81 – 1.00	Sangat Reliabel

Sumber : Ghazali 2014

Dengan uji ini, instrumen dipastikan stabil dan dapat dipercaya, sehingga hasil kuesioner benar-benar representatif untuk menjawab RM1 dan RM2.

2.4.2 Uji Asumsi Klasik

Uji asumsi klasik dilakukan sebelum melakukan analisis regresi linier berganda. Tujuan uji ini adalah untuk memastikan bahwa data penelitian memenuhi asumsi-asumsi dasar statistik, sehingga model regresi yang digunakan dapat menghasilkan estimasi yang tidak bias (Best Linear Unbiased Estimator — BLUE). Uji asumsi klasik dalam penelitian ini terdiri atas uji normalitas, uji multikolinearitas, dan uji heteroskedastisitas.

2.4.2.1 Uji Normalitas

Uji normalitas bertujuan untuk mengetahui apakah data residual dalam model regresi berdistribusi normal atau tidak. Model regresi yang baik memiliki residual yang menyebar secara normal di sekitar nilai rata-rata nol. Dalam penelitian ini, uji normalitas akan dilakukan dengan dua pendekatan:

1. Analisis Grafik (Histogram dan P–P Plot):
Distribusi residual akan dilihat melalui histogram dan grafik Normal P–P Plot. Data dikatakan berdistribusi normal apabila pola histogram membentuk kurva lonceng (bell-shaped) dan titik-titik pada grafik P–P Plot menyebar di sekitar garis diagonal.
2. Uji Statistik Kolmogorov–Smirnov (K–S):
Uji ini digunakan untuk mengukur sejauh mana distribusi data mendekati distribusi normal. Kriteria pengujiannya adalah:
 - a) Jika nilai **Asymp. Sig (2-tailed) > 0,05**, maka data residual berdistribusi normal.
 - b) Jika nilai **Asymp. Sig < 0,05**, maka data residual tidak berdistribusi normal.

Melalui uji ini, diharapkan data residual memenuhi asumsi normalitas sehingga hasil regresi dapat diinterpretasikan secara sah.

2.4.2.2 Uji Multikolinearitas

Uji multikolinearitas bertujuan untuk menguji apakah terdapat hubungan linier yang tinggi antara variabel independen dalam model regresi. Model regresi yang baik seharusnya bebas dari multikolinearitas, karena adanya korelasi kuat antarvariabel bebas dapat menyebabkan koefisien regresi menjadi tidak stabil dan sulit diinterpretasikan.

Dalam penelitian ini, uji multikolinearitas dilakukan dengan melihat nilai Variance Inflation Factor (VIF) dan Tolerance yang dihasilkan oleh SPSS. Kriteria pengujian sebagai berikut:

1. Jika Tolerance > 0,10 dan VIF < 10, maka model bebas multikolinearitas.
2. Jika Tolerance ≤ 0,10 dan VIF ≥ 10, maka model mengalami multikolinearitas.

Apabila ditemukan gejala multikolinearitas, maka akan dilakukan pengecekan ulang terhadap variabel independen yang memiliki korelasi tinggi untuk menentukan apakah perlu dilakukan penggabungan atau penghapusan variabel tertentu.

2.4.2.3 Uji Heteroskedastisitas

Uji heteroskedastisitas dilakukan untuk mengetahui apakah varians dari residual dalam model regresi bersifat konstan atau tidak. Model regresi yang baik harus memiliki varians residual yang sama untuk semua observasi (homoskedastisitas). Sebaliknya, jika varians residual tidak konstan, maka terjadi heteroskedastisitas yang dapat menurunkan validitas hasil uji regresi.

Dalam penelitian ini, uji heteroskedastisitas dilakukan menggunakan dua pendekatan:

1. Analisis Grafik (Scatterplot):

Dengan melihat penyebaran titik antara nilai prediksi (ZPRED) dan residual (SRESID). Jika titik-titik menyebar secara acak di atas dan di bawah sumbu nol tanpa membentuk pola tertentu, maka tidak terjadi heteroskedastisitas.

2. Uji Glejser:

Uji ini dilakukan dengan meregresi nilai absolut residual terhadap variabel independen. Kriteria pengujian:

- a) Jika nilai **Sig. > 0,05**, maka tidak terjadi heteroskedastisitas.
- b) Jika nilai **Sig. < 0,05**, maka terjadi heteroskedastisitas.

Dengan uji ini, diharapkan model regresi yang digunakan memenuhi asumsi homoskedastisitas sehingga hasil estimasi menjadi efisien dan tidak bias.

2.4.3 Hubungan proses desain dengan *constructability*.

Untuk menilai hubungan linier antara variabel proses desain (X) dengan *constructability* (Y), digunakan analisis korelasi. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui arah dan tingkat kekuatan hubungan antara kedua variabel tersebut, apakah memiliki hubungan positif, negatif, atau tidak memiliki hubungan sama sekali.:

- a. H_0 : Tidak ada hubungan signifikan antara variabel X dan variabel Y.
- b. H_1 : Ada hubungan signifikan antara variabel X dan variabel Y.

Pengambilan keputusan dilakukan dengan membandingkan nilai p-value (signifikansi) dengan $\alpha = 0,05$.

- Jika $p > 0,05 \rightarrow$ hubungan tidak signifikan $\rightarrow H_0$ diterima
- Jika $p < 0,05 \rightarrow$ hubungan signifikan $\rightarrow H_0$ ditolak, H_1 diterima

Kekuatan hubungan diukur dari koefisien korelasi (r), dengan interpretasi (Rustam et al., 2018):

Tabel 7. Interpretasi Nilai Korelasi Pearson

Koefisien Korelasi (r)	Tingkat Hubungan
0.00 – 0.19	Sangat Lemah
0.20 – 0.39	Lemah
0.40 – 0.59	Cukup
0.60 – 0.79	Kuat
0.80 – 1.00	Sangat Kuat

Sumber : Rustam, Sari, & Yunita (2018)

Analisis ini digunakan untuk menjawab **RM1**, yaitu bagaimana hubungan antara faktor desain dengan tingkat *constructability*.

2.4.4 Pengaruh proses desain terhadap *constructability*.

Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variabel proses desain terhadap *constructability*, digunakan analisis regresi linear berganda. Analisis ini bertujuan untuk mengukur tingkat hubungan dan kontribusi masing-masing variabel desain terhadap peningkatan *constructability* pada proyek konstruksi.:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon$$

Dimana :

- Y = *Constructability*, variabel dependen yang ingin diprediksi
- $X_1, X_2, \dots, X_n$ = Sub-variabel desain, yang merupakan variabel independen.
- α = Konstanta
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ = Koefisien regresi, menunjukkan besarnya pengaruh setiap subvariabel desain terhadap *constructability*.
- ϵ = Error term, yang menggambarkan perbedaan antara nilai yang diprediksi dan nilai aktual

Pengujian dilanjutkan dengan:

1. Uji F → menguji pengaruh simultan semua variabel independen.
2. Uji t → menguji pengaruh parsial masing-masing sub-variabel..
3. Koefisien Determinasi (R^2) → mengukur seberapa besar variasi *constructability* dapat dijelaskan oleh variabel desain.

Analisis ini menjawab **RM2**, yaitu seberapa besar pengaruh variabel desain terhadap peningkatan *constructability*.

2.4.5 Dampak perubahan desain pelaksanaan proteksi lereng dan grouting pondasi.

Kajian dampak perubahan desain pada Proyek Bendungan Jenelata dilakukan untuk menjawab Rumusan Masalah 3 (RM3), yaitu menilai sejauh mana perubahan desain yang terjadi selama pelaksanaan memengaruhi aspek teknis, biaya, waktu, serta tingkat *constructability* di lapangan. Dua perubahan desain utama yang dianalisis adalah perubahan metode proteksi lereng dan perubahan sistem grouting pondasi, yang keduanya memiliki hubungan erat dengan kemudahan pelaksanaan dan efisiensi konstruksi.

Penilaian terhadap dampak perubahan ini dilakukan melalui analisis komparatif, dengan membandingkan hasil pelaksanaan antara desain awal dan desain hasil modifikasi untuk memperoleh gambaran efektivitas dan efisiensi metode yang diterapkan. Tahapan analisis meliputi:

1. Identifikasi Item Pekerjaan dari kontrak, gambar desain, dan RAB.
 - a) Perubahan proteksi lereng

Perubahan desain dari frame beam + hydroseeding menjadi geomat type III dilakukan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi pelaksanaan di lapangan. Metode awal menggunakan struktur rangka beton (frame beam) yang dilengkapi dengan penyemprotan vegetasi

(hydroseeding). Meskipun secara teknis kuat, metode ini membutuhkan pekerjaan tambahan berupa pembesian, bekisting, pengecoran, dan proses perawatan vegetasi yang cukup lama.

Dalam pelaksanaan di lapangan, kondisi lereng yang terjal dan tidak seragam menyebabkan kesulitan dalam pemasangan bekisting dan penempatan alat berat. Oleh karena itu, metode diganti menjadi geomat type III, yang lebih ringan, fleksibel, dan dapat mengikuti kontur lereng. Pekerjaan meliputi pemasangan lembaran geomat sintetis, pemasangan angkur, serta penanaman vegetasi (taplok) di atas lapisan geomat.

b) Perubahan pola grouting pondasi bendungan

Perubahan desain grouting pondasi dari pola vertikal menjadi pola rim grouting dilakukan sebagai respon terhadap kondisi geoteknik lapangan, khususnya di area tepi (abutment) maindam yang memiliki kemiringan curam. Pada desain awal, pola vertikal digunakan untuk pengeboran lubang injeksi tegak lurus terhadap pondasi, yang efektif di area datar dan batuan homogen. Namun, pelaksanaan di medan miring menjadi sulit karena alat bor sulit diposisikan dan membutuhkan andang-andang tambahan. Melalui modifikasi desain, diterapkan pola rim grouting, di mana arah pengeboran dibuat miring mengikuti kontur lereng dan orientasi rekahan batuan. Pola ini memungkinkan pekerjaan dilakukan dari satu titik di area sudut pondasi, sehingga menjangkau area injeksi yang lebih luas tanpa memerlukan platform tambahan.

2. Pengumpulan Data

- a) Teknis: kapasitas produksi alat dihitung dari parameter kapasitas siklus (V), faktor efisiensi (Fa), dan waktu siklus (T_s).
- b) Biaya: data harga satuan diambil dari RAB untuk menghitung total biaya.
- c) Kemudahan konstruksi: diperoleh dari dokumen teknis (gambar desain, metode pelaksanaan, dan spesifikasi teknis), observasi lapangan (akses, topografi, kondisi lereng), serta wawancara dengan pihak kontraktor dan konsultan. Data ini digunakan untuk menilai tingkat kompleksitas, kebutuhan peralatan, fleksibilitas, serta koordinasi pekerjaan.

3. Perhitungan Waktu

- a) Kapasitas produksi dihitung dengan rumus :

$$Q = \frac{V \times Fa \times 60}{T_s}$$

- b) Dari nilai Q , dihitung kapasitas produksi per hari dan kemudian ditentukan total durasi tiap item pekerjaan

$$\text{Durasi(hari)} = \frac{\text{Volume}}{\text{Produktifitas Harian}}$$

- c) Durasi total metode dihitung berdasarkan urutan (sequence) pekerjaan, bukan hanya penjumlahan, untuk merepresentasikan kondisi aktual lapangan.

4. Perhitungan Biaya

- a) Setiap item pekerjaan dihitung:

$$\text{Jumlah Harga} = \text{Volume} \times \text{Harga satuan}$$

- b) Total biaya metode dihitung dengan menjumlahkan seluruh item pekerjaan yang relevan.
c) Selisih biaya antar metode dianalisis dalam bentuk nilai absolut (Rp) dan persentase (%).

5. Analisis Constructability

Analisis kualitatif dilakukan dengan membandingkan tingkat kompleksitas tiap metode berdasarkan:

- a) Jumlah item pekerjaan.
b) Tingkat kebutuhan alat khusus.
c) Fleksibilitas terhadap kondisi lapangan.
d) Kebutuhan koordinasi antar pekerjaan.

Hasil perbandingan dituangkan dalam bentuk tabel aspek konstruktabilitas.