

**ANALISIS *EXTENDED LIFE* BERDASARKAN EVALUASI KEKUATAN
STRUKTUR *PILE CAP* DAN *TIE BEAM* DENGAN PENDEKATAN *NON-
DESTRUCTIVE TEST* SERTA BIAYA SIKLUS HIDUPNYA**

**(Studi Kasus: Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional
Panjang)**

(Skripsi)

Oleh

**MUHAMMAD HANIF IRSYADUDDIN
NPM. 1915011046**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISIS *EXTENDED LIFE* BERDASARKAN EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR *PILE CAP* DAN *TIE BEAM* DENGAN PENDEKATAN *NON-DESTRUCTIVE TEST* (NDT) SERTA BIAYA SIKLUS HIDUPNYA (STUDI KASUS: GUDANG BIRU PT PELABUHAN INDONESIA (PERSERO) REGIONAL PANJANG)

Oleh

MUHAMMAD HANIF IRSYADUDDIN

Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang saat ini telah berusia 25 tahun yang menyisakan umur layan 25 tahun lagi. Kondisi saat ini terjadi penurunan lantai yang mengakibatkan perubahan kondisi perilaku struktur. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan opsi perbaikan gudang yang tepat dan ekonomis. Penelitian dilakukan dengan pengujian menggunakan metode *Non-Destructive Test* (NDT) seperti *hammer test* dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) *test*. Hasil analisis struktur eksisting dengan ETABS 20 didapatkan bahwa terdapat 2 elemen struktur yaitu kolom pedestal (100 x 100) cm, dan kolom pedestal (60 x 100) cm melebihi kapasitas rasio. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan pada struktur tersebut. Hasil perkuatan dengan metode *grouting*, untuk kolom pedestal (100 x 100) cm mengalami peningkatan kapasitas sebesar 85,15%, dan untuk kolom pedestal (60 x 100) cm sebesar 141,25%. Sedangkan, dengan metode FRP *wrapping* didapatkan peningkatan kapasitas pada kolom pedestal (100 x 100) cm sebesar 100,35%, dan pada kolom pedestal (60 x 100) cm sebesar 196,43%. Selanjutnya, dilakukan analisis biaya siklus hidupnya menggunakan 6 skenario dengan parameter *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PR). Hasil analisis didapatkan skenario terbaik pada skenario 2 dengan NPV, BCR, IRR, dan PP sebesar Rp11.304.865.113,30., 1,35., 14,19%, dan 14 tahun. Keenam skenario telah menunjukkan hasil bahwa proyek perbaikan Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya karena telah memenuhi syarat yaitu $NPV > 0$, $BCR > 1$, $IRR > rate\ of\ return$, dan $PP < umur\ ekonomis$.

Kata kunci: *Non-Destructive Test* (NDT), *grouting*, *Fiber Reinforced Polymer* (FRP), Biaya Siklus Hidup

ABSTRACT

EXTENDED LIFE ANALYSIS BASED ON STRUCTURAL STRENGTH EVALUATION OF PILE CAP AND TIE BEAM WITH NON- DESTRUCTIVE TEST (NDT) AND ITS LIFE CYCLE COST ANALYSIS. (CASE STUDY: THE BLUE WAREHOUSE OF PT PELABUHAN INDONESIA (PERSERO) REGIONAL PANJANG)

By

MUHAMMAD HANIF IRSYADUDDIN

The Blue Warehouse of PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang is currently 25 years old which has left a service life of 25 years. The current condition has caused floor settlement which has resulted in changes in structural behaviour. This research aims to provide appropriate and economical warehouse repair options. The research was conducted by testing using Non-Destructive Test (NDT) methods such as hammer test and Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) test. The results of the analysis of the existing structure with ETABS 20 found that there were 2 structural elements, the pedestal column (100 x 100) cm, and the pedestal column (60 x 100) cm exceeding the capacity ratio. Therefore, strengthening of the structure is required. The result of strengthening with grouting method, for pedestal column (100 x 100) cm has increased capacity to 85.15%, and for pedestal column (60 x 100) cm to 141.25%. In FRP wrapping method, the capacity increase for pedestal column (100 x 100) cm was 100.35%, and for pedestal column (60 x 100) cm was 196.43%. Furthermore, a life cycle cost analysis was analyzed using 6 scenarios with the parameters of Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period (PR). The results of the analysis found the best scenario in scenario 2 with NPV, BCR, IRR, and PP of Rp11.304.865.113,30., 1,08., 14,19%, and 14 years. The six scenarios have shown the results that the renovation project of the Blue Warehouse of PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang can be continued to the next stage because it has fulfilled the requirements, such as $NPV > 0$, $BCR > 1$, $IRR >$ rate of return, and $PP <$ economic life.

Keywords: Non-Destructive Test (NDT), grouting, Fiber Reinforced Polymer (FRP), Life Cycle Cost

**ANALISIS *EXTENDED LIFE* BERDASARKAN EVALUASI KEKUATAN
STRUKTUR *PILE CAP* DAN *TIE BEAM* DENGAN PENDEKATAN *NON-
DESTRUCTIVE TEST* (NDT) SERTA BIAYA SIKLUS HIDUPNYA**

**(Studi Kasus: Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional
Panjang)**

Oleh

MUHAMMAD HANIF IRSYADUDDIN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Program Studi S1 Teknik Sipil
Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi

: **ANALISIS *EXTENDED LIFE* BERDASARKAN
EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR *PILE CAP*
DAN *TIE BEAM* DENGAN PENDEKATAN
NON-DESTRUCTIVE TEST (NDT) SERTA
BIAYA SIKLUS HIDUPNYA (Studi Kasus:
Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia
(Persero) Regional Panjang)**

Nama Mahasiswa

: **Muhammad Hanif Irsyaduddin**

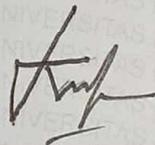
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915011046

Program Studi : S1 Teknik Sipil

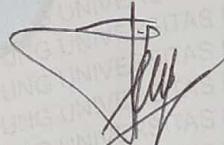
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

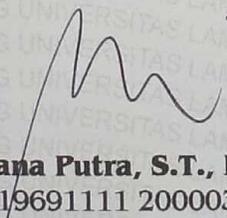


Ir. Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19720513 200312 1 002



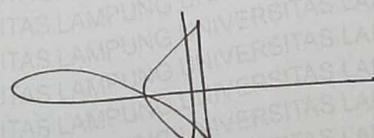
Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.
NIP 19720308 199802 1 004

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil



Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

3. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

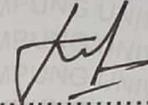


Dr. Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

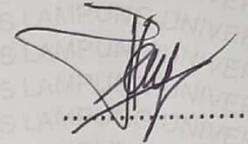
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

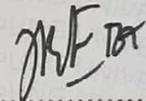
Ketua : **Ir. Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D.**



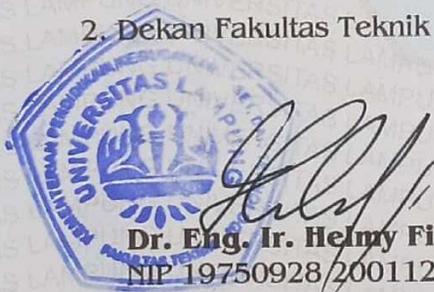
Sekretaris : **Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Ir. Ika Kustiani, S.T., M.Eng.Sc.,
Ph.D., IPM., ASEAN Eng.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP 19750928/200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **09 Agustus 2024**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Muhammad Hanif Irsyaduddin
NPM : 1915011046
Program Studi : S1 Teknik Sipil
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi yang berjudul "***Analisis Extended Life Berdasarkan Evaluasi Kekuatan Struktur Pile Cap dan Tie Beam dengan Pendekatan Non-Destructive Test*** serta **Biaya Siklus Hidupnya (Studi Kasus: Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang)**" tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang sepengetahuan saya tidak juga terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka. Ide penelitian didapat dari Pembimbing I, oleh karena itu baik atas data penelitian berada pada Saya dan Pembimbing I, Ir. Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D.

Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung,

2024

Penulis,



Muhammad Hanif Irsyaduddin

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir pada tanggal 11 Juli 2000 di Kota Tangerang, Provinsi Banten. Lahir dari pasangan bapak Dadang Suherman dan ibu Tini Kartini, serta merupakan anak kedua dari empat bersaudara. Riwayat pendidikan dimulai dari tingkat Sekolah Dasar yaitu di SD Islam At-Taqwa Garuda. Kemudian dilanjutkan pada pendidikan tingkat menengah pertama yaitu di MTS Negeri 1 Kota Tangerang. Kemudian dilanjutkan pada pendidikan tingkat menengah atas yaitu di SMA Negeri 6 Kota Tangerang.

Pada tahun 2019 melanjutkan pendidikan di Perguruan Tinggi Negeri, tepatnya di Universitas Lampung sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Sipil melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, juga aktif melakukan beberapa kegiatan antara lain:

1. Menjadi anggota departemen Kerohanian dan Keolahragaan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) pada periode 2020/2021
2. Menjadi kepala departemen Kajian dan Syiar Islam Keumatan Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik pada periode 2021
3. Menjadi ketua divisi Kerohanian pada departemen Kerohanian dan Keolahragaan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) pada periode 2021/2022
4. Menjadi anggota divisi perlengkapan pada kepanitiaan *Civil Brings Revolution* (CBR) tahun 2022
5. Melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sukajadi, Kecamatan Carita, Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten pada tahun 2022
6. Melaksanakan Kerja Praktik di Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Mesuji Sekampung pada Proyek Pembangunan Pengaman Pantai Muli, Kabupaten Lampung Selatan tahun 2022.
7. Menjadi asisten dosen praktikum Teknologi Bahan pada tahun ajaran 2023/2024.

Pada akhir masa perkuliahan, penulis melaksanakan tanggung jawab sebagai mahasiswa dengan menyelesaikan tugas akhirnya yang berjudul “Analisis *Extended Life* Berdasarkan Evaluasi Kekuatan Struktur *Pile Cap* dan *Tie Beam* dengan Pendekatan *Non-Destructive Test* (NDT) serta Biaya Siklus Hidupnya (Studi Kasus: Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang)”.

MOTTO

“Berdoalah kalian kepada Allah dengan keyakinan bahwa doa tersebut pasti akan dikabulkan. Ketahuilah bahwa Allah tidak akan mengabulkan doa dari hati yang lalai.”

(H.R. Tirmidzi)

“Jangan takut gagal, karena yang tidak pernah gagal adalah orang-orang yang tidak pernah melangkah. Jangan takut salah, karena dengan kesalahan yang pertama kita dapat menambah pengetahuan untuk mencari jalan yang benar pada langkah yang kedua.”

(Buya Hamka)

“When life gets you down, you know what you gotta do?

Just keep swimming.”

(Dorry)

SANWACANA

Segala puji bagi Allah *Rabb* Semesta Alam atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan semua rangkaian penelitian dan penulisan skripsi dengan judul “**Analisis *Extended Life* Berdasarkan Evaluasi Kekuatan Struktur *Pile Cap* dan *Tie Beam* dengan Pendekatan *Non-Destructive Test* (NDT) serta Biaya Siklus Hidupnya (Studi Kasus: Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang)**” dalam rangka memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung. Selesainya rangkaian penelitian dan penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terimakasih ditujukan kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Lampung
4. Bapak Ir. Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak pengetahuan, kritik, saran, arahan, dan bantuan dalam proses penelitian ini
5. Bapak Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan banyak pengetahuan, kritik, saran, arahan, dan bantuan dalam proses penelitian ini
6. Ibu Ir. Ika Kustiani, S.T., M.Eng.Sc., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., selaku Dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun terkait isi penelitian dan penulisan skripsi ini.

7. Bapak Ir. Andius Dasa Putra, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan masukan, saran, dan kritik selama proses akademik di Teknik Sipil Universitas Lampung.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung atas ilmu yang telah diberikan selama proses akademik perkuliahan.
9. Keluarga tercinta, Mamah, Bapak, Kakak, dan kedua Adik yang berada jauh dari tempat saya menuntut ilmu saat ini. Terimakasih yang sebesar-besarnya karena selalu senantiasa mendoakan untuk apapun yang saya jalani sampai hari ini serta terimakasih atas semangat dan dukungan baik moril maupun materil.
10. Rekan-rekan Teknik Sipil Angkatan 2019 yang telah berjuang bersama, berbagi kenangan dan pengalaman tak terlupakan.
11. Terakhir, untuk diri sendiri karena telah mampu berusaha dan berjuang sejauh ini, mampu mengendalikan diri dalam menghadapi setiap masalah yang ada dan tidak pernah memutuskan menyerah meski sesulit apapun proses perkuliahan dengan menyelesaikannya sebaik dan semaksimal mungkin.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, akan tetapi penulis berharap semoga skripsi yang sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Aamiin.

Bandar Lampung,
Penulis,

2024

Muhammad Hanif Irsyaduddin
NPM. 1915011046

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Bangunan Gudang	6
2.2 Struktur Atas (<i>Upper Structure</i>)	7
2.3 Struktur Bawah (<i>Lower Structure</i>)	7
2.3.1 <i>Pile Cap</i>	8
2.3.2 <i>Tie Beam</i>	8
2.4 Pengujian Material Struktur	9
2.5 Pembebanan Struktur	12
2.6 Perbaikan atau Perkuatan Struktur	13
2.7 Estimasi Biaya.....	15
2.8 Biaya Siklus Hidup (<i>Life Cycle Cost</i>)	16
2.9 Konsep Nilai Uang Terhadap Waktu (<i>Time Value of Money</i>).....	19
2.10 <i>Net Present Value</i> (NPV).....	20
2.11 <i>Benefit Cost Ratio</i> (BCR).....	20
2.12 <i>Internat Rate of Return</i> (IRR)	21
2.13 <i>Payback Period</i> (PP)	21
2.14 Referensi Penelitian Terdahulu.....	22
III. METODE PENELITIAN	27
3.1 Lokasi Penelitian	27
3.2 Pengumpulan Data	29
3.3 Tahapan Penelitian	36
3.4 Bagan Alir Penelitian.....	37
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Umum.....	39
4.2 Hasil Investigasi Lapangan	39

4.2.1 Pengamatan Visual	39
4.2.2 Mutu Material Struktur Eksisting.....	42
4.3 Analisis Struktur Eksisting.....	44
4.3.1 Pemodelan Struktur	44
4.3.2 Pembebanan Struktur.....	47
4.3.3 Hasil Analisis Struktur.....	49
4.4 Kapasitas Penampang Struktur Eksisting.....	50
4.5 Analisis Perkuatan Struktur.....	51
4.5.1 Perkuatan <i>Grouting</i>	52
4.5.2 Perkuatan Metode FRP <i>Wrapping</i>	54
4.6 Estimasi Biaya.....	56
4.7 Biaya Siklus Hidup (<i>Life Cycle Cost</i>)	58
4.8 Analisis Kelayakan Investasi.....	63
V. PENUTUP	72
5.1 Kesimpulan.....	72
5.2 Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN A.....
LAMPIRAN B.....
LAMPIRAN C.....
LAMPIRAN D.....
LAMPIRAN E.....
LAMPIRAN F.....

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Kondisi Eksisting Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero). ..	1
Gambar 2. Kondisi Penurunan Tanah Gudang Segmen A.	3
Gambar 3. Kondisi Kerusakan Struktur Gudang.	3
Gambar 4. Penggunaan Hammer Test.	9
Gambar 5. Kurva Korelasi Nilai Pantulan dengan Kuat Tekan Beton.	10
Gambar 6. Penggunaan UPV Test.	11
Gambar 7. SIKA Grout 215 (New)	14
Gambar 8. CFRP Horseen HM-30.	15
Gambar 9. Lokasi Penelitian.	27
Gambar 10. Layout Gudang.	28
Gambar 11. Denah Perletakan Pile Cap dan Tie Beam.	29
Gambar 12. Titik Pengambilan Data Primer.	30
Gambar 13. Pengujian Hammer Test.	31
Gambar 14. Titik Uji Hammer Test pada Kolom.	32
Gambar 15. Titik Uji Hammer Test pada Dinding.	32
Gambar 16. Penyelidikan UPV Test.	33
Gambar 17. UPV Test Metode Direct Transmission pada Kolom.	34
Gambar 18. UPV Test Metode Semi-Direct Transmission pada Kolom.	35
Gambar 19. UPV Test Metode Direct Transmission pada Dinding.	35
Gambar 20. Bagan Alir Penelitian.	38
Gambar 21. Kondisi Lingkungan Sekitar Gudang.	40
Gambar 22. Kondisi Rangka Atap dan Penutup Atap.	40
Gambar 23. Kondisi Struktur Pedestal.	41
Gambar 24. Kondisi Struktur Pelat Lantai.	41

Gambar 25. Define Material Properties.....	44
Gambar 26. Section Designer Pedestal (100 × 100) cm.....	45
Gambar 27. Section Designer Pile Cap (120 × 120) cm.	45
Gambar 28. Section Designer Tie Beam (25 × 40) cm.	46
Gambar 29. Wall Property Data.	46
Gambar 30. Pemodelan Struktur Bawah.	47
Gambar 31. Pemodelan Pembebanan Struktur Bawah.	48
Gambar 32. Denah Perkuatan Struktur Kolom.....	52
Gambar 33. Rencana Perkuatan Kolom Metode Grouting.	53
Gambar 34. Rencana Perkuatan Kolom Metode FRP Wrapping.	55
Gambar 35. Diagram Cashflow Skenario 1.....	63
Gambar 36. Diagram Cashflow Skenario 2.....	64
Gambar 37. Diagram Cashflow Skenario 3.....	65
Gambar 38. Diagram Cashflow Skenario 4.....	65
Gambar 39. Diagram Cashflow Skenario 5.....	66
Gambar 40. Diagram Cashflow Skenario 6.....	67
Gambar 41. Grafik Rekapitulasi Nilai NPV.....	69
Gambar 42. Grafik Rekapitulasi Nilai BCR.....	69
Gambar 43. Grafik Rekapitulasi Nilai IRR.	70
Gambar 44. Grafik Rekapitulasi Periode Pengembalian.....	71

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Kriteria Hasil Pengujian <i>UPV Test</i>	12
Tabel 2. Jenis-Jenis FRP U.S. Army (2002)	15
Tabel 3. Referensi Penelitian Terdahulu	24
Tabel 4. Referensi Penelitian Terdahulu (Lanjutan)	25
Tabel 5. Rangkuman Hasil Pengujian <i>Hammer Test</i>	42
Tabel 6. Rangkuman Pengujian <i>UPV Test</i>	43
Tabel 7. Rekapitulasi Gaya Dalam Kolom Pedestal	49
Tabel 8. Rekapitulasi Gaya Dalam <i>Tie Beam</i>	49
Tabel 9. Rekapitulasi Gaya Dalam <i>Pile Cap</i>	49
Tabel 10. Rekapitulasi Kapasitas Penampang Struktur Eksisting.....	50
Tabel 11. Rekapitulasi Kapasitas Penampang Struktur Eksisting (Lanjutan).....	51
Tabel 12. Rekapitulasi Peningkatan Kapasitas Aksial Pedestal dengan <i>Grouting</i>	54
Tabel 13. Rekapitulasi Peningkatan Kapasitas Momen Pedestal dengan <i>Grouting</i>	54
Tabel 14. Jenis FRP yang digunakan yaitu CFRP Horseen HM-30	54
Tabel 15. Rekapitulasi Peningkatan Kapasitas Aksial Pedestal dengan FRP	56
Tabel 16. Rekapitulasi Peningkatan Kapasitas Momen Pedestal dengan FRP	56
Tabel 17. Rekapitulasi Biaya Perkuatan Metode <i>Grouting</i>	57
Tabel 18. Rekapitulasi Biaya Perkuatan Metode FRP <i>Wrapping</i>	57
Tabel 19. Biaya Konstruksi (Perkuatan Struktur Kolom dengan <i>Grouting</i>).....	58
Tabel 20. Biaya Konstruksi (Perkuatan Struktur Kolom ditambah FRP)	58
Tabel 21. Biaya Pengecatan Kolom	59
Tabel 22. Rekapitulasi Skenario Penelitian.....	67
Tabel 23. Rekapitulasi Hasil Analisis Investasi	68

Tabel 24. Hasil Penyelidikan Struktur dan Rekomendasi Perbaikan	72
------------------------------------------------------------------------------	----

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang yang berlokasi di Pelabuhan Panjang, Jalan Yos Sudarso, Pidada, Kecamatan Panjang, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung. Gudang tersebut dibuat dari struktur rangka baja dan memiliki luas sebesar 11232 m² yang terdiri dari tiga segmen yaitu, segmen A seluas 4536 m², segmen B seluas 4536 m², dan segmen *interface* seluas 2160 m² serta memiliki kapasitas 40.000 ton.

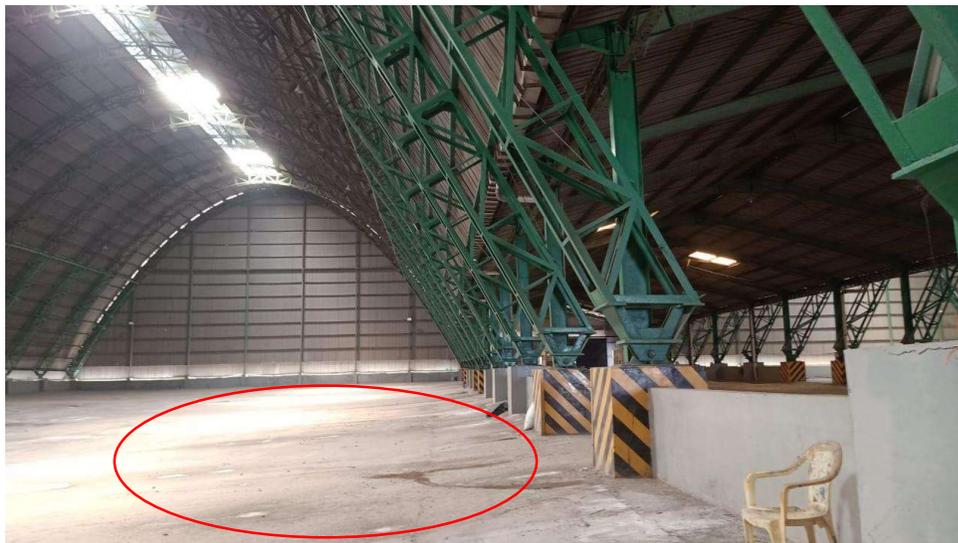


Gambar 1. Kondisi Eksisting Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero).
(Sumber: Survei Penelitian, 2023)

Kondisi gudang saat ini telah berusia 25 tahun yang menyisakan masa layan 25 tahun lagi, kini terjadi penurunan tanah (*settlement*) yang mengakibatkan terjadinya perubahan kondisi perilaku struktur di atasnya. Untuk mengetahui kondisi perilaku struktur tersebut perlu dilakukan investigasi lebih lanjut melalui pengamatan visual dan pengujian elemen struktur dengan metode *Non-Destructive Test* (NDT) seperti *hammer test*, dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) *test*. Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui kondisi eksisting kualitas material dan mengetahui keberadaan kerusakan struktur seperti retak, berongga dan kerusakan lainnya. Perbaikan struktur perlu dilakukan terhadap komponen struktur yang mengalami kerusakan agar bangunan gudang dapat beroperasi kembali serta bertambah usia layan bangunannya.

Metode perbaikan yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan metode *grouting* dan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) *wrapping*. *Grouting* merupakan metode penyuntikkan atau memasukkan bahan *grout* pada bagian struktur yang mengalami keretakan dengan tujuan untuk mengembalikan kekuatan struktur beton (Lutfi dan Juniansyah, 2017). Sedangkan FRP merupakan inovasi perkuatan komposit yang saat ini banyak digunakan untuk perkuatan eksternal pada struktur beton (Refani et al., 2015).

Dari kedua alternatif metode perbaikan tersebut, nantinya akan dihitung estimasi biaya perbaikannya serta dianalisis biaya siklus hidupnya (*Life Cycle Cost Analysis*) guna mengetahui perbaikan yang tepat dan ekonomis dari simulasi skenario-skenario yang akan dilakukan menggunakan parameter *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PP). Skenario yang tepat dan ekonomis adalah skenario yang memenuhi syarat yaitu $NPV > 0$, $BCR > 1$, $IRR > \text{rate of return}$, dan $PP < \text{umur ekonomis}$



Gambar 2. Kondisi Penurunan Tanah Gudang Segmen A.
(Sumber: Survei Penelitian, 2023)



Gambar 3. Kondisi Kerusakan Struktur Gudang.
(Sumber: Survei Penelitian, 2023)

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang terjadi pada bangunan Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana kondisi struktur eksisting yang diakibatkan adanya penurunan tanah pada bangunan gudang?
2. Bagaimana prosedur melakukan evaluasi struktur menggunakan metode *Non-Destructive Test* (NDT)?
3. Bagaimana rencana metode perbaikan atau perkuatan struktur yang akan dilakukan terhadap struktur yang mengalami kerusakan?
4. Bagaimana estimasi biaya yang dibutuhkan dan analisis kelayakan investasi pada bangunan gudang sehingga investasi yang akan dilakukan dapat dinilai layak atau menghasilkan profit?

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan di Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang, Pelabuhan Panjang, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung.
2. Struktur yang dianalisis struktur kolom pedestal berdasarkan perilaku struktur *pile cap* dan *tie beam*
3. Penyelidikan di lapangan dengan menggunakan metode *Non-Destructive Test* (NDT) yaitu *hammer test* dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) *test*.
4. LCCA dengan parameter NPV, BCR, IRR, dan PP untuk mendapatkan alternatif metode perbaikan atau perkuatan yang layak secara biaya atau investasi serta memperpanjang usia layan bangunan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berikut adalah tujuan dalam penelitian ini.

1. Mengetahui kondisi struktur eksisting bangunan gudang untuk dilakukan evaluasi agar bangunan gudang dapat beroperasi kembali serta usia layannya dapat meningkat.
2. Memahami prosedur penyelidikan dan evaluasi struktur bangunan dengan metode *Non-Destructive Test* (NDT) seperti, *hammer test*, dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) *test*.
3. Mendapatkan hasil evaluasi untuk perbaikan atau perkuatan struktur dengan menggunakan beberapa metode atau bahan seperti *grouting*, dan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP)
4. Melakukan estimasi biaya perbaikan dan analisis kelayakan investasi untuk mendapatkan rekomendasi perbaikan atau perkuatan struktur yang tepat dan menghasilkan profit untuk pemilik bangunan gudang.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Akademis/Teoretis

Penelitian ini memiliki manfaat secara akademis/teoretis karena dapat memberikan pemahaman mengenai prosedur penyelidikan dengan metode *Non-Destructive Test* (NDT), evaluasi struktur bangunan, dan analisis biaya dengan menggunakan LCCA untuk mendapatkan pekerjaan yang ekonomis.

2. Praktis

Penelitian ini memiliki manfaat bagi pemilik gudang yaitu PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang untuk mendapatkan opsi perbaikan atau perkuatan struktur yang berkualitas dan ekonomis agar gudang dapat beroperasi kembali serta memperpanjang usia layan bangunan gudang tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penelitian ini, informasi yang digali berasal dari artikel ilmiah, dan buku-buku berupa teori-teori yang mendukung adanya penelitian ini. Selain itu, informasi juga digali dari penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian saat ini sebagai perbandingan, baik mengenai kekurangan, atau kelebihan yang ada sehingga memperkuat landasan adanya penelitian ini.

2.1 Bangunan Gudang

Menurut Purnomo (2004), gudang merupakan bangunan yang memiliki fungsi untuk menyimpan barang baik bahan baku yang akan dilakukan proses *manufacturing* maupun barang yang jadi yang siap dipasarkan atau didistribusikan. Menurut Warman (2004), gudang merupakan bangunan yang berguna untuk menyimpan barang berupa bahan baku, barang setengah jadi, suku cadang, maupun barang dalam proses yang disiapkan untuk diserap oleh proses produksi.

Gudang mempunyai peran yang sangat penting bagi perusahaan, terutama dalam hal penyimpanan, pengelolaan inventaris, dan distribusi barang. Aktivitas pergudangan terkait dengan penerimaan, penyimpanan, pengambilan, pengiriman, dan pengendalian hingga pengiriman barang. Selain aktivitas pergudangan, pada gudang juga terdapat aktivitas bongkar muat barang. Aktivitas bongkar muat merupakan proses perpindahan muatan dari kapal ke angkutan darat melalui atau tanpa melalui gudang (Lasse, 2014).

Pada pelabuhan, gudang terbagi menjadi 4 jenis berdasarkan tata letaknya yaitu sebagai berikut:

1. Gudang lini 1 atau gudang pabean
Gudang ini berlokasi di tepi dermaga dan barang yang disimpan dalam gudang ini dibawah pengawasan bea cukai.
2. Gudang lini 2
Gudang ini berlokasi di belakang gudang lini 1. Barang yang berada dalam gudang ini hanya tinggal menunggu pengeluaran dari pelabuhan karena kewajibannya telah terpenuhi.
3. Gudang *verlengstuk*
Gudang yang berlokasi di lini 2 tetapi memiliki fungsi sebagai lini 1.
4. Gudang *entreport*
Gudang yang berlokasi di luar pelabuhan tetapi memiliki fungsi sebagai lini 1.

Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang masuk ke dalam kategori gudang lini 1 karena berlokasi tepat di tepi dermaga dan barang yang berada dalam gudang tersebut dibawah pengawasan bea cukai. Karena lokasi gudang tersebut, bangunan gudang perlu memiliki konstruksi yang kokoh dan kuat agar dapat beroperasi dengan umur layan yang panjang. Konstruksi gudang ini memiliki umur layan rencana hingga 50 tahun yang dibangun menggunakan struktur atas (*upper structure*) dari konstruksi baja sedangkan struktur bawah (*lower structure*) dari konstruksi beton bertulang

2.2 Struktur Atas (*Upper Structure*)

Struktur atas suatu bangunan merupakan struktur yang berada di atas muka tanah yang meneruskan beban ke dalam struktur bawah. Struktur atas pada Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang menggunakan konstruksi baja seperti gording, *bracing*, *baseplate*, *rafter*, dan penutup atap.

2.3 Struktur Bawah (*Lower Structure*)

Struktur bawah merupakan komponen struktural pada sebuah bangunan yang terletak di bawah permukaan lantai yang memiliki fungsi untuk mendistribusikan

beban dari atas hingga ke tanah. Struktur bawah yang diperhatikan pada penelitian ini adalah perilaku eksisting dari struktur *pile cap* dan *tie beam* yang mempengaruhi kondisi penampang di atasnya yaitu struktur kolom pedestal.

2.3.1 *Pile Cap*

Pile cap merupakan struktur bawah pada sebuah bangunan yang memiliki peran penting dari suatu struktur. *Pile cap* memiliki fungsi pada sebuah bangunan untuk mendistribusikan beban dari kolom ke tiang-tiang, kemudian diteruskan ke dalam tanah (Sedayu *et al.*, 2019).

Dalam perencanaan *pile cap* perlu didesain dengan perhitungan yang tepat dan efisien sehingga struktur *pile cap* dapat berfungsi dengan optimal dan tidak mengalami retak hingga patah ataupun mengalami pergeseran. Oleh karena itu, pada perencanaan struktur *pile cap* harus sesuai dengan ketentuan persyaratan.

2.3.2 *Tie Beam*

Fungsi *tie beam* adalah menerima dan mendistribusikan beban dinding serta kolom yang ada di atasnya, sehingga jika terjadi penurunan pada pondasi dapat tertahan (Ihsani dan Yuriza, 2019).

Langkah-langkah dalam perencanaan *tie beam* menurut Ihsani dan Yuriza (2019), adalah sebagai berikut:

1. Menentukan dimensi *tie beam*.
2. Menentukan mutu beton dan baja tulangan yang akan digunakan.
3. Merencanakan dan menghitung pembebanan pada *tie beam* dengan menggunakan *software* analisis struktur untuk mendapatkan gaya dalam yang bekerja.
4. Menentukan momen dan gaya geser maksimum berdasarkan hasil analisa program analisis struktur.
5. Melakukan perhitungan struktur pada *tie beam*.

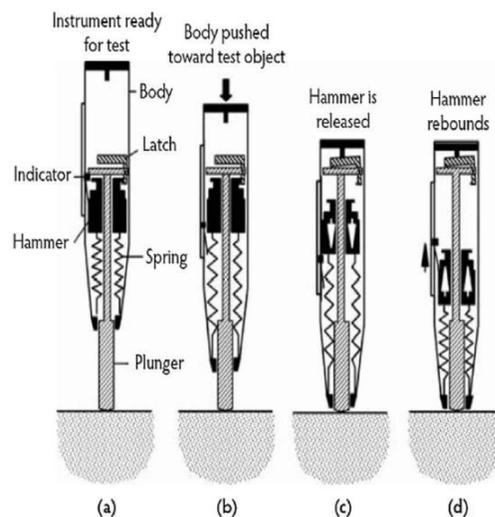
6. Menghitung tulangan tekan dan tarik yang dibutuhkan.
7. Menghitung penulangan geser

2.4 Pengujian Material Struktur

Pada sebuah bangunan, ada beberapa bentuk pengujian struktur seperti, pengujian yang merusak (*destructive test*) komponen strukturnya dan pengujian yang tidak merusak (*non-destructive test*) komponen strukturnya. Pada penelitian ini, pengujian yang dilakukan tidak merusak komponen strukturnya (*non-destructive test*) dalam pengambilan data di lapangan seperti, *hammer test* dan *Ultrasonic Pulse Velocity*) UPV *test*.

1. *Hammer test*

Hammer test merupakan salah satu metode pengujian non-destruktif atau melakukan pengujian kuat tekan beton dengan tidak merusak struktur tersebut. Pengujian *hammer test* menggunakan alat yang bernama *schmidt rebound hammer*. Alat tersebut digunakan untuk memeriksa kualitas struktur beton dan mendapatkan nilai perkiraan kuat tekan beton.



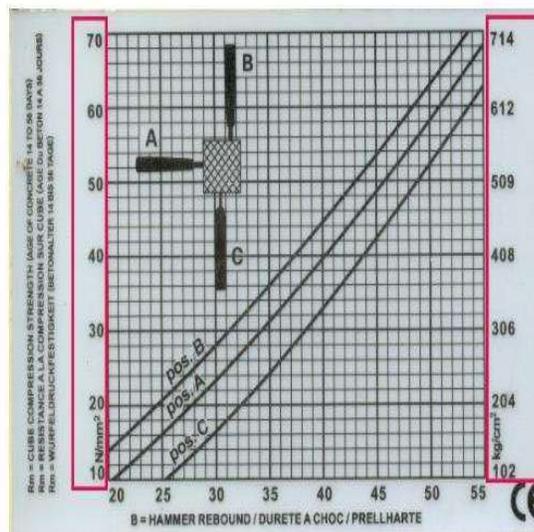
Gambar 4. Penggunaan *Hammer Test*.
(Sumber: Rada, 2018)

Cara kerja *rebound hammer* adalah dengan menekan ujung alat ke permukaan beton yang akan diuji hingga menghasilkan pantulan pada alat tersebut. Nilai yang dihasilkan (nilai lenting (R)) dari pantulan tersebut adalah nilai kuat tekan beton (dilakukan kalibrasi terlebih dahulu untuk memperoleh kuat tekan beton) dari beton yang diuji.

Pada gambar 4 di atas menunjukkan cara pengambilan sampel pengujian, terdapat 3 metode pengambilan sampel pengujian berdasarkan arah sudut pengujiannya yaitu sebagai berikut:

1. Sudut 0° untuk pengujian tegak lurus horizontal, sudut ini biasa dilakukan pada pengujian struktur kolom, dan dinding
2. Sudut -90° untuk pengujian tegak lurus ke bawah, sudut ini biasa dilakukan pada pengujian struktur pelat lantai di posisi bawah
3. Sudut $+90^\circ$ untuk pengujian tegak lurus ke atas, sudut ini biasa dilakukan pada pengujian struktur pelat atap atau pelat lantai di posisi atas.

Dalam penelitian ini, pengambilan sudut pengujian menggunakan sudut 0° karena struktur yang diuji adalah struktur kolom, dan dinding.

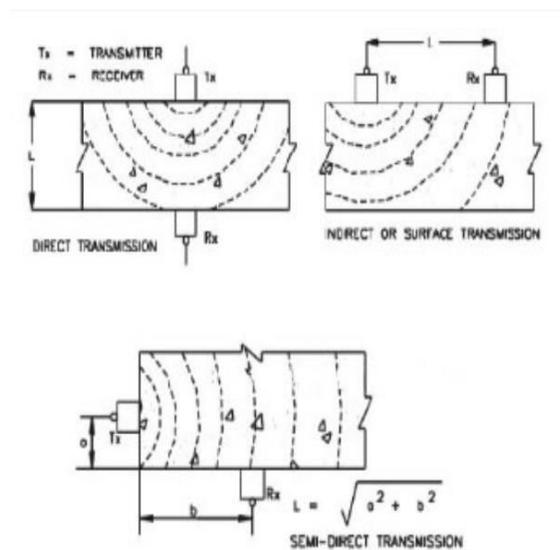


Gambar 5. Kurva Korelasi Nilai Pantulan dengan Kuat Tekan Beton.
(Sumber: Rada, 2018)

Setelah dilakukan pengujian maka didapatkan nilai *rebound hammer* (R) yang akan dikoreksi berdasarkan kurva korelasi. Nilai *rebound hammer* (R) yang dihasilkan dicatat terlebih dahulu sebanyak 16 nilai pada satu titik pengujian. Selanjutnya, nilai yang tercatat dieleminasi 3 nilai tertinggi, dan 3 nilai terendah sehingga menyisakan 10 nilai *rebound hammer*. Nilai *rebound hammer* dilakukan koreksi berdasarkan sudut pengujian yang dilakukan dengan kurva korelasi seperti gambar 5 di atas.

2. *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) *test*

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) *test* atau pengujian ultrasonik juga merupakan salah satu pengujian terhadap bagian struktur bangunan yang tidak merusak komponen strukturnya (*non-destructive test*). Prinsip kerja dari UPV *test* yaitu dengan menyalurkan gelombang pulsa ke dalam beton, dan merata-ratakan waktu perjalanan gelombang tersebut dari titik awal ke titik akhir melalui beton.



Gambar 6. Penggunaan UPV *Test*.
(Sumber: Madutujuh dan Dafit Natalius, 2013)

Pengujian UPV *test* dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti:

- Direct transmission*
- Semi-indirect transmission*
- Indirect/surface transmission.*

Metode *direct transmission* merupakan metode yang lebih efektif dalam mengukur tingkat kepadatan beton, estimasi kuat beton hingga modulus elastisitas beton. Sedangkan metode *indirect transmission* biasanya digunakan untuk mengukur kedalaman retak beton.

Tabel 1. Kriteria Hasil Pengujian UPV Test

	<i>Pulse Velocity</i> (m/s)	<i>Concrete</i> <i>Conditions</i>
	>4500	<i>Excellent</i>
<i>Concrete Quality</i>	3500-4500	<i>Good</i>
	3000-3500	<i>Doubtful</i>
	2000-3000	<i>Poor</i>
	<2000	<i>Very Poor</i>

(Sumber: International Atomic Energy Agency, 2002)

2.5 Pembebanan Struktur

Pada perencanaan sebuah bangunan, seluruh beban perlu diasumsikan atau dibuat berdasarkan peraturan yang ada. Berikut adalah pembebanan struktur yang akan digunakan dalam penelitian ini berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 1727:2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain serta berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung.

1. Beban mati

Beban mati yang digunakan berasal dari berat material sendiri dan beban mati tambahan

- Beban material sendiri

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah beton yang telah dihitung otomatis pada program ETABS 20.

- Beban mati tambahan

Beban mati tambahan dalam penelitian ini berasal dari gaya dalam hasil analisis struktur rangka atap baja dan gaya momen tambahan dari hasil analisis pelat lantai.

2. Kombinasi pembebanan

Berikut adalah kombinasi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini

Kombinasi 1 = 1,2 DL + 1,2 SIDL

Kombinasi 2 = 1,4 DL + 1,4 SIDL

Keterangan:

DL = *Dead Load* (Beban material sendiri)

SIDL = *Super Imposed Dead Load* (Beban mati tambahan)

2.6 Perbaikan atau Perkuatan Struktur

Perbaikan merupakan suatu usaha pada struktur yang mengalami perubahan kualitas dengan tujuan komponen struktur tersebut dapat kembali sesuai dengan fungsi sebelum mengalami deformasi atau perubahan sehingga bangunan dapat berfungsi dengan normal.

Berikut adalah beberapa metode atau bahan untuk perkuatan struktur beton yang mengalami kerusakan dalam penelitian ini:

1. *Grouting*

Perbaikan *grouting* merupakan metode perbaikan dengan melakukan pengecoran menggunakan bahan *non-shrink* mortar (Maulidya, 2022).

Pada pekerjaan *grouting* dibutuhkan semen *grouting* yang siap digunakan dan memiliki karakteristik tidak menyusut, dan dapat mengisi celah struktur dengan baik serta memenuhi standar acuan *American Standard Testing and Material (ASTM) C-1107*. Karakteristik tersebut terdapat pada salah satu produsen semen *grouting* yaitu SIKA dengan jenis SIKA Grout 215 yang akan digunakan sebagai bahan *grouting* dalam penelitian ini.



Gambar 7. SIKA Grout 215 (*New*)
(Sumber: SIK A Indonesia)

2. *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*

FRP merupakan salah satu jenis material komposit yang biasa digunakan sebagai elemen struktural pada pesawat terbang, otomotif, perkuatan, dan struktur lain seperti jembatan (Widyaningsih *et al.*, 2016).

Menurut Maulidya (2022), terdapat keuntungan penggunaan FRP sebagai metode atau material perkuatan struktur yaitu:

- a. Kuat tarik sangat tinggi (\pm 7-10 kali lebih tinggi dari U39).
- b. Sangat ringan (*density* 1,4-2,6 gr/cm³, 4-6 kali lebih ringan dari baja).
- c. Pelaksanaan sangat mudah dan cepat.
- d. Memungkinkan untuk tidak menutup lalu lintas.
- e. Tidak memerlukan area kerja yang luas.
- f. Tidak memerlukan *joint*, meskipun bentang yang harus diperkuat cukup panjang.
- g. Tidak berkarat (non logam).

Material komposit FRP terdiri dari serat kontinu yang memiliki kekuatan tinggi seperti kaca, karbon, atau kabel baja yang tertanam dalam matriks polimer. Pada penelitian ini material FRP menggunakan jenis karbon dengan merk Horseen tipe HM-30 yang memiliki kekuatan hingga 26000 MPa

Tabel 2. Jenis-Jenis FRP U.S. Army (2002)

<i>Fiber</i>	<i>Diameter</i> (μm)	<i>Relative</i> <i>Density</i>	<i>Modulus of</i> <i>Elasticity</i> (GPa)	<i>Tensile</i> <i>Strength</i> (GPa)	<i>Elongation</i> <i>at Break</i> (%)
<i>Steel</i>	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
<i>Glass</i>	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
<i>Asbestos Crocidolite</i>	0,02-0,4	3,40	196	3,5	2,0-3,0
<i>Asbestos Chrysotile</i>	0,02-0,4	2,60	164	3,1	2,0-3,0
<i>Aramid (Kevlar)</i>	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
<i>Carbon (High)</i>	9	1,90	230	2,6	1



Gambar 8. CFRP Horseen HM-30.
(Sumber: Horseen.com)

2.7 Estimasi Biaya

Estimasi biaya merupakan suatu langkah untuk memperkirakan jumlah biaya yang diperlukan untuk melakukan suatu pekerjaan dengan didasarkan informasi yang tersedia pada waktu tertentu (Waluyo *et al.*, 2021).

Estimasi biaya yang akan dianalisis dapat dilakukan dengan mengalikan volume perbaikan dengan harga satuan pekerjaan (Waluyo *et al.*, 2021).

Harga satuan pekerjaan untuk perawatan atau perbaikan dapat dihitung berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia No. 1 tahun 2022 tentang Pedoman Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Estimasi biaya perbaikan atau perkuatan yang akan dilakukan dalam penelitian ini hanya menghitung biaya perbaikan atau perkuatan pada bagian struktur yang mengalami kerusakan berdasarkan hasil analisis struktur bawah eksisting dengan dua skenario perbaikan atau perkuatan yaitu menggunakan *grouting* dan FRP.

2.8 Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost*)

Menurut Fuller & Petersen (1995) *Life Cycle Cost* (LCC) merupakan suatu metode ekonomi dalam melakukan evaluasi proyek terhadap seluruh biaya yang terjadi, dari tahap pengelolaan, pengoperasian, pemeliharaan, dan pembuangan suatu komponen dari sebuah konstruksi, hal tersebut dijadikan pertimbangan yang begitu penting dalam mengambil keputusan. Berdasarkan pengertian tersebut dapat dikatakan bahwa pada proyek konstruksi besar (jembatan, jalan raya, pelabuhan, bandara, dll) tidak hanya terdapat biaya awal atau biaya konstruksi saja, akan tetapi terdapat biaya pemeliharaan dan operasional juga. Sehingga pengambilan keputusan pada proses proyek konstruksi menjadi sangat penting

Dalam menentukan keputusan sebuah proyek konstruksi diperlukan komponen biaya (*cost*) yang dikeluarkan dan komponen manfaat (*benefit*) yang didapatkan selama siklus hidup bangunan serta asumsi-asumsi yang mendukung dalam melakukan analisis biaya siklus hidup

1. Komponen biaya (*cost*)

Biaya-biaya yang diperlukan dalam melakukan analisis biaya siklus hidup (*life cycle cost*) pada sebuah proyek konstruksi adalah sebagai berikut:

a. Biaya awal investasi

Biaya awal ini merupakan biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan pembangunan suatu proyek konstruksi

b. Biaya operasional

Biaya yang dikeluarkan setelah konstruksi atau bangunan telah beroperasi.

Biaya ini biasanya terdiri dari:

- Biaya gaji pegawai.
- Biaya elektrik.

- Biaya plumbing.
- Biaya Pajak Bumi dan Bangunan (PBB).

c. Biaya pemeliharaan dan perawatan

Biaya pemeliharaan dan perawatan merupakan biaya yang dikeluarkan selama siklus hidup bangunan agar bangunan tetap terjaga dalam kondisi baik hingga akhir umurnya. Biaya pemeliharaan dan perawatan biasanya dikeluarkan dalam jangka waktu tahunan selama umur rencana.

2. Komponen manfaat (*benefit*)

Pada suatu proyek konstruksi seperti gedung, jembatan, pelabuhan, bandara, dan lainnya biasanya mempunyai nilai manfaat yang didapatkan setelah proyek pembangunan konstruksi selesai atau beroperasi. Menurut Suyanto et al. (2001), manfaat sebuah proyek terdiri dari:

a. Manfaat langsung (*direct benefit*).

Manfaat langsung yang dapat diperoleh dalam penelitian ini adalah gudang dapat beroperasi kembali sebagai tempat penyimpanan barang curah.

b. Manfaat tidak langsung (*indirect benefit*).

Secara tidak langsung proyek renovasi gudang ini dapat memberikan manfaat pada barang yang disimpan menjadi lebih aman karena terlindungi di tempat tertutup.

c. Manfaat nyata (*tangible benefit*).

Manfaat nyata dengan adanya proyek renovasi gudang ini adalah dapat memberikan keuntungan bagi perusahaan dari hasil penyewaan gudang. Dalam penelitian ini, gudang diasumsikan dapat memberikan keuntungan bersih sebesar 8% dan 10%. Persentase 8% dan 10% keuntungan tersebut berasal dari penyewaan gudang dengan sisa persentasenya diasumsikan terdistribusi untuk biaya operasional (gaji pegawai, biaya listrik, biaya air, dan lainnya) serta biaya pemeliharaan rutin.

d. Manfaat tidak nyata (*intangibile benefit*).

Manfaat tidak nyata yang diperoleh dari proyek renovasi gudang ini adalah dapat memberikan peluang pekerjaan, menjaga kualitas barang yang disimpan, dan lainnya.

3. Asumsi-Asumsi

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam melakukan analisis biaya siklus hidup (*life cycle cost analysis*) pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. *Extended life*

Extended life perkuatan kolom metode *grouting* dapat mencapai 30 tahun, sedangkan *extended life* perkuatan kolom metode FRP *wrapping* dapat mencapai 50 tahun.

b. Suku bunga

Suku bunga merupakan nilai dana yang dapat dipinjamkan besarnya ditentukan oleh preferensi dan sumber pinjaman sebagai pelaku ekonomi di pasar (Winarto, 2009).

c. Pajak

Menurut Dr. Soeparman Soemahamidjaya dalam buku Perpajakan Teori dan Aplikasi tahun 2020, pajak merupakan iuran wajib bagi rakyat atau perusahaan, baik itu dapat berupa uang atau barang yang dipungut oleh penguasa.

d. Tingkat diskonto

Tingkat diskonto diperlukan untuk menyetarakan biaya pada tahun yang berbeda, karena nilai mata uang akan mengalami perubahan beberapa tahun ke depan beriringan dengan umur layan proyek konstruksi.

e. Depresiasi

Depresiasi merupakan penyusutan nilai aset bersamaan dengan berlalunya waktu. Menurut Giatman (2011), depresiasi perlu diperhitungkan karena untuk menyediakan dana pengembalian modal yang telah diinvestasikan dalam kekayaan fisik, dana ini sifatnya sebagai *saving* untuk menjamin kontinuitas atau kerbelanjutan bila mesin/proyek habis masa pakainya dan perlu diganti dengan yang baru.

f. Nilai sisa

Nilai sisa merupakan jumlah yang diterima dari penjualan pada akhir umur layan bangunan. Nilai sisa pada gudang ini dapat diperoleh dari nilai jual besi tua yang tersisa pada akhir umur layan bangunan.

2.9 Konsep Nilai Uang Terhadap Waktu (*Time Value of Money*)

Time value of money merupakan konsep nilai uang saat ini memiliki nilai yang berbeda dengan nilai di masa yang akan datang. Misal, pada tahun 1995 harga beras per kilo sekitar Rp800. Pada tahun 2000 harganya mencapai lebih dari Rp1.200. Sedangkan pada tahun 2019 harga per kilo diatas Rp10.000. Harga barang-barang yang lain juga mengikuti irama yang serupa. Dari permisalan tersebut, didapatkan bahwa untuk mendapatkan jenis barang dan jumlah barang yang sama diperlukan jumlah uang yang semakin banyak. Kesamaan jenis dan jumlah barang yang sama tersebut dikenal dengan istilah ekivalensi.

Metode ekivalensi yang digunakan untuk perhitungan rasio manfaat biaya sesuai ukuran waktu yang ditinjau adalah sebagai berikut:

1. *Present value*

Present value merupakan nilai saat ini dari sejumlah uang di masa yang akan datang, Dalam mencari *present value* dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$P = F \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \dots\dots\dots(1)$$

Atau

$$P = F(P/F, i\% , n) \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

- P = Nilai saat ini (*Present Worth*)
- F = Nilai di masa yang akan datang (*Future Worth*)
- i = Tingkat bunga efektif per periode
- n = Jumlah periode

2. *Future Value*

Future value merupakan nilai pada beberapa waktu yang akan datang dari jumlah uang yang ada, atau serangkaian pembayaran. Dalam mencari *future value* dinyatakan dalam rumus berikut:

$$F = P (1 + i)^n \dots\dots\dots(3)$$

Atau

$$F = P(F/P , i\% , n) \dots\dots\dots(4)$$

2.10 *Net Present Value (NPV)*

Net Present Value (NPV) merupakan selisih antara jumlah uang yang masuk dan jumlah uang yang keluar. NPV digunakan dalam penganggaran modal untuk menganalisis keuntungan proyek atau perusahaan investasi. NPV dihitung dari selisih nilai *present value benefit* dan *present value cost*.

$$NPV = PV \text{ Benefit} - PV \text{ Cost} \dots \dots \dots (5)$$

Hasil NPV yang positif menunjukkan bahwa perbaikan atau penguatan struktur yang akan dilakukan diharapkan dapat menghasilkan keuntungan, sedangkan hasil NPV yang negatif menunjukkan bahwa perbaikan atau penguatan struktur yang akan dilakukan dapat menghasilkan kerugian. Semakin tinggi nilai NPV, semakin menguntungkan proyek tersebut.

2.11 *Benefit Cost Ratio (BCR)*

Menurut Ashworth (1994), *Benefit Cost Ratio (BCR)* merupakan suatu metode yang digunakan untuk melakukan evaluasi ekonomi biaya terhadap keuntungan yang diperoleh pada sebuah proyek. Tujuan dari BCR adalah untuk membantu dalam pengambilan keputusan dengan mengidentifikasi apakah manfaat yang diperoleh melebihi biaya yang dikeluarkan, sehingga dapat memberikan petunjuk dalam menentukan suatu proyek layak untuk dilaksanakan atau tidak.

BCR dapat disederhanakan dengan perbandingan nilai manfaat pada sebuah proyek terhadap nilai biaya yang dikeluarkan

$$BCR = \frac{\sum PV \text{ Net Benefit}}{\sum PV \text{ Net Cost}} \dots \dots \dots (6)$$

Hasil BCR yang menunjukkan nilai lebih besar dari 1 maka suatu proyek akan dikatakan layak secara finansial. Seluruh alternatif metode perbaikan atau penguatan yang akan dilakukan dibandingkan berdasarkan nilai manfaat bersih (keuntungan bersih) yang dihasilkan daripada biaya yang dikeluarkan. Pilih alternatif yang memberikan nilai manfaat bersih tertinggi.

2.12 *Internal Rate of Return (IRR)*

Internal Rate of Return (IRR) merupakan nilai tingkat suku bunga yang didapatkan jika nilai BCR sama dengan 1 atau nilai NPV sama dengan 0. Secara sederhana dapat didefinisikan seberapa kemampuan *cashflow* dalam mengembalikan modalnya dan seberapa besar pula kewajiban yang harus dipenuhi (Giatman, 2011).

$$IRR = \frac{(i_1 \times NPV_2) - (i_2 \times NPV_1)}{NPV_2 - NPV_1} \dots \dots \dots (7)$$

Dimana:

- i_1 = tingkat suku bunga yang menghasilkan NPV bernilai negatif
- i_2 = tingkat suku bunga yang menghasilkan NPV bernilai positif
- NPV_1 = NPV bernilai negatif
- NPV_2 = NPV bernilai positif

Indikator dalam penilaian investasi proyek dengan menggunakan metode IRR adalah sebagai berikut:

1. Jika $IRR > interest\ rate$ yang berlaku, maka proyek layak untuk dilanjutkan
2. Jika $IRR < interest\ rate$ yang berlaku, maka proyek tidak layak untuk dilanjutkan.

2.13 *Payback Period (PP)*

Payback Period (PP) merupakan jumlah periode (tahun) yang diperlukan untuk mengembalikan (menutup) biaya investasi awal dengan tingkat pengembalian tertentu (Pujawan, 2002).

Pada dasarnya PP merupakan metode penilaian kelayakan investasi dengan menentukan berapa lama suatu investasi akan terbayar. Semakin singkat waktu pengembalian investasi proyek, semakin menguntungkan investasi proyek.

Indikator dalam penilaian investasi proyek dengan menggunakan metode PP adalah sebagai berikut:

1. Jika $PP < \text{umur ekonomis}$, maka proyek layak untuk dilanjutkan
2. Jika $PP > \text{umur ekonomis}$, maka proyek tidak layak untuk dilanjutkan.

2.14 Referensi Penelitian Terdahulu

1. Penelitian Ibrahim Salam (2023) yang berjudul Perkuatan Komponen Struktur Balok dan Kolom Bangunan Gedung dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) (Studi Kasus: Gedung Rumah Sakit dr. Cipto Mangunkusumo *Central Medical Unit 3* Jakarta Pusat) menunjukkan hasil bahwa perkuatan struktur menggunakan CFRP meningkatkan kapasitas geser balok sebesar 47,8% dengan 1 lapis CFRP, serta kapasitas aksial dan lentur kolom sebesar 39,83% dengan 5 lapis CFRP. Biaya yang dibutuhkan perkuatan CFRP sebesar Rp49.052.190.460,20.
2. Penelitian Maulana (2022) yang berjudul Evaluasi Kelayakan dan Kekuatan Struktur Gedung PT. Inhil Sarimas Kelapa, Riau menunjukkan hasil bahwa perkuatan dengan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) pada kapasitas lentur balok mengalami peningkatan 87,73% - 127,14%, dan kapasitas geser balok mengalami peningkatan sebesar 1,43% - 7,68%. Pemasangan FRP memerlukan biaya Rp2.669.267.012,50.
3. Penelitian Dharma Sipayung (2021) yang berjudul Evaluasi Kelayakan dan Rekomendasi Perkuatan (*Retrofit*) Gedung Mangkrak Dekanat Fakultas Keperawatan Universitas Andalas menunjukkan hasil bahwa perkuatan kolom menggunakan metode *concrete jacketing* mengalami peningkatan pada nilai momen sebesar 246%, aksial sebesar 293%, dan geser sebesar 39% dengan biaya yang dibutuhkan sebesar Rp232.287.000.
4. Penelitian Purwandito (2012) yang berjudul Kajian Kelayakan Investasi Rehabilitasi Gedung Asrama Mahasiswa UNS Surakarta menunjukkan hasil bahwa total biaya konstruksi rehabilitasi adalah sebesar Rp4.106.500.000, sedangkan biaya pembangunan gedung baru adalah sebesar Rp17.526.500.000. Rasio biaya rehabilitasi dan biaya pembangunan gedung baru adalah sebesar

23,43%, maka investasi dinilai layak secara biaya. Simulasi dilakukan pada masing-masing skenario dengan merubah variabel harga sewa dan variabel tingkat hunian. Skenario 1 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 74%. Skenario 2 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 98%. Skenario 3 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 65%. Skenario 4 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 87%.

5. Penelitian Wittoox *et al.* (2022) yang berjudul *Revamping Corrosion Damaged Reinforced Concrete Balconies: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Life-Extending Repair Methods* menunjukkan hasil bahwa terdapat 5 skenario perbaikan untuk memperpanjang umur layan pada struktur beton yaitu sebagai berikut:

- *Patch Repair (PR)*
Life-extending mencapai 5-7 tahun dengan NPV sebesar k€100.
- *Conventional Repair (CR)*
Life-extending mencapai 20 tahun dengan NPV sebesar k€313.
- *Galvanic Cathodic Protection (GCP)*
Life-extending mencapai 20 tahun dengan NPV sebesar k€317.
- *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*
Life-extending mencapai 20 tahun dengan NPV sebesar k€257
- *Total Demolition and Rebuild (NEW)*
Life-extending mencapai 40 tahun dengan NPV sebesar k€581

Tabel 3. Referensi Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Pengumpulan Data	Hasil Penelitian
1	Seno Willy Dharma Sipayung	Evaluasi Kelayakan dan Rekomendasi Perkuatan (<i>Retrofit</i>) Gedung Mangkrak Dekanat Fakultas Keperawatan Universitas Andalas	Data perencanaan bangunan gedung, data eksisting material bangunan gedung,	Hasil peningkatan kapasitas kolom setelah perkuatan metode <i>jacketing</i> : 1. <i>Jacketing</i> 600×600 Momen: 246% Aksial: 293% Geser: 39% 2. <i>Jacketing</i> 700×700 Momen: 315% Aksial: 411% Geser: 51%
2	Azzam Maulana	Evaluasi Kelayakan dan Kekuatan Struktur Gedung PT Inhil Sarimas Kelapa, Riau	Pengujian metode <i>Non-Destructive Test</i> (NDT) dengan <i>hammer test</i>	Perkuatan kolom <i>jacketing</i> 600×600 paling efektif dan efisien yaitu Rp232.287.000 Hasil peningkatan kapasitas kolom setelah perkuatan lentur dengan CFRP sebesar 87,73% - 127,14% dan perkuatan geser dengan CFRP sebesar 1,43% - 7,68%. Estimasi biaya yang diperlukan sebesar Rp2.669.267.012,50

Tabel 4. Referensi Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Pengumpulan Data	Hasil Penelitian
3	Sultan Ibrahim Salam	Perkuatan Komponen Struktur Balok dan Kolom Bangunan Gedung dengan CFRP (Studi Kasus: Gedung RS dr. Cipto Mangunkusumo Central Medical Unit 3 Jakarta Pusat)	Data perencanaan bangunan gedung, data eksisting material bangunan gedung,	Hasil peningkatan kapasitas geser balok setelah perkuatan sebesar 47,8% menggunakan 1 lapisan FRP, dan peningkatan kapasitas aksial serta lentur kolom setelah perkuatan sebesar 39,83% dengan menggunakan 5 lapisan FRP
4	Meilandy Purwandito	Kajian Kelayakan Investasi terhadap Rehabilitasi Gedung Asrama Mahasiswa UNS Surakarta	Pengamatan visual bangunan eksisting, pengujian material eksisting dengan <i>hammer test</i>	Total biaya konstruksi rehabilitasi sebesar Rp4.106.500.000, sedangkan biaya pembangunan gedung baru sebesar Rp17.526.500.000. Hasil analisis kelayakan investasi pada skenario 1 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 74%, skenario 2 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 98%, skenario 3 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 65%, dan skenario 4 dinilai layak jika tingkat hunian minimum sebesar 87%
5	Lydia Wittoex, Matthias Buyle, Amaryllis Audenaert	<i>Revamping Corrosion Damaged Reinforced Concrete Balconies: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Life-Extending Repair Methods</i>	Data yang digunakan merupakan data eksisting struktur pelat balkon kantiliever pada bangunan <i>high-rise</i> di Belgia	Untuk memperpanjang usia layan (<i>life-extending</i>) dalam jangka pendek (5 tahun), perbaikan <i>patch repair</i> paling baik untuk digunakan. Sedangkan dalam jangka panjang (40 tahun), perbaikan <i>conventional</i> , GCP, ICCP paling baik sebagai opsi untuk dilakukan.

Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian sekarang adalah sebagai berikut:

1. Penelitian Dharma Sipayung (2021) memiliki persamaan dengan penelitian sekarang yaitu melakukan analisis kapasitas penampang struktur eksisting untuk mengetahui kelayakan struktur tersebut. Perbedaannya adalah jika pada penelitian Dharma Sipayung (2021) metode perkuatan yang dilakukan adalah *concrete jacketing*, sedangkan penelitian sekarang adalah metode perkuatan menggunakan *grouting* dan FRP.
2. Penelitian Maulana (2022), dan Ibrahim Salam (2023) memiliki persamaan dengan penelitian sekarang yaitu melakukan analisis kapasitas penampang eksisting untuk mengetahui kelayakan struktur tersebut dan analisis perkuatan struktur menggunakan FRP. Perbedaannya adalah jika pada penelitian Maulana (2022), dan Ibrahim Salam (2023) hanya menggunakan metode perkuatan FRP sedangkan penelitian sekarang menggunakan dua opsi metode perkuatan yaitu dengan *grouting* dan FRP
3. Secara garis besar, penelitian Purwandito (2012) memiliki persamaan dengan penelitian sekarang yaitu menentukan keputusan dari dua alternatif pilihan dengan LCCA menggunakan parameter NPV dan BCR. Perbedaan pada penelitian Purwandito (2012) dengan penelitian sekarang adalah jika penelitian Purwandito (2012), LCCA dilakukan untuk menentukan keputusan rehabilitasi gedung asrama mahasiswa atau pembangunan gedung baru, sedangkan pada penelitian ini, LCCA digunakan untuk keputusan perkuatan struktur dari dua alternatif material atau metode perkuatan yaitu dengan FRP dan *grouting*.
4. Penelitian Wittocx *et al.* (2022) mempunyai persamaan dengan penelitian sekarang yaitu melakukan LCCA dengan menghitung NPV untuk mendapatkan rekomendasi perbaikan yang efektif dan ekonomis dari beberapa alternatif perbaikan yang ada. Sedangkan perbedaannya dengan penelitian sekarang adalah jika penelitian Wittocx *et al.* (2022) memiliki permasalahan kerusakan beton akibat karbonasi, sedangkan penelitian sekarang memiliki permasalahan kerusakan struktur beton akibat penurunan permukaan lantai.

III. METODE PENELITIAN

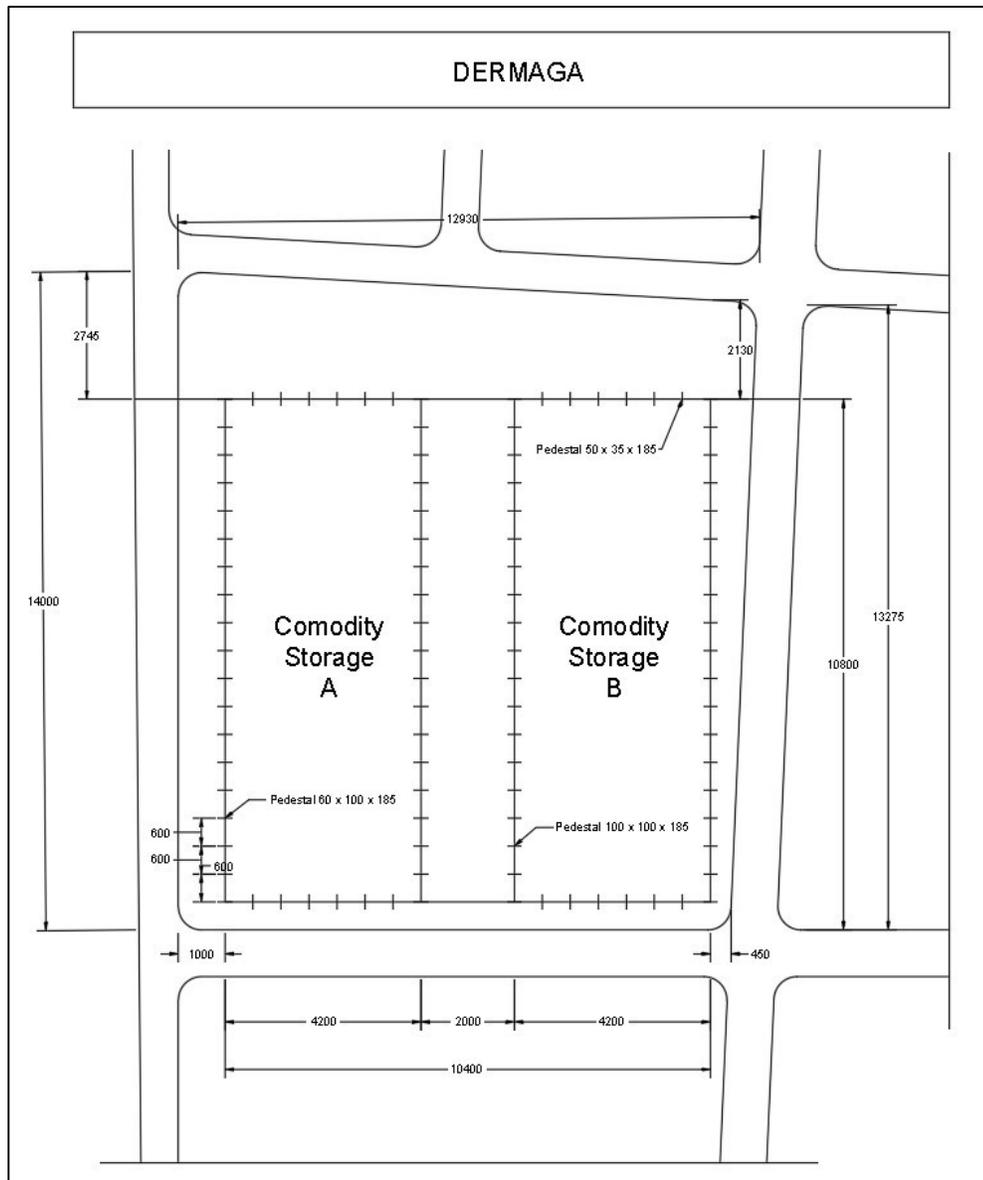
Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah melalui pengujian terhadap studi kasus Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang. Bab ini menjelaskan rangkaian kegiatan yang dilakukan dari mulai pengumpulan data hingga pengolahan data. Pengumpulan data dilakukan dengan pengujian struktur eksisting menggunakan metode *Non-Destructive Test* (NDT) yang selanjutnya akan diolah hingga diperoleh analisis kekuatan struktur menggunakan metode *grouting* dan *Fiber Reinforced Polymer (FRP) wrapping* serta biaya siklus hidupnya dengan parameter *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PP)

3.1 Lokasi Penelitian

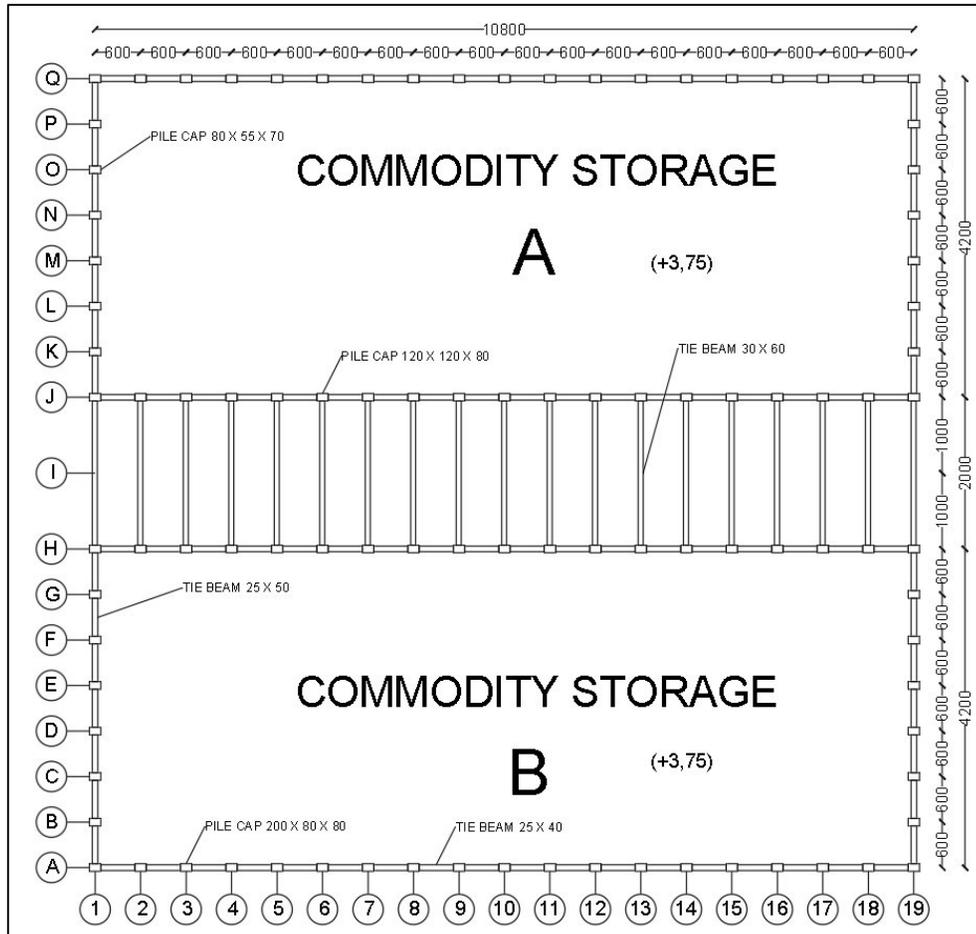
Penelitian dilakukan di Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang, Pelabuhan Panjang, Jalan Yos Sudarso, Pidada, Kecamatan Panjang, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung.



Gambar 9. Lokasi Penelitian.
(Sumber: *Google Earth*, 2023).



Gambar 10. *Layout Gudang.*



Gambar 11. Denah Perletakan *Pile Cap* dan *Tie Beam*.

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam sebuah penelitian perlu dilakukan dan direncanakan dengan baik dengan tujuan mendapatkan hasil yang terbaik. Dalam melakukan penelitian ini, dikumpulkan beberapa data untuk mendukung penelitian ini. Berikut adalah data-data yang dikumpulkan dalam mendukung penelitian ini:

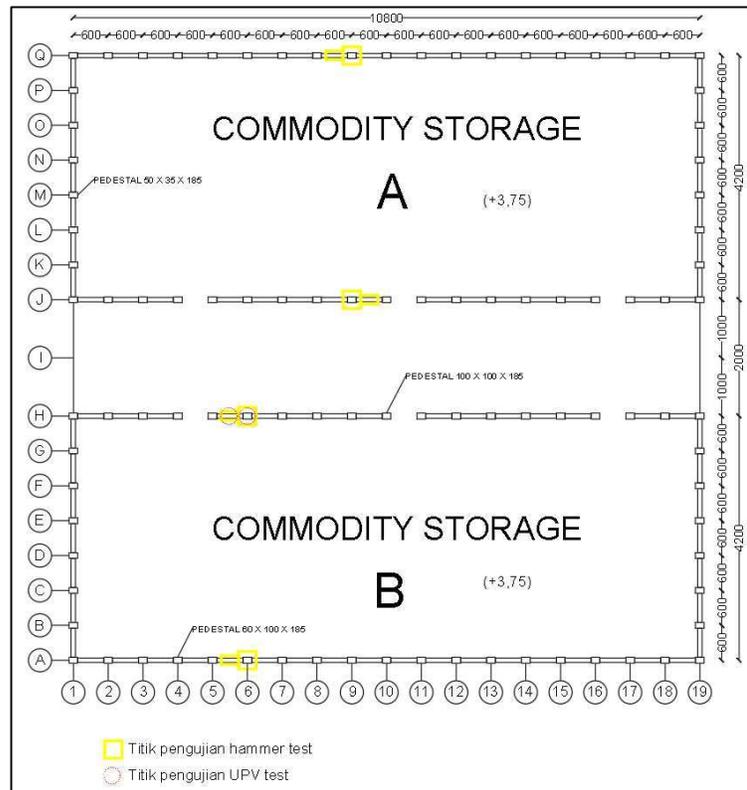
1. Data sekunder

Data sekunder merupakan data pendukung yang didapat dari beberapa sumber atau instansi-instansi tertentu. Pada penelitian ini, data sekunder yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

- a. Data perencanaan bangunan gudang
- b. Data Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) tahun 2022

- c. Data harga satuan upah dan bahan untuk Kota Bandar Lampung tahun 2022.
- d. Nilai inflasi dan BI-rate

2. Data primer



Gambar 12. Titik Pengambilan Data Primer.

Data primer merupakan data yang didapatkan dari hasil survei dan pengamatan mengenai kondisi yang ada di lapangan. Pada penelitian ini, data primer didapatkan dengan pengamatan visual dan pengujian sampel kualitas material dengan *hammer test* dan *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) test*.

a. *Hammer test*

Pengujian dengan *hammer test* digunakan untuk melakukan pemeriksaan kualitas beton pada sebuah struktur dan memperkirakan nilai kuat tekan beton dengan menggunakan alat yaitu *schmidt rebound hammer*.



Gambar 13. Pengujian *Hammer Test*.
(Sumber: Survei Penelitian, 2023)

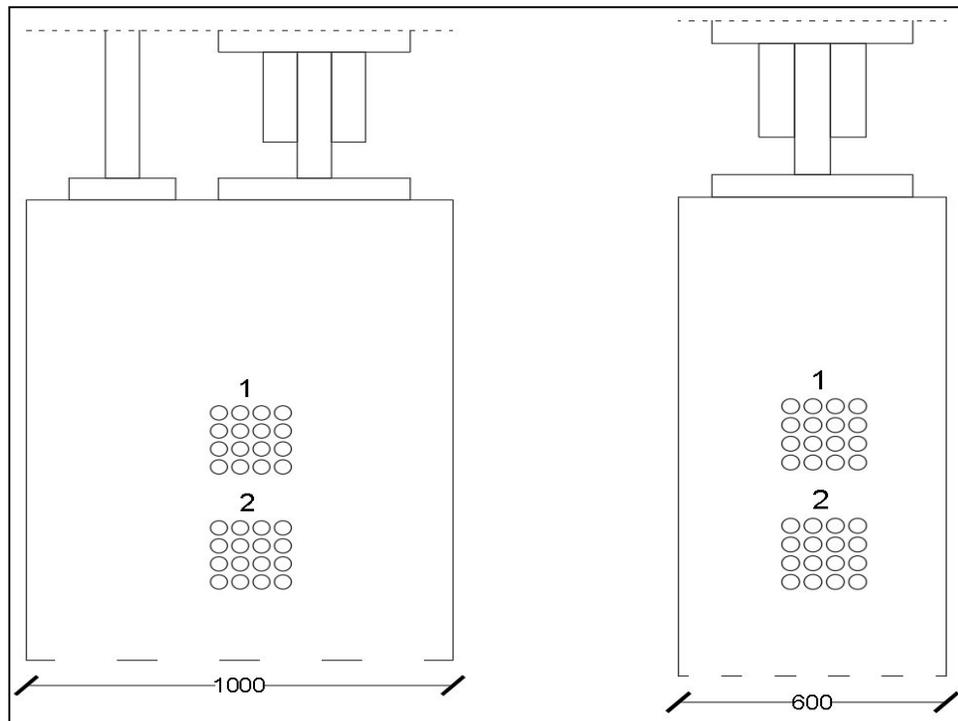
Metode pelaksanaan pengujian dengan *hammer test* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Persiapkan alat *schmidt rebound hammer* dan pastikan alat telah terkalibrasi agar data yang diperoleh akurat.
- Tentukan titik pengujian yang akan ditinjau dan pastikan permukaan beton bersih dengan menghaluskan permukaannya.
- Tentukan sudut pengambilan sampel, 0° (jika pengambilan di posisi tegak lurus horizontal), -90° (jika pengambilan di posisi tegak lurus ke bawah), 90° (jika pengambilan di posisi tegak lurus ke atas).
- Alat *rebound hammer* dipegang dengan kuat dan arahkan hulu palu tegak lurus dengan permukaan yang akan diuji.
- Tekan alat secara perlahan hingga palu pantul menumbuk hulu palu
- Setelah tumbukan, tahan tekanan pada alat dan tekan pengunci pada bagian sisi alat untuk mengunci palu pada posisinya.
- Baca dan catat angka pantul yang terjadi.
- Ulangi langkah di atas untuk pengambilan data selanjutnya.

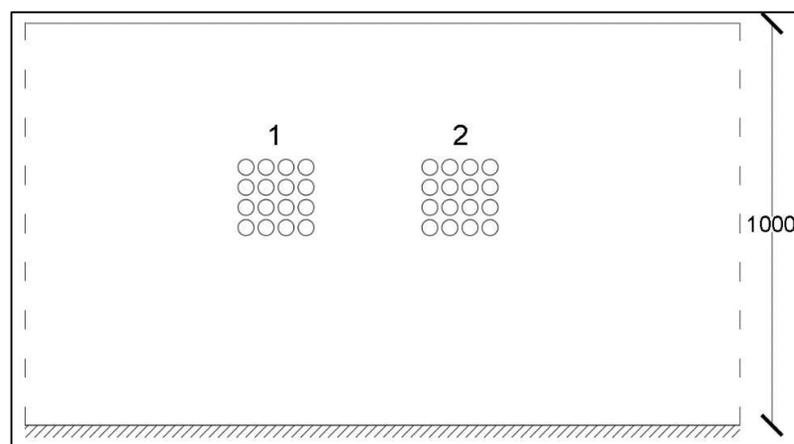
Pengambilan sampel pengujian *hammer test* di lapangan dilakukan terhadap dua titik yang berbeda dengan pengujian 16 kali pantulan untuk satu titik. Dari 16 kali pantulan tersebut, kemudian hasil dari tiga terendah kekuatan

beton dan tiga tertinggi kekuatan beton akan dieleminasi. Pengambilan sampel data *hammer test* dilakukan pada struktur kolom dan dinding.

Berikut adalah rincian titik lokasi pengambilan sampel data *hammer test* di lapangan:



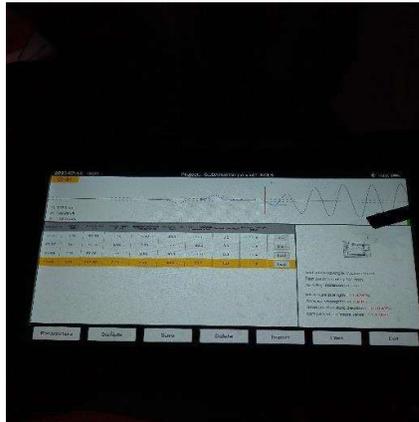
Gambar 14. Titik Uji *Hammer Test* pada Kolom.



Gambar 15. Titik Uji *Hammer Test* pada Dinding.

b. UPV *test*

Pengujian dengan UPV *test* digunakan untuk mengetahui kekuatan, mengukur modulus elastis, dan mengetahui keberadaan kerusakan seperti, retak, berongga, ataupun kerusakan lainnya.



Gambar 16. Penyelidikan UPV *Test*.
(Sumber: Survei Penelitian, 2023)

Metode pelaksanaan pengujian dengan UPV *test* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Persiapan lokasi uji

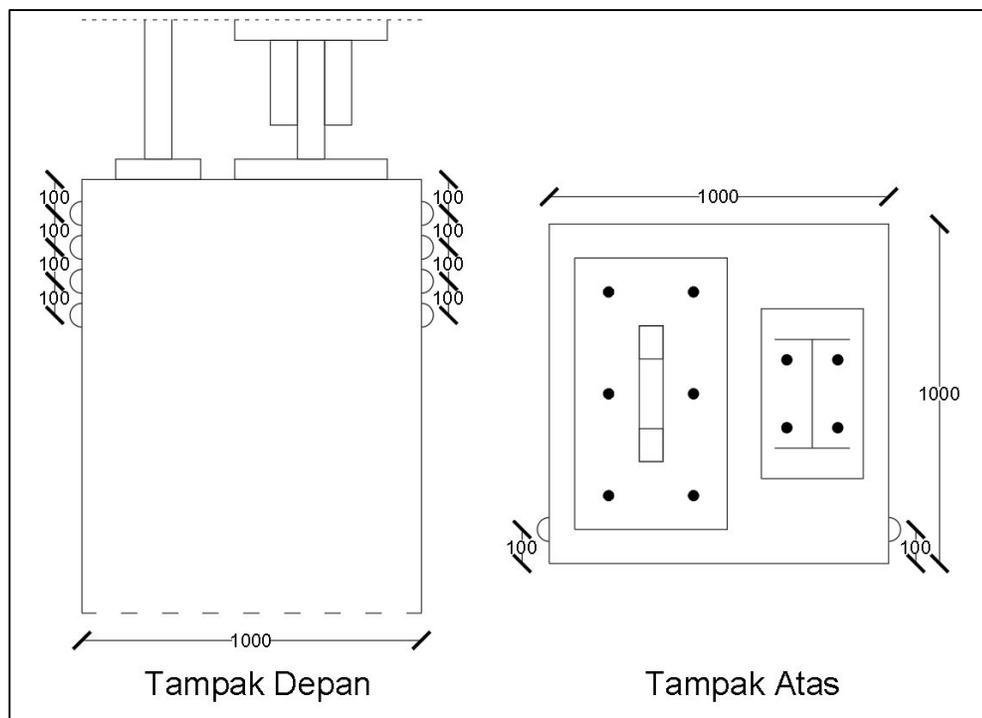
Tahapan ini adalah persiapan awal untuk menentukan dan mempersiapkan lokasi titik uji. Penentuan lokasi uji didasarkan pada kondisi beton dengan permukaan yang relatif bagus. Setelah itu meratakan permukaan titik uji (*flattening*) dengan amplas dan memberi tanda lokasi uji dengan pulpen atau spidol (*marking*).
- Persiapan alat

Tahapan ini adalah menyetel alat UPV PUNDIT (*Portable Unit Non Destructive Indicator Tester*) sesuai keperluan kemudian dikalibrasi sesuai ketentuan pada benda uji kalibrasi (oles permukaan benda uji dengan gel).
- Pengujian

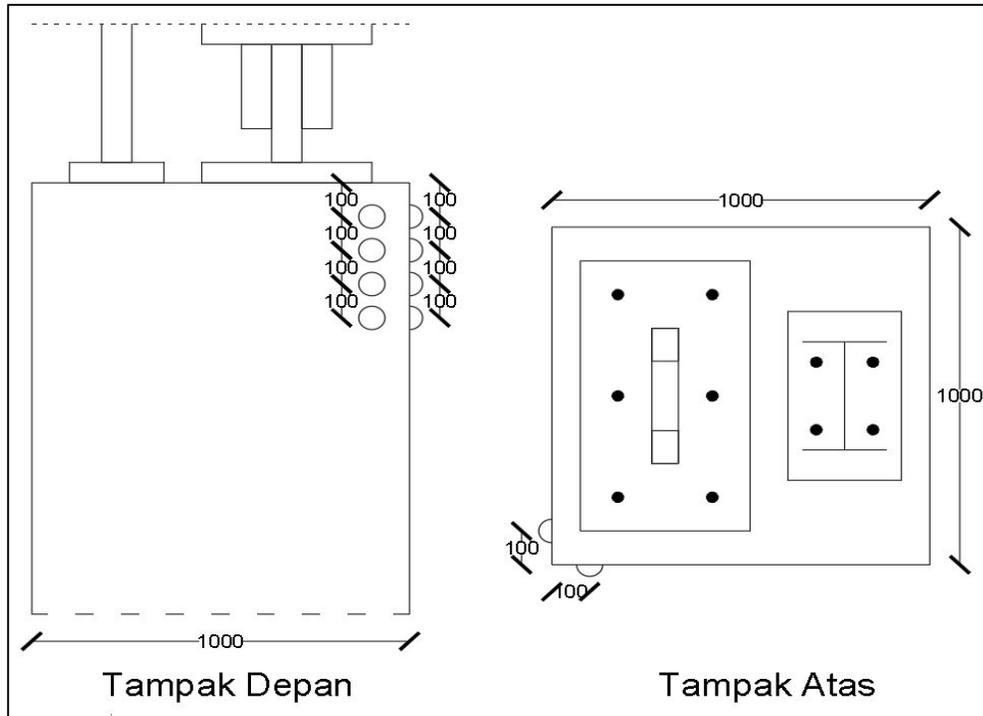
Tahapan ini adalah tahapan pengambilan *pulse velocity* dengan alat Pundit. Sesuai penjelasan singkat standar yang dipakai, terdapat tiga metode pengambilan *pulse velocity*. Untuk pengambilan dengan *direct*

transmission sangat direkomendasikan, karena hasil yang paling akurat. Namun sulit dilakukan pada pengujian kolom dalam penelitian ini, karena diindikasikan pada beton tersebut terdapat baja angkur yang tertanam sehingga menyulitkan transfer gelombangnya. Sehingga opsi selanjutnya yaitu dengan *semi-direct transmission* hasil yang akan diperoleh cukup akurat. Dan yang terakhir adalah *indirect/surface transmission* merupakan metode yang paling buruk hasilnya dibanding metode yang lainnya. Namun butuh direduksi agar hasilnya mendekati nilai *pulse velocity direct transmission*. Setiap melakukan pengujian diwajibkan mengoleskan ultrasonik gel pada beton yang akan diuji.

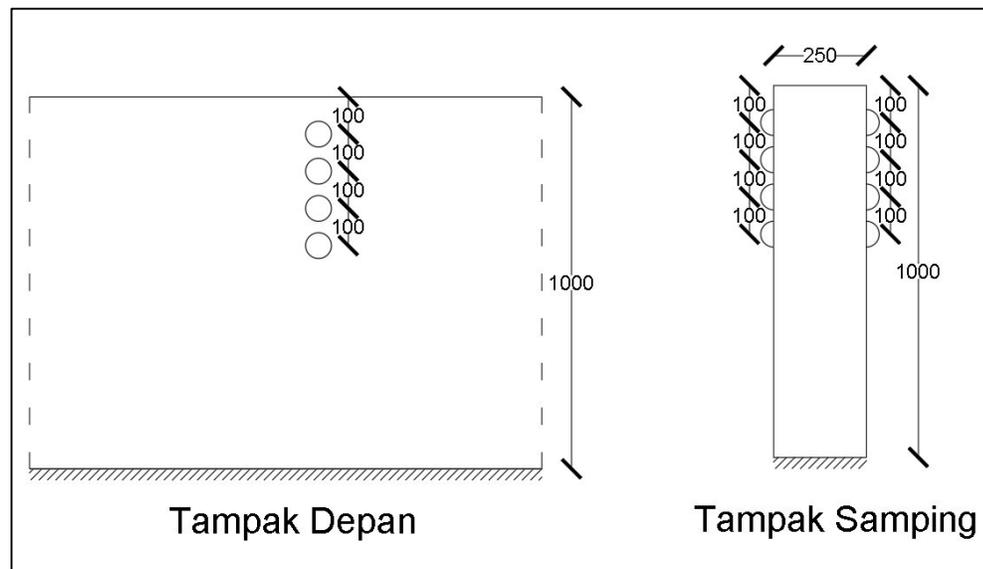
Pengujian UPV test dilakukan pada satu titik kolom dengan dua kali metode pengujian yang berbeda dan satu titik pada dinding dengan satu kali metode pengujian. Berikut adalah rincian titik lokasi pengambilan sampel data UPV test di lapangan:



Gambar 17. UPV Test Metode *Direct Transmission* pada Kolom.



Gambar 18. UPV Test Metode *Semi-Direct Transmission* pada Kolom.



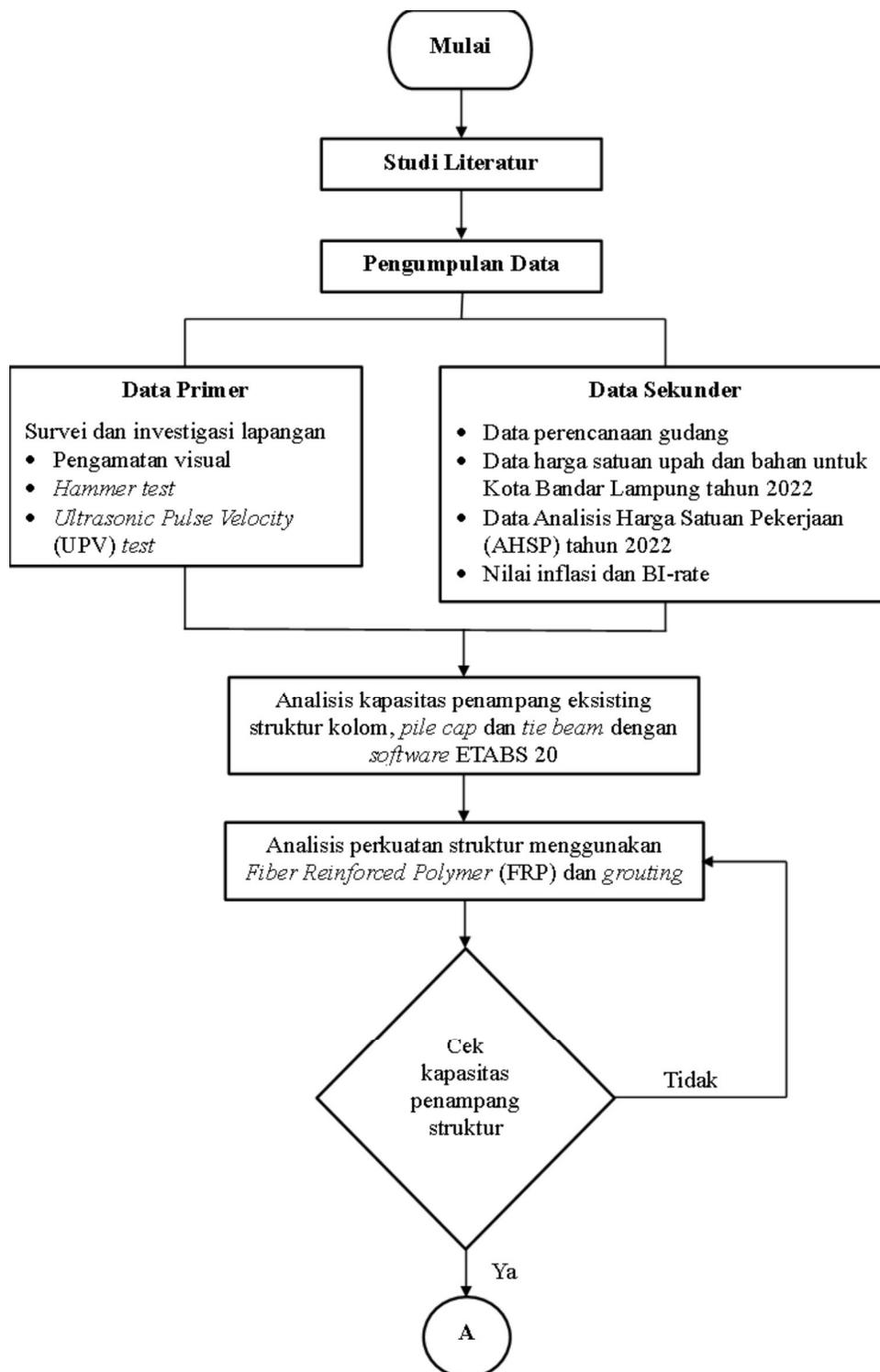
Gambar 19. UPV Test Metode *Direct Transmission* pada Dinding.

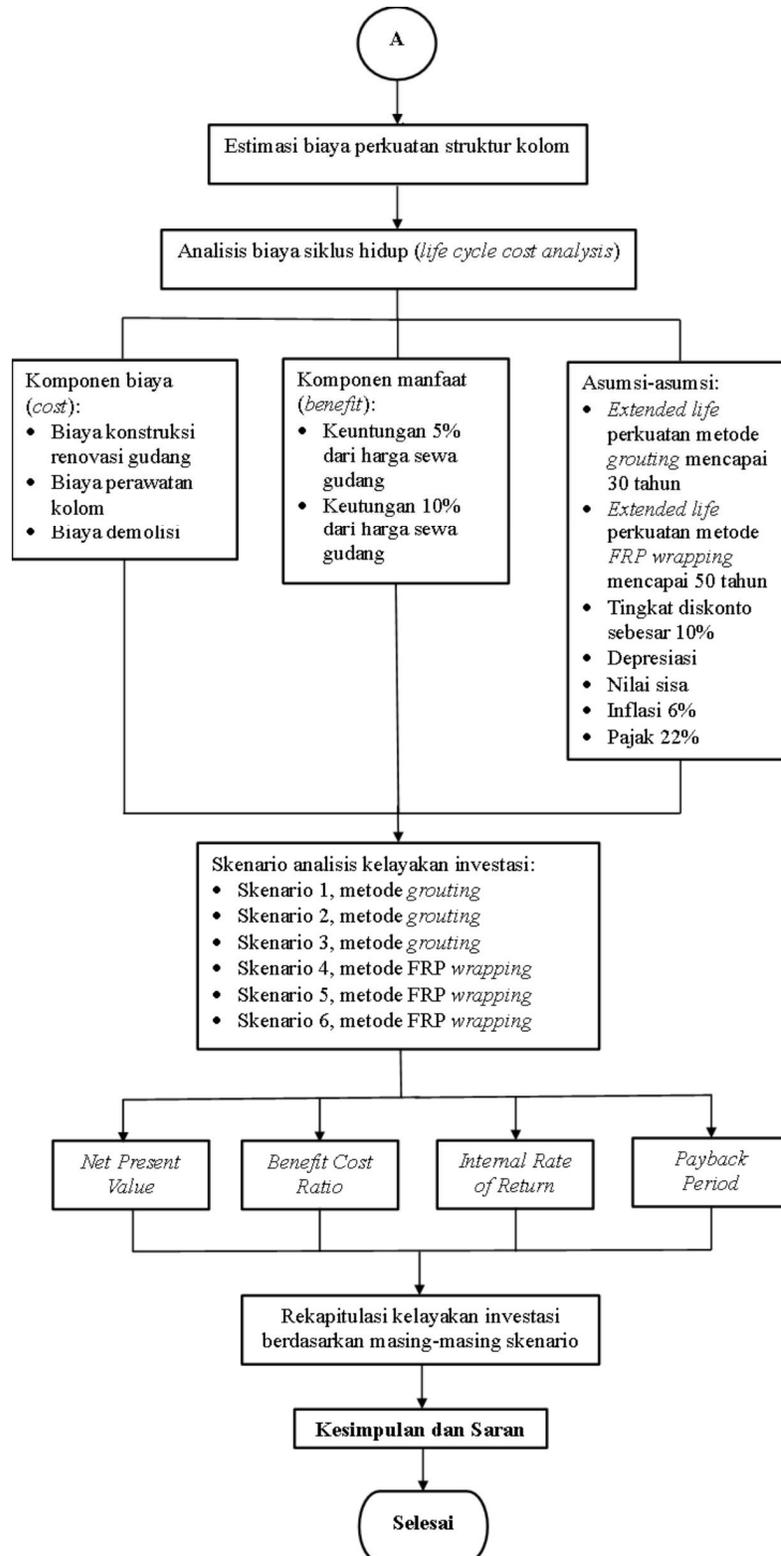
3.3 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengamatan visual secara langsung di lapangan untuk mengetahui kerusakan yang terjadi seperti retak-retak, keropos dan sebagainya.
2. Melakukan pengujian mutu material beton eksisting dengan metode *Non-Destructive Test* (NDT) menggunakan alat *Schmidt Rebound Hammer* dan *Ultrasonic Pulse Velocity Portable Unit Non-Destructive Indicator Test* (UPV PUNDIT).
3. Menganalisis struktur kolom pedestal, *pile cap* dan *tie beam* eksisting menggunakan *software* ETABS 20 berdasarkan pembebanan yang terjadi dan mutu material eksisting untuk mendapatkan kapasitas ultimit dari hasil analisis tersebut.
4. Menganalisis kapasitas penampang eksisting dari struktur kolom pedestal, *pile cap*, dan *tie beam* dengan membandingkan kapasitas ultimit dan kapasitas desain sebagai evaluasi kelayakan struktur tersebut
5. Melakukan analisis kekuatan struktur dengan metode *grouting* dan FRP dengan membandingkan kenaikan persentase kapasitas struktur yang telah dilakukan perkuatan
6. Mengestimasi biaya perkuatan yang akan dilakukan dari alternatif metode perkuatan struktur tersebut.
7. Menganalisis kelayakan investasi dengan enam skenario simulasi. Pada perkuatan metode *grouting* terdapat tiga skenario simulasi, dan perkuatan metode FRP terdapat tiga skenario simulasi.

3.4 Bagan Alir Penelitian





Gambar 20. Bagan Alir Penelitian.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian ini maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil penyelidikan lapangan pada Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional 2 didapatkan rekomendasi opsi perbaikan sebagai berikut:

Tabel 24. Hasil Penyelidikan Struktur dan Rekomendasi Perbaikan

No	Elemen Struktur	Jenis Kerusakan	Rekomendasi Perbaikan
1	Kolom pedestal	Spalling dan retak	<ul style="list-style-type: none">• Perbaikan dengan metode <i>chipping</i> dan <i>grouting</i>• Penambahan perkuatan dengan pelapisan FRP
2	Pelat	Penurunan elevasi	<ul style="list-style-type: none">• Penambahan <i>ground beam</i>
3	Rangka baja	Korosi dan cat terkelupas	<ul style="list-style-type: none">• Pengecatan ulang
4	Penutup atap	Rusak	<ul style="list-style-type: none">• Penggantian penutup atap

2. Berdasarkan hasil pengujian dengan metode *Non-Destructive Test* (NDT) didapatkan mutu eksisting sebesar 13,37 MPa yang akan digunakan untuk analisis kelayakan struktur eksisting dengan ETABS 20. Hasil analisis didapatkan terdapat dua elemen struktur yaitu kolom pedestal (100×100) cm, dan kolom pedestal (60×100) cm melebihi *capacity ratio*.

3. Dari hasil analisis kelayakan struktur yang telah dilakukan, maka struktur yang melebihi *capacity ratio* perlu dilakukan perkuatan. Berikut adalah hasil perkuatan tersebut:
 - A. Metode perkuatan struktur kolom pedestal menggunakan *grouting* didapatkan terjadi peningkatan kapasitas penampang struktur kolom pedestal sebagai berikut:
 - Pedestal (1000×1000) mm mengalami peningkatan 85,15% dari kondisi eksisting.
 - Pedestal (600×1000) mm mengalami peningkatan 141,25% dari kondisi eksisting
 - B. Metode perkuatan struktur kolom pedestal menggunakan FRP didapatkan terjadi peningkatan kapasitas penampang struktur kolom pedestal sebagai berikut:
 - Pedestal (1000×1000) mm mengalami peningkatan 100,35% dari kondisi eksisting dengan kebutuhan 3 lapis FRP.
 - Pedestal (600×1000) mm mengalami peningkatan 196,43% dari kondisi eksisting dengan kebutuhan 2 lapis FRP.
4. Dari enam skenario, ditunjukkan bahwa seluruh skenario memenuhi syarat investasi yaitu nilai NPV bernilai positif ($NPV > 0$), dan $BCR > 1$.
 - A. Kondisi terbaik terjadi pada skenario 2, didapatkan nilai NPV yaitu sebesar Rp11.304.865.113,30., BCR sebesar 1,35., IRR sebesar 14,19%, dan periode pengembalian pada tahun ke-14. Skenario 2 memiliki asumsi sebagai berikut:
 - Perkuatan kolom pedestal menggunakan *grouting*.
 - Keuntungan 10% dari harga sewa.
 - *Extended life* mencapai 30 tahun.
 - Tingkat diskonto 10%.
 - Nilai sisa
 - B. Kondisi terburuk terjadi pada skenario 6, didapatkan nilai NPV yaitu sebesar Rp1.467.339.896,19., BCR sebesar 1,04., IRR sebesar 10,46%, dan periode pengembalian pada tahun ke-32. Skenario 6 memiliki asumsi sebagai berikut:
 - Perkuatan kolom pedestal menggunakan FRP *wrapping*.
 - Keuntungan 8% dari harga sewa

- Inflasi 6%
- Biaya pengecatan kolom setiap 5 tahun
- *Extended life* mencapai 50 tahun
- Tingkat diskonto 10%
- Nilai sisa

C. Dilihat dari 6 skenario, rencana renovasi Gudang Biru PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang ini memberikan keuntungan bagi PT Pelabuhan Indonesia (Persero) Regional Panjang dari segi ekonomi karena menghasilkan keuntungan yang besar dengan melihat hasil NPV yaitu lebih besar dari 0 ($NPV > 0$).

D. Skenario yang terjadi bisa berubah jika perhitungan beberapa komponen lainnya seperti operasional gudang, pemeliharaan gudang, perawatan struktur rangka atap baja, perawatan lantai gudang, dan perawatan elektrikal gudang juga diperhitungkan.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Diharapkan penelitian selanjutnya dapat melakukan investigasi mutu dan kondisi tulangan yang terpasang di lapangan agar dapat mengetahui perbaikan yang lebih luas lagi seperti dengan mengganti tulangan eksisting yang telah rusak
2. Diharapkan penelitian selanjutnya dapat menghitung nilai suku bunga yang lebih efektif lagi dan memperluas ruang lingkup perhitungan biaya siklus hidup tidak sebatas pada komponen struktur kolom serta perhitungan detail terkait biaya demolisi pada bangunan gudang.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh lingkungan sekitar terhadap perkuatan struktur menggunakan *grouting* dan FRP.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 440.2R-17. (n.d.). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17). In *American Concrete Institute*. <https://doi.org/10.14359/51700867>
- Ashworth, A. (1994). *Perencanaan Biaya Bangunan* (L. Wahyudi (ed.)). Gramedia Pustaka Utama.
- Dharma Sipayung, S. W. (2021). *Evaluasi Kelayakan dan Rekomendasi Perkuatan (Retrofit) Gedung Mangkrak Dekanat Fakultas Keperawatan Universitas Andalas*. Universitas Andalas.
- Dinas Perumahan Kawasan Permukiman dan Cipta Karya Provinsi Lampung. *Harga Satuan Upah dan Bahan Provinsi Lampung Tahun 2022*.
- Eamon, C. D., Jensen, E. A., Grace, N. F., & Shi, X. (2012). Life-Cycle Cost Analysis of Alternative Reinforcement Materials for Bridge Superstructures Considering Cost and Maintenance Uncertainties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(4), 373–380. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000398](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000398)
- Fuller, S. K., & Petersen, S. R. (1995). Life Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program. In *NIST Handbook 135* (NIST). National Institute of Standards and Technology.
- Gallagher, P. M., Spatari, S., & Cucura, J. (2013). Hybrid life cycle assessment comparison of colloidal silica and cement grouted soil barrier remediation technologies. *Journal of Hazardous Materials*, 250–251, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.065>
- Giatman, M. (2011). *Ekonomi Teknik* (A. Aliludin (ed.)). Raja Grafindo Persada.
- Ibrahim Salam, S. (2023). *Perkuatan Komponen Struktur Balok dan Kolom Bangunan Gedung dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) (Studi Kasus: Gedung Rumah Sakit dr. Cipto Mangunkusumo Central Medical Unit 3 Jakarta Pusat)*. Universitas Gadjah Mada.
- Ihsani, S., & Yuriza, C. G. (2019). *Perancangan Gedung Kuliah Fakultas Psikologi UIN Raden Fatah Kampus B Palembang*. Politeknik Sriwijaya.

International Atomic Energy Agency. Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures (IAEA 2002). In *International Atomic Energy Agency* (ISSN 1018-5518).

Lasse, D. A. (2014). *Manajemen Kepelabuhanan*. Raja Grafindo Persada.
Lutfi, M., & Juniansyah, P. F. (2017). Analisis Biaya Dan Waktu Metode Retrofitting Pada Struktur Bangunan Dua Lantai (Studi Kasus: SDN Cikaret 01 Kabupaten Bogor) Muhamad. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 6(9), 1689–1699.

Madutujuh, N., & Dafit Natalius, J. P. (2013). Audit Kekuatan Struktur dan Perkuatan Struktur Pasca Gempa. *SEMINAR HASTAG 2013*.

Maulana, A. (2022). *Evaluasi Kelayakan dan Kekuatan Struktur Gedung PT. Inhil Sarimas Kelapa, Riau*. Universitas Andalas.

Maulidya, Y. (2022). *Perilaku Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang dengan Grouting dan GFRP Sheet*. Universitas Hasanuddin.

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 24/PRT/M/2008. *Pedoman Pemeliharaan dan Perawatan Bangunan Gedung*.

Peraturan Menteri PUPR No. 1 tahun 2022. *Pedoman Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*.

Pujawan, I. N. (2002). *EKONOMI TEKNIK* (G. I. Ketut (ed.); Edisi 1, Nomor 1). Prima Printing, Surabaya.

Purnomo, H. (2004). *Perencanaan dan Perancangan Fasilitas, Edisi Pertama* (1 ed.). Graha Ilmu.

Purwandito, M. (2012). *Kajian Kelayakan Investasi Rehabilitasi Gedung Asrama Mahasiswa UNS Surakarta*. Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Rada, Y. H. M. (2018). *Prediksi Kekuatan Beton Berdasarkan Parameter Design , Hammer Test dan Test Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Dengan Menggunakan Artificial Neural Network (ANN)*. Institut Teknologi Sepuluh November.

Refani, A. N., Alrasyid, H., & Irmawan, M. (2015). Evaluasi Struktur Bangunan Gedung Beton Bertulang Berusia 50 Tahun Berdasarkan SNI 1726 2012 dan SNI 2847 2013. *Jurnal APLIKASI*, 13, 17–26.

Riyanto, E. (2018). Penentuan Tingkat Diskonto dalam Penilaian Hutan. *Jurnal Pajak Indonesia*, 2, 39–48.

- Sedayu, M. A., Sulistyono, D., & Aminullah, A. (2019). Eksperimen pada Struktur Pile Cap Tiga Tiang dengan Metode Strut and Tie Model. *INERSIA*, 15(2), 31–43. <https://doi.org/10.21831/inersia.v15i2.28619>
- Sihombing, S., & Sibagariang, S. A. (2020). Perpajakan Teori dan Aplikasi. In *Real Property in Australia*. Widina Bhakti Persada Bandung. <https://doi.org/10.1201/9781003041788-10>
- SNI 1726:2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*.
- SNI 1727:2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*.
- SNI 8971:2021. *Panduan Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Lembaran Serat Berpolimer Terlekat Eksternal untuk Perkuatan Struktur Beton (SNI 8971:2021)*.
- Sundaquist, & Karomui. (2008). *Life Cycle Cost Methodology and LCC Tools*.
- Suyanto, Adhi, Sunaryo, M., T., & Roestam, S. (2001). *Ekonomi Teknik Proyek Sumberdaya Air*. MHI.
- United States (U.S.) Army. (2002). *Composite Materials Handbook Volume 3, Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis, Research Laboratory*. Department of Defense.
- Waluyo, R., Puspasari, V. H., Ningrum, D. S. A., Devina, P. I., & Pihawiano, A. T. (2021). Analisis Estimasi Biaya Perawatan Bangunan Gedung Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(3), 210–217. <https://doi.org/10.24002/jts.v16i3.5393>
- Warman, J. (2004). *Manajemen Pergudangan, seri manajemen no. 57 (57 ed.)*. Pustaka Sinar Harapan.
- Widyaningsih, E., Herbudiman, B., & Hardono, S. (2016). Kajian Eksperimental Kapasitas Sambungan Material Fiber Reinforced Polymer. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 2(3), 29. <https://ejournal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/1119>
- Winarto, A. (2009). *Beberapa Faktor yang Mempengaruhi Permintaan Uang di Indonesia*. Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Wittocx, L., Buyle, M., Audenaert, A., Seuntjens, O., Renne, N., & Craeye, B. (2022). Revamping Corrosion Damaged Reinforced Concrete Balconies: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Life-Extending Repair Methods. *Journal of Building Engineering*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104436>