



**ANALISIS PENGARUH KARBONASI BETON TERHADAP
PREDIKSI MASA PAKAI MENARA PENDINGIN DENGAN
METODE SIMULASI MONTE CARLO
(STUDI KASUS BANGUNAN MENARA PENDINGIN PLTP
GUNUNG SALAK SUKABUMI)**

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Menyelesaikan
Program Studi Magister Teknik Sipil

AGUS SUPIYAT

UNIVERSITAS

55721120018

MERCU BUANA

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MERCU BUANA

2024

ABSTRAK

Nama : Agus Supiyat
NIM : 55721120018
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Judul : Analisis Pengaruh Karbonasi Beton Terhadap Prediksi
Masa Pakai Menara Pendingin Dengan Metode Simulasi
Monte Carlo (Studi Kasus Bangunan Menara Pendingin
Pltp Gunung Salak Sukabumi)
Pembimbing : Dr. Ir. Agung Wahyudi Biantoro, ST, MM, MT

Bangunan Menara Pendingin adalah contoh konstruksi yang secara langsung terkena kondisi iklim buruk yang mengarah kepada kerusakan beton berupa karbonasi. Masa pakai umum bangunan tersebut pada saat perencanaan yaitu sekitar 40 tahun hanya dapat dicapai untuk struktur beton dengan kualitas yang cukup dan dengan ketebalan penutup beton yang memadai yang melindungi tulangan.

Kerusakan yang terjadi seperti pengelupasan selimut beton, retak pada permukaan struktur dinding beton serta korosi pada tulangan struktur perlu menjadi perhatian serius karena akan berdampak pada faktor keamanan struktur bangunan.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh karbonasi pada struktur beton bangunan Menara pendingin pembangkit listrik tenaga panas bumi Gunung Salak yang mengalami degradasi yang disebabkan korosi akibat induksi karbonasi serta memprediksi sisa umur manfaat dari bangunan tersebut.

Metode Analisis untuk mengetahui sisa umur manfaat dan memprediksi waktu yang tepat untuk melakukan perbaikan pada struktur Menara pendingin dengan menggunakan metode simulasi Monte Carlo yang didasarkan pada pengukuran selimut beton dan kedalaman karbonasi. Hasil simulasi Monte Carlo untuk memperkirakan laju karbonasi beton menunjukkan rata-rata 2,4 cm per tahun untuk periode simulasi 25 tahun. Rata-rata karbonasi beton yang diperoleh dari probabilitas adalah 2,28cm Dengan mengulangi simulasi, nilai rata-rata yang mendekati estimasi akan diperoleh dari koefisien hasil uji determinasi sebesar 48,1%. Pengaruh yang diberikan oleh kualitas beton terhadap karbonasi beton adalah negatif, artinya kualitas beton yang lebih baik akan mengurangi karbonasi beton. Umur beton berpengaruh terhadap karbonisasi beton. Dari gambar grafik 4.3 yang memperlihatkan level 4 (15% permukaan yang dipengaruhi oleh manifestasi visual korosi) akan terlampaui setelah 25 tahun dan level 5 (30% dari area yang terpapar) akan terlampaui setelah sekitar 30 tahun

Kata kunci: Menara Pendingin, Karbonasi Beton, *Monte Carlo*

ABSTRACT

Name : Agus Supiyat
NIM : 55721120018
Study Program : *Master of Civil Engineering*
Title : *Analysis Of The Effect Of Concrete Carbonation On The Prediction Of Cooling Tower Life Using The Monte Carlo Simulation Method (Case Study Of Gunung Salak Sukabumi Pltp Cooling Tower Building)*
Mentor : Dr. Ir. Agung Wahyudi Biantoro, ST, MM, MT

Cooling Tower buildings are an example of construction that is directly exposed to extreme conditions which cause concrete damage in the form of carbonation. The design life of the building, which is around 40 years, can only be achieved for concrete structures with good quality and sufficient thickness of the concrete cover that protects the reinforcement.

Damage that occurs, such as peeling of concrete covers, cracks on the surface of concrete structures and corrosion of structural reinforcement, needs to be a serious concern because it will affect the safety factor of the building structure.

This research is intended to determine the effect of carbonation on the concrete structure of the Mount Salak geothermal power plant cooling tower building which is experiencing degradation due to carbonation-induced corrosion and to predict the remaining useful life of the building.

Analysis method to determine the remaining useful life and predict the right time to carry out repairs to the cooling tower structure using the Monte Carlo simulation method which is based on measurements of the concrete cover and carbonation depth. Monte Carlo simulation results to estimate the carbonation rate of concrete show an average of 2.4 cm per year for the 25 year simulation period. The average concrete carbonation obtained from probability is 2.28cm. By repeating the simulation, an average value close to the estimate will be obtained from the coefficient of determination test results of 48.1%. The influence that concrete quality has on concrete carbonation is negative, meaning that better concrete quality will reduce concrete carbonation. The age of the concrete influences the carbonization of the concrete. From graphic image 4.3 which shows that level 4 (15% of the surface affected by visual manifestations of corrosion) will be exceeded after 25 years and level 5 (30% of the exposed area) will be exceeded after approximately 30 years

Keywords: *Cooling Tower, Concrete Carbonation, Monte Carlo*

PERNYATAAN SIMILARITY CHECK

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan bahwa karya ilmiah yang ditulis oleh:

Nama : Agus Supiyat

NIM : 55721120018

Program Studi : Magister Teknik Sipil

Dengan judul:

“ *Identification of the Effect of Concrete Carbonation on the Strength of Cooling Tower Structures Using the Monte Carlo Simulation Method*” telah dilakukan pengecekan *similarity* dengan Turnitin didapatkan nilai persentase sebesar 17%.

Jakarta, 19 Agustus 2024

Administrator Turnitin



(Saras Nur Praticha, S.Psi. MM)



UNIVERSITAS
MERCU BUANA

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan dengan sebenar benarnya bahwa semua pernyataan dalam Tesis ini

Judul : ANALISIS PENGARUH KARBONASI BETON TERHADAP PREDIKSI MASA PAKAI MENARA PENDINGIN DENGAN METODE SIMULASI MONTE CARLO (STUDI KASUS BANGUNAN MENARA PENDINGIN PLTP GUNUNG SALAK SUKABUMI)

Nama : Agus Supiyat

NIM : 55721120018

Program Studi : Magister Teknik Sipil

Tanggal : 31 juli 2024

Merupakan hasil studi Pustaka, penelitian lapangan dan karya sendiri dengan bimbingan dosen pembimbing yang ditetapkan dengan surat Keputusan Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Mercu Buana pada tanggal 01 September 2023 dengan nomor 07-09/002/S-Tgs/IX/2023.

Karya ilmiah ini belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan pada program studi sejenis diperguruan tinggi lain. Semua informasi, data dan hasil pengolahan yang digunakan, telah dinyatakan secara jelas sumber dan dapat diperiksa kebenarannya.

Jakarta, Juli 2024



Agus Supiyat

PENGESAHAN PROPOSAL TESIS

Judul : Analisis Pengaruh Karbonasi Beton Terhadap
Prediksi Masa Pakai Menara Pendingin Dengan Metode Simulasi
Monte Carlo (Studi Kasus Bangunan Menara Pendingin Pltp
Gunung Salak Sukabumi)

Nama : Agus Supiyat

NIM : 55721120018

Program Studi : Magister Teknik Sipil

Tanggal :

Mengesahkan
Pembimbing



Dr. Ir. Agung Wahyudi Biantoro, ST, MM, M.T.
NIDN/NIK. 0329106901/609690021

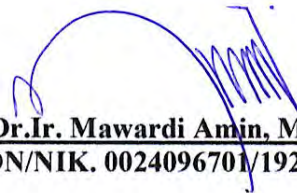
Dekan Fakultas Teknik

Ketua Program Studi
Magister Teknik Sipil

UNIVERSITAS
MERCU BUANA



Dr. Ir. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T.
NIDN/NIK. 0307037202/113720381



Dr. Ir. Mawardi Amin, M.T.
NIDN/NIK. 0024096701/192670076

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas nikmat dan karunia-NYA yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan penelitian berjudul “Analisis Pengaruh Karbonasi Beton Terhadap Prediksi Masa Pakai Menara Pendingin Dengan Metode Simulasi *Monte Carlo* (Studi Kasus Bangunan Menara Pendingin PLTP Gunung Salak Sukabumi)”.

Dalam proses penulisan proposal Tesis serta penyelesaian studi Program Magister di Magister Teknik Sipil Universitas Mercu Buana, penulis banyak mendapatkan bantuan. Oleh karena itu sudah sepantasnya penulis menghaturkan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Agung Wahyudi Biantoro, ST, MM, MT selaku Dosen Pembimbing yang memberikan arahan secara akademik dalam penyusunan Tesis.
2. Ir. Pariatmono Sukamdo, PhD, selaku Dosen Penelaah yang membantu memberikan arahan dan masukan yang berharga dalam penelitian ini.
3. Dr. Ir. Mawardi Amin, MT, selaku Kaprodi Magister Teknik Sipil Universitas Mercu Buana, yang membantu kelancaran belajar penulis
4. Ibu Reni Karno Kinasih ST, MT selaku Sekprodi Magister Teknik Sipil Universitas Mercu Buana.
5. Ibu Dr. Resmi Bestari Muin, MT yang sudah memberikan bimbingan awal dan arahan dalam penyusunan tesis ini.
6. Orangtua kami (Bpk H. Saptarudin dan Ibu Hj. Sumaesih) yang telah senantiasa memberikan dukungan dan doa yang tiada henti.
7. Istri dan anak-anak yang kami sayangi, yang telah memberikan dukungannya dan merelakan waktu ayah nya untuk belajar.
8. Rekan-rekan seperjuangan dari Angkatan 13 yang telah memberikan motivasi.
9. PT Tunas Engineering yang sudah membantu memberikan beasiswa dan data-data dalam penelitian ini.

Penulis menyadari dalam penyusunan proposal Tesis ini masih terdapat kekurangan yang perlu dilengkapi dan disempurnakan. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Jakarta, Juli 2024.



Agus Supiyat



DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PERNYATAAN SIMILARITY CHECK.....	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
PENGESAHAN PROPOSAL TESIS.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Identifikasi, Perumusan dan Batasan Masalah	6
1.2.1 Identifikasi Masalah	6
1.2.2 Perumusan Masalah.....	6
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	6
1.3.1 Maksud Penelitian	6
1.3.2 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Masalah	7
1.5 Manfaat dan Kegunaan Penelitian	7
1.6 Sistematika Penulisan.....	8
5 BAB II.....	8
2.1 Kajian Teori.....	8
2.1.1 Beton.....	8
2.1.2 Korosi	10
2.2 Penelitian Terdahulu	10
2.3 Keterbaruan Penelitian	19
2.4 Kerangka Berfikir	20

2.5	Hipotesis.....	21
6	BAB III.....	22
3.1	Desain Penelitian	22
3.2	Variabel Penelitian.....	23
3.3	Variabel Dependen:.....	24
3.4	Jenis dan Sumber data	25
3.4.1	Data Umum.....	26
3.4.2	Data Curah hujan	26
3.4.3	Data Kelembaban.....	27
3.5	Teknik Pengumpulan Data	28
3.5.1	Pengujian Lapangan	30
a.	Pengujian Karbonasi Beton dengan larutan <i>phenolphthalein</i>	30
b.	Schmidt Rebound Hammer Test.....	31
c.	UPV (Ultrasonic Pulse Velocitymeter Test).....	32
d.	Pengukuran Keretakan dengan UPV Tes	33
e.	Rebar Locator/R-bar meter	33
3.6	Metode Analisis	34
3.6.1	Perhitungan Sisa Umur Manfaat	37
	Contoh:	39
3.	Ketidaktahuan Standar Deviasi (σ);.....	40
3.6.2	Analisis Probabilitas dengan Simulasi Monte Carlo	43
	BAB IV	45
4.1	Data Hasil Penyelidikan Lapangan.....	45
4.1.1	Data Pengamatan Visual / <i>Visual Check</i>	45
4.1.2	Data Retak Struktur	46
4.1.3	Data Geometri	47
4.2	Analisis Data.....	54

4.2.1	Analisis Simulasi <i>Monte Carlo</i>	54
4.2.2	Analisis Regresi Sederhana.....	57
4.3	Pembahasan Hasil Analisis.....	67
4.4	Implikasi Terhadap Industri Konstruksi.....	68
4.5	Keterbatasan Penelitian	69
7	BAB V.....	71
5.1	Kesimpulan.....	71
5.2	Saran.....	71
8	DAFTAR PUSTAKA	73
	Lampiran A	77



UNIVERSITAS
MERCU BUANA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kerusakan Struktur (Laporan Penelitian 2019).....	3
Gambar 2. 1 Karbonasi dibantu oleh air dan adsorpsi CO ₂ (Fuhaid dan Niaz, 2022a)	9
Gambar 2. 2 Kerangka Berfikir	20
Gambar 3. 1 Diagram Pengaruh Antar Variabel	24
Gambar 3. 2 Lokasi PLTP Gunung Salak, Sukabumi (Sumber : Google Earth) ..	26
Gambar 3. 3 Curah Hujan di PLTP Gunung Salak (Sumber : BMKG 2024).....	27
Gambar 3. 4 Kelembaban di PLTP Gunung Salak (Sumber BMKG 2024)	28
Gambar 3. 5 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3. 6 Pengujian Karbonasi pada dinding beton (Ter karbonasi) (Survey penelitian 2019).....	30
Gambar 3. 7 Pengujian Karbonasi pada beton (Tidak ter karbonasi) (Survey penelitian 2019)	30
Gambar 3. 8 Grafik pembacaan Schmidt Rebound Hammer Test (Sjafei Amri, 2006)	31
Gambar 3. 9 Peralatan Schmidt Rebound Hammer Test (Survei Penelitian, 2019)	32
Gambar 3. 10 Peralatan UPV tes (Survei Penelitian, 2019)	33
Gambar 3. 11 Alat UPV Test untuk keretakan beton (Survei Penelitian, 2019)....	33
Gambar 3. 12 Peralatan Rebar Locator/Profometer (Survei Penelitian, 2019).....	34
Gambar 3. 13 Metode pelaksanaan Rebar Locator (Survei Penelitian, 2019).....	34
Gambar 3. 14 Invers Transformasi (Ranganathan, 1999).....	36
Gambar 3. 15 Diagram alir simulasi Monte Carlo (Ranganathan, 1999).....	37
Gambar 3. 16 Histogram dan fungsi densitas probabilitas dari t_i dan Δt_{cr1} (Mlcoch & Sykora, 2020)	43
Gambar 3. 17 Histogram dan fungsi densitas probabilitas dari waktu inisiasi korosi akibat karbonasi t_{cr1} (Mlcoch & Sykora, 2020).....	44
Gambar 3. 18 Indeks keandalan sebagai fungsi waktu ditunjukkan dalam warna abu-abu pada sumbu y sekunder (Mlcoch & Sykora, 2020).....	44

Gambar 4. 1 Retak Dinding Beton (sumber penelitian 2019).....	47
Gambar 4. 2 Bangunan Struktur Cooling Tower PLTP Gunung Salak (sumber penelitian 2019).....	48
Gambar 4. 3 Pengaruh kualitas beton terhadap laju Karbonasi	59
Gambar 4. 4 Pengaruh Lingkungan terhadap Laju Karbonasi	61
Gambar 4. 5 Pengaruh Kekuatan Struktur terhadap laju karbonasi	64
Gambar 4. 6 Pengaruh Karbonasi terhadap umur bangunan.....	66
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Laju Karbonasi dengan nilai β	67



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu Tentang Pengaruh Karbonasi Dan Korosi Pada Beton.....	10
Tabel 2. 2 Penelitian Karbonasi Terdahulu.....	17
Tabel 2. 3 Keterbaruan Penelitian	19
Tabel 3. 1 Data Curah hujan 10 tahun terakhir di PLTP Gunung Salak.....	26
Tabel 3. 2 Data Kelembaban di PLTP Gunung Salak	27
Tabel 3. 3 Arah Pengujian Schmidt Rebound Hammer Test.....	32
Tabel 3. 4 Tingkat degradasi berdasarkan indeks keandalan dari pers. (9).....	39
Tabel 3. 5 Tingkat degradasi berdasarkan tanda-tanda korosi tulangan yang terlihat	40
Tabel 3. 6 Input parameters.....	42
Tabel 4. 1 Hasil Pengamatan Visual Secara Keseluruhan	45
Tabel 4. 2 Hasil pengujian Hammer test.....	49
Tabel 4. 3 Batasan Kecepatan Rambat untuk Homogenitas Beton	50
Tabel 4. 4 Nilai Hasil Pengujian UPV Tes	50
Tabel 4. 5 Nilai Kedalaman retak Hasil Pengujian UPV Tes	51
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Karbonasi Beton	52
Tabel 4. 7 Data Kedalaman Karbonasi	54
Tabel 4. 8 Probabilitas dan Probabilitas Kumulatif.....	55
Tabel 4. 9 Kemungkinan Bilangan Acak yang Muncul.....	55
Tabel 4. 10 Simulasi Monte Carlo.....	56
Tabel 4. 11 Koefisien Determinasi (X1, Y1).....	57
Tabel 4. 12 Uji Anova / Uji F (X1, Y1).....	57
Tabel 4. 13 Pengaruh Kualitas Beton (X1) terhadap Kedalaman Karbonisasi Beton (Y1).....	58
Tabel 4. 14 Koefisien Determinasi (X2, Y2)	60
Tabel 4. 15 Uji Anova / Uji F (X2, Y2).....	60
Tabel 4. 16 Pengaruh Efek Lingkungan (X2) terhadap Laju Karbonisasi Beton (Y2).....	60

Tabel 4. 17 Koefisien Determinasi (X3, Y3).....	62
Tabel 4. 18 Uji Anova / Uji F (X3, Y3).....	62
Tabel 4. 19 Pengaruh Kekuatan Struktur (X3) terhadap Tingkat Karbonisasi Beton (Y3).....	63
Tabel 4. 20 Koefisien Determinasi (X4, Y4).....	64
Tabel 4. 21 Uji Anova / Uji F 1 (X4, Y4).....	65
Tabel 4. 22 Pengaruh Kekuatan Struktur (X4) terhadap Tingkat Karbonisasi Beton (Y4).....	65

